



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

**ESTIMATIVA ESPAÇO-TEMPORAL DA SUPERFÍCIE  
POTENCIOMÉTRICA DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI NA  
CIDADE DE RIBEIRÃO PRETO (SP), BRASIL**

Rubens Caldeira Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim

Tese de Doutorado elaborada junto  
ao Curso de Pós-Graduação em  
Geociências Área de Concentração  
em Geociências e Meio Ambiente,  
para obtenção do Título de Doutor em  
Geociências

Rio Claro (SP)  
2003

551.49 Monteiro, Rubens Caldeira.  
M775e Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do sistema Aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil / Rubens Caldeira Monteiro. - Rio Claro : [s.n.], 2003 xvii, 212 f. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista – Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Paulo Milton Barbosa Landim

1. Águas subterrâneas. 2. Hidrogeologia.  
3. Sobreexploração. 4. Geoestatística. 5. Máxima Entropia Bayesiana. Título

## **COMISSÃO EXAMINADORA**

Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do Sistema Aquífero  
Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil  
*Rubens Caldeira Monteiro*

---

Paulo Milton Barbosa Landim  
(DGA, IGCE-UNESP/Rio Claro)  
- orientador -

---

Armando Zaupa Remacre  
(DGRN, IGe-UNICAMP/Campinas)

---

Gilberto Câmara Neto  
(DPI, INPE/São José dos Campos)

---

Osmar Sinelli  
(FFCLRP, USP/Ribeirão Preto)

---

Ricardo César Aoki Hirata  
(GSA, IGc-USP/São Paulo)

---

Rubens Caldeira Monteiro  
- aluno -

Rio Claro, 07 de Maio de 2003

Resultado: APROVADO com menção de distinção no Programa de Pós-Graduação em  
Geociências – Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, Nível de  
Doutorado

---

## DEDICATÓRIA



Dedicado à Deus,  
minha família  
e aos espíritos que nos acompanham  
na peregrinação terrestre

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, mestre, amigo e pai intelectual, Paulo M. B. Landim, professor emérito da UNESP e comendador da Ordem Nacional do Mérito Científico, que sempre me estimulou e permitiu caminhar com os próprios pés pelos meandros da ciência, trazendo palavras de sabedoria daqueles que já se encontram maturados pelos revezes da vida.

À UNESP pela minha participação no programa de pós-graduação e toda a infraestrutura e recursos oferecidos, com destaque ao Laboratório de Geomatématica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo n. 99/01719-0) pelo financiamento do projeto de doutorado e oportunidade do desenvolvimento do trabalho pela Reserva Técnica.

À supervisão, orientação e compartilhamento de conhecimento dos professores George Christakos e Marc Laurent Serre do Department of Environmental Sciences and Engineering (School of Public Health, University of North Carolina at Chapel Hill - UNC) dos Estados Unidos, bem como a aceitação de minha participação em seu grupo de pesquisa, disciplinas lecionadas e oportunidade de estágio.

Ao Departamento de Água e Esgotos de Ribeirão Preto (DAERP) da administração atual e anterior, nas pessoas de sua superintendente Isabel Fátima Bordini e do geólogo MSc. Saulo de Tarso Ferreira, pela disponibilização dos dados e atenção em todas as informações que requeri durante o desenvolvimento desse trabalho. À Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto, por ceder o mapa viário do município, usado como mapa base para o desenvolvimento do projeto.

Ao auxílio e sugestões dos seguintes docentes e pesquisadores: José Ricardo Sturaro e Antônio Roberto Saad (Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro), Armando Zaupa Remacre e Sueli Yoshinaga Pereira (Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/Campinas), Gilberto Câmara Neto e Eduardo Celso G. Camargo (Divisão de Processamento de Imagens, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/São José dos Campos) e Juan Carlos Cerón-García (Departamento de Geología, Universidad de Huelva - UHU/Espanha).

Ao grande amigo, colega de república por muito tempo e maior incentivador dos passos que dei rumo às ciências, Luiz Felipe Brandini Ribeiro (Montanha).

Aos amigos e colegas José Vicente Elias Bernardi, Carlos Eduardo Vieira Toledo, Ângelo Gilberto Manzatto, Alessandra Cristina Corsi, Roberto Wagner Lourenço e Cláudio Benedito Batista Leite pelas diversas discussões sobre análise espacial, multivariada, ciências ambientais e formação profissional.

Aos colegas e amigos da Universidade da Carolina do Norte Rajah S. Augustinraj, Chandra Abhishek, Alexandros Kolovos e KyungMee Choi pelas discussões a respeito de Geoestatística, Máxima Entropia Bayesiana e uma sociedade multicultural.

Aos meus amigos, colegas e professores do curso de graduação em Geologia e pós-graduação em Geociências da UNESP/Rio Claro, especialmente, Edgar Itsuo Kawahama (Miojo), por todas as experiências compartilhadas nesta vida. Aos meus queridos amigos, colegas e professores do curso de graduação em Gestão Ambiental da ESALQ-USP/Piracicaba, com os quais convivo atualmente.

Aos funcionários da UNESP que me permitiram o desenvolvimento da pesquisa científica, oferecendo seus préstimos e serviços, especialmente a Darlene de Cássia Armbrust, do Laboratório de Geomatemática do Departamento de Geologia Aplicada. Menciono também com destaque os funcionários da Biblioteca Central da UNESP/Rio Claro, que sempre me atenderam com presteza, atenção e simpatia.

Aos doutores Alejo Mesa Larrambehere e Allen Hutcheson Fetter pela correção do resumen e abstract, respectivamente.

Àqueles amigos que entram em nossas vidas pela porta do coração, muitos dos quais conheci pelo Espiritismo.

Em destaque especial agradeço a Deus pelo dom da vida e pelos meus familiares e a eles pelo amor, paciência, instrução, formação e esteio emocional e financeiro que sempre me proporcionaram: meu pai Rubens, minha mãe Solange e minhas irmãs Bibiana, Stefânia e Beatriz.

## E P Í G R A F E

*Planeta Água*  
Guilherme Arantes

*Água que nasce na fonte serena do mundo*  
*E que abre o profundo grotão.*  
*Água que faz inocente riacho e deságua*  
*Na corrente do ribeirão.*  
*Águas escuras dos rios*  
*Que levam a fertilidade ao sertão.*  
*Águas que banham aldeias*  
*E matam a sede da população.*  
*Águas que caem das pedras,*  
*No véu das cascatas, ronco de trovão*  
*E depois dormem tranquilas*  
*No leito dos lagos, no leito dos lagos.*  
*Água dos igarapés onde Iara, mãe d'água,*  
*É misteriosa canção.*  
*Água que o sol evapora,*  
*pro céu vai embora*  
*Virar nuvens de algodão.*  
*Gotas de água da chuva,*  
*Alegre arco-íris sobre a plantação.*  
*Gotas de água da chuva,*  
*Tão tristes são lágrimas na inundação.*  
*Águas que movem moinhos*  
*São as mesmas águas*  
*Que encharcam o chão*  
*E sempre voltam humildes*  
*Pro fundo da terra, pro fundo da terra.*  
*Terra planeta água... terra planeta água...*

**À água, uma das mais simples moléculas do universo, que foi o meio  
 escolhido pelo Supremo Criador do Universo para que a vida  
 florescesse sob as mais hostis condições do meio...**

**SUMÁRIO**

<b>ÍNDICE ANALÍTICO</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>xvii</b>
<b>I. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>II. RECURSOS HÍDRICOS</b>	<b>4</b>
<b>III. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA</b>	<b>38</b>
<b>IV. METODOLOGIA</b>	<b>86</b>
<b>V. APLICAÇÃO E DISCUSSÃO</b>	<b>148</b>
<b>VI. CONCLUSÕES</b>	<b>174</b>
<b>VII. REFERÊNCIA</b>	<b>181</b>
<b>VIII. APÊNDICES</b>	<b>196</b>
<b>IX. ANEXOS</b>	<b>209</b>
<b>X. GLOSSÁRIO</b>	<b>212</b>

## ÍNDICE ANALÍTICO

<b>ÍNDICE ANALÍTICO .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xvii</b>
<b>I. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Justificativa .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo .....</b>	<b>2</b>
<b>3. Estrutura .....</b>	<b>2</b>
<b>II. RECURSOS HÍDRICOS .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Aspectos Gerais.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Águas Subterrâneas e Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos .....</b>	<b>6</b>
2.1. Abastecimento e Saneamento Ambiental.....	6
2.2. Qualidade e Contaminação das Águas Subterrâneas.....	8
2.3. Urbanização.....	8
2.4. Quantidade e sobreexploração.....	10
<b>3. Legislação para Recursos Hídricos Subterrâneos.....</b>	<b>21</b>
<b>4. Aquífero Guarani .....</b>	<b>30</b>
4.1. Aspectos Físicos e Hidráulicos.....	33

4.2. Aspectos Hidrogeoquímicos.....	34
<b>III. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....</b>	<b>38</b>
<b>1. Localização e Acesso.....</b>	<b>38</b>
<b>2. Aspectos Históricos e Econômicos .....</b>	<b>39</b>
<b>3. Aspectos Populacionais .....</b>	<b>43</b>
<b>4. Aspectos Fisiográficos .....</b>	<b>44</b>
4.1. Clima .....	44
4.2. Geomorfologia e Hidrografia .....	46
4.3. Pedologia .....	49
4.4. Uso e ocupação do espaço e vegetação .....	51
<b>5. Geologia Regional.....</b>	<b>52</b>
5.1. Estratigrafia .....	55
5.2. Geologia Estrutural.....	64
5.3. Aspectos Geotécnicos.....	65
<b>6. Geologia Local .....</b>	<b>66</b>
<b>7. Recursos Hídricos em Ribeirão Preto.....</b>	<b>69</b>
7.1. Águas Superficiais.....	69
7.2. Águas Subterrâneas .....	73
7.3. O Aquífero Guarani em Ribeirão Preto.....	84
<b>IV. METODOLOGIA.....</b>	<b>86</b>
<b>1. Cartografia Hidrogeológica e Mapeamento Potenciométrico.....</b>	<b>88</b>
1.1. Dados Hidrogeológicos .....	89
1.2. Cartografia Hidrogeológica.....	90
<b>2. Superfícies de Tendência .....</b>	<b>92</b>
2.1. Comparação Quantitativa de Superfícies de Tendência.....	95
<b>3. Geoestatística Clássica – Krigagem e Simulação Estocástica.....</b>	<b>97</b>
3.1. Conceitos Básicos.....	99
3.2. Análise Estrutural .....	107

3.3. Predição por Krigagem.....	118
3.4. Simulação Geoestatística.....	123
<b>4. Geoestatística Espaço-Temporal – Máxima Entropia Bayesiana.....</b>	<b>131</b>
4.1. Conceitos Básicos.....	133
4.2. Bases do Conhecimento Físico.....	136
4.3. Preditor.....	143
4.4. Síntese.....	144
<b>5. Geoestatística Clássica versus Máxima Entropia Bayesiana.....</b>	<b>144</b>
<b>6. Equipamentos e Softwares Utilizados.....</b>	<b>146</b>
<b>V. APLICAÇÃO E DISCUSSÃO.....</b>	<b>148</b>
1. Aquisição e Análise Exploratória dos Dados.....	148
2. Análise de Superfícies de Tendência.....	155
3. Geoestatística Clássica.....	159
4. Máxima Entropia Bayesiana.....	165
4.1. Conhecimento Geral.....	166
4.2. Geração de dados tipo soft.....	166
4.3. Predição espaço-temporal.....	170
<b>VI. CONCLUSÕES.....</b>	<b>174</b>
1. Aspectos da Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos.....	174
2. Mapeamento Espaço-Temporal.....	176
3. Dificuldades no desenvolvimento do projeto.....	179
3. Sugestões para trabalhos futuros.....	179
<b>VII. REFERÊNCIA.....</b>	<b>181</b>
1. Aspectos Gerais, Geografia, Dados Estatísticos e Mapas.....	181
2. Geologia.....	182

<b>3. Sistema Aquífero Guarani e Recursos Hídricos .....</b>	<b>185</b>
<b>4. Geoestatística e Superfícies de Tendência.....</b>	<b>190</b>
<b>VIII. APÊNDICES.....</b>	<b>196</b>
<b>APÊNDICE A – Localização e cota altimétrica da boca dos poços.....</b>	<b>197</b>
<b>APÊNDICE B – Dados de Nível Estático para Krigagem .....</b>	<b>198</b>
<b>APÊNDICE C – Dados de Nível Estático para MEB.....</b>	<b>200</b>
<b>APÊNDICE D – Dados de Nível Dinâmico para MEB .....</b>	<b>202</b>
<b>IX. ANEXOS .....</b>	<b>209</b>
<b>ANEXO A – Dados da FIPAI.....</b>	<b>209</b>
<b>X. GLOSSÁRIO .....</b>	<b>212</b>

## **LISTA DE TABELAS**

- Tab. 01:** *Caracterização de sobreexploração segundo regime e impacto*
- Tab. 02:** *Legislação Federal para Recursos Hídricos e afins*
- Tab. 03:** *Legislação Estadual (São Paulo) para Recursos Hídricos e afins*
- Tab. 04:** *Aspectos da geometria do Aqüífero Guarani*
- Tab. 05:** *Aspectos hidráulicos do Aqüífero Guarani*
- Tab. 06:** *Principais características hidrogeoquímicas do Aqüífero Guarani*
- Tab. 07:** *Vulnerabilidade do Aqüífero Guarani*
- Tab. 08:** *Localização dos pontos de amostragem da CETESB*
- Tab. 09:** *Área aflorante dos Sistemas Aqüíferos da UGRHI Pardo*
- Tab. 10:** *Classificação de mapas hidrogeológicos*
- Tab. 11:** *Tabela de dados hipotéticos*
- Tab. 12:** *Comparação entre métodos de interpolação*
- Tab. 13:** *Comparação entre a MEB e a Krigagem*

## **LISTA DE FIGURAS**

- Tab. 01:** Caracterização de sobrexploração segundo regime e impacto
- Tab. 02:** Legislação Federal para Recursos Hídricos e afins
- Tab. 03:** Legislação Estadual (São Paulo) para Recursos Hídricos e afins
- Tab. 04:** Aspectos da geometria do Aqüífero Guarani
- Tab. 05:** Aspectos hidráulicos do Aqüífero Guarani
- Tab. 06:** Principais características hidrogeoquímicas do Aqüífero Guarani
- Tab. 07:** Vulnerabilidade do Aqüífero Guarani
- Tab. 08:** Localização dos pontos de amostragem da CETESB
- Tab. 09:** Área aflorante dos Sistemas Aqüíferos da UGRHI Pardo
- Tab. 10:** Classificação de mapas hidrogeológicos
- Tab. 11:** Tabela de dados hipotéticos
- Tab. 12:** Comparação entre métodos de interpolação
- Tab. 13:** Comparação entre a MEB e a Krigagem
- Fig. 01:** Abastecimento público no Estado de São Paulo (CETESB, 1998b)
- Fig. 02:** Impacto da urbanização no Regime Hidrológico (SURESH, 1999)
- Fig. 03:** Distribuição dos maiores sistemas aqüíferos do Estado de São Paulo (modificado de Campos, 1993)
- Fig. 04:** Modelo esquemático do funcionamento hidráulico dos principais sistemas aqüíferos (adaptado de DAEE por CAMPOS, 1993 e modificado neste)
- Fig. 05:** Grupos da análise hidrogeoquímica do Aqüífero Guarani no Estado de São Paulo (MENG; MAYNARD, 2001)
- Fig. 06:** Diagrama esquemático mostrando regiões hidrogeoquímicas (Meng; Maynard, 2001)
- Fig. 07:** Localização do município de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo
- Fig. 08:** Articulação das folhas topográficas 1:50.000 (IBGE, 1971 a,b,c,d; 1979)
- Fig. 09:** Acesso para a área a partir de São Paulo
- Fig. 10:** População de Ribeirão Preto
- Fig. 11:** Área urbana e expansão urbana do município de Ribeirão Preto (mod. de RIBEIRÃO PRETO/SEPLAN, 1999)
- Fig. 12:** Temperatura de mensal de Ribeirão Preto de 1992-1997
- Fig. 13:** Precipitação pluviométrica mensal de Ribeirão Preto de 1992-1997
- Fig. 14:** Principais províncias geomorfológicas e localização da área sobre MDT (figura modificada e sem referência)
- Fig. 15:** Topografia, drenagem e infra-estrutura urbana de Ribeirão Preto
- Fig. 16:** Modelo 3-D e infra-estrutura urbana de Ribeirão Preto (exagero vertical de 15x)
- Fig. 17:** Geologia mesozóica da Bacia do Paraná (modificado de ROCHA, 1996)

**Fig. 18:** Coluna litoestratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque (em cores) das formações Pirambóia e Botucatu, em laranja) e Serra Geral (em verde) (modificado de MILANI, 1997)

**Fig. 19:** Mapa geológico simplificado do Estado de São Paulo (modificado de IPT, 1981b)

**Fig. 20:** Mapa de isópacas da Formação Botucatu (modificado de MILANI, 1997)

**Fig. 21:** Diagrama esquemático, sem escala, ilustrando o empilhamento da Superseqüência Gondwana II da Bacia do Paraná. I – Meso/Neojurássico, II – Eocretáceo “a” (advento do magmatismo), III – Eocretáceo “b” (instantes finais do evento ígneo) (MILANI, 1997)

**Fig. 22:** Esboço da geologia de Ribeirão Preto, SP (mod. RIBEIRÃO PRETO/SEPLAN, 1994)

**Fig. 23:** Coluna estratigráfica do município de Ribeirão Preto, litotipos e unidades estratigráficas (modificado de DAERP/USP, 1979 por CERVI, 1981 e adaptado neste)

**Fig. 24:** Mapa da 7ª Zona Hidrográfica do Estado de São Paulo (modificado de CETESB, 1989)

**Fig. 25:** Áreas e problemas prioritários da Bacia do Rio Moji/Pardo (DAEE, 1984)

**Fig. 26:** Fluviograma da sub-bacia do Rib. da Prata/Tamanduá (CBH-PARDO, 2003)

**Fig. 27:** Seção geológica/hidrológica BB’ mostrando a “janela” do Botucatu (PETROBRÁS, 1997)

**Fig. 28:** Área máxima afetada pelo chorume e direção da migração de poluentes originados no depósito de lixo (PETROBRÁS, 1997)

**Fig. 29:** Fluxograma da análise dos dados

**Fig. 30:** Comportamento espacial de uma variável independente condicionada por uma variável independente (curvas), duas variáveis independentes (superfícies) e três variáveis independentes (hipersuperfícies) (mod. de LANDIM, 1998)

**Fig. 31:** Mapas de pontos amostrais

**Fig. 32:** Interpolação de um ponto (X) utilizando pontos amostrais

**Fig. 33:** Exemplo de uma cdf (a) e uma pdf (b)

**Fig. 34:** Realizações de função aleatória X nos pontos p (mod. CHRISTAKOS, 2000)

**Fig. 35:** Perfis hipotéticos de dados ilustrando relações comuns entre a média local (vermelho) e a variabilidade local (azul). (a) média e variabilidade constantes; (b) média local com tendência e variabilidade constante; (c) média constante e variabilidade local com constante; e (d) média e variabilidade locais com tendência (mod. ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989)

**Fig. 36:** Variável com (a) alta variabilidade e (b) baixa variabilidade

**Fig. 37:** Variável original e transladada de h

**Fig. 38:** Gráfico de dispersão entre as variáveis original e transladada para diferentes h’s (h=100, h=200, h=300) (mod. ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989)

**Fig. 39:** Nuvem de variogramas de amostragem em malha regular

**Fig. 40:** Nuvem de variogramas de amostragem em malha irregular e pontos do variograma experimental para cada passo h

**Fig. 41:** Mapa de variogramas hipotético

**Fig. 42:** Parâmetros para variograma direcional (mod. DEUTSCH; JOURNAL, 1997)

**Fig. 43:** Parâmetros de um variograma

- Fig. 44:** Variograma experimental (a) e modelo ajustado (b)
- Fig. 45:** Modelos de variograma com patamar
- Fig. 46:** Modelos de variograma com patamar
- Fig. 47:** (a) Predição - pontual, valor médio, mais provável, num bloco; (b) Simulação - histograma para um ponto ou área, pela estimativa de uma f.d.p.
- Fig. 48:** Anamorfose gráfica ou experimental –  $F(z)$  é uma distribuição qualquer e  $G(y)$  é uma distribuição normal com média zero e variância 1
- Fig. 49:** Estimativa espaço-temporal (mod. de CHRISTAKOS et al., 2002, fig. 4.1)
- Fig. 50:** Dirac: p.d.f. (a) e c.d.f. (b)
- Fig. 51:** Localização dos poços operados pelo DAERP
- Fig. 52:** Localização dos poços sobre malha viária
- Fig. 53:** Localização dos pontos amostrais com escala de valores de CNE
- Fig. 54:** Histograma da CNE
- Fig. 55:** Gráfico de Probabilidade Normal para CNE
- Fig. 56:** Dispersão entre a cota altimétrica da topografia e do nível estático
- Fig. 57:** Superfície potenciométrica por Mínima Curvatura
- Fig. 58:** Ilustração da relação entre o nível estático e o nível dinâmico de um aquífero confinado
- Fig. 59:** Superfície de tendência de 1º grau (esquerda) e de 2º grau (direita)
- Fig. 60:** Resíduos da superfície de tendência de 1º grau
- Fig. 61:** Resíduos da superfície de tendência de 2º grau
- Fig. 62:** Superfície de tendência de 3º grau
- Fig. 63:** Resíduos da superfície de tendência de 3º grau
- Fig. 64:** Variogramas experimentais diretos e cruzado para cota altimétrica da topografia e do nível estático
- Fig. 65:** Mapa de variograma dos resíduos da superfície quadrática da CNE com passo 1,8 km
- Fig. 66:** Variograma experimental omnidirecional para a cota altimétrica no nível estático
- Fig. 67:** Variogramas direcionais:  $\gamma_{EW}(h) = 130 + \text{Lin}(0,2)$  e  $\gamma_{NS}(h) = 130 + 450.\text{Sph}(4500)$
- Fig. 68:** Variogramas direcionais:  $\gamma_{EW}(h) = 491$  e  $\gamma_{NS}(h) = 30 + 450.\text{Sph}(3000)$
- Fig. 69:** Histograma do erro padrão  $(Z^*-Z)/S^*$  e diagrama do valor estimado pelo erro padrão
- Fig. 70:** Covariograma espaço-temporal
- Fig. 71:** Regressão entre a cota altimétrica do nível dinâmico (azul) e estático (vermelho)
- Fig. 72:** Mapa da profundidade de NE para 01-Jul-1996
- Fig. 73:** Mapa de variância da profundidade de NE para 01-Jul-1996
- Fig. 74:** Mapa da profundidade de NE para 01-Jul-2001
- Fig. 75:** Mapa de variância da profundidade de NE para 01-Jul-2001
- Fig. 76:** Mapa da profundidade de NE para 01-Jul-2001 com maior raio de procura
- Fig. 77:** Mapa de variância da profundidade de NE para 01-Jul-2001 com maior raio de procura

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
- ANA – Agência Nacional de Águas
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (vinculado à Secretaria Estadual do Meio Ambiente)
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica (da Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Estado de São Paulo)
- DAERP – Departamento de Água e Esgotos de Ribeirão Preto
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
- IAH – International Association of Hydrogeologists (Associação Internacional de Hidrogeólogos)
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (do Ministério do Meio Ambiente)
- IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (vinculada ao Ministério do Planejamento)
- ONU – Organização das Nações Unidas
- SBG – Sociedade Brasileira de Geologia
- SEMA – Secretaria Estadual do Meio Ambiente
- SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
- UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
- UNC – University of North Carolina
- UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
- UNESP – Universidade Estadual Paulista
- UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
- USP – Universidade de São Paulo

## **R E S U M O**

Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do Sistema Aqüífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil

A cidade de Ribeirão Preto (SP) é um pólo regional de desenvolvimento, com sua história baseada na imigração e agronegócios, destacando-se no cenário paulista como pólo universitário, hospitalar, industrial e político. Com uma população que ultrapassa 500 mil habitantes, sua demanda hídrica é 100% suprida pela captação de águas do aqüífero. O principal aqüífero sob Ribeirão Preto é o Sistema Aqüífero Guarani. Os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, que perfazem o arcabouço geológico do aqüífero, são aflorantes na porção nordeste do município, uma área de baixa densidade populacional, porém indicada pela administração pública como área de expansão urbana. O município de Ribeirão Preto representa um exemplo clássico de área urbana em desenvolvimento e seu efeito na exploração intensiva do aqüífero. Este trabalho apresenta algumas características do município, uma discussão sobre sobreexploração e problemas na gestão dos recursos hídricos subterrâneos no meio urbano e a Máxima Entropia Bayesiana como proposta metodológica para o mapeamento espaço-temporal de fenômenos naturais. No caso estudado, entretanto, os dados disponíveis (de baixa qualidade) e dificuldades com a metodologia não permitiram a formulação de um modelo preditivo satisfatório para o diagnóstico da situação e apropriada de gestão ambiental e dos recursos hídricos subterrâneos do município.

**Palavras-chave:** Águas Subterrâneas, Hidrogeologia, Sobreexploração, Geoestatística, Máxima Entropia Bayesiana

## **A B S T R A C T**

### Spatiotemporal estimation of the potentiometric surface of Guarany Aquifer System in Ribeirão Preto City (SP), Brazil

The city of Ribeirão Preto (SP) is a regional center of development, with a history based on immigration and agribusiness, standing out in the state as an academic, medical, industrial and political hub. With a population that surpasses 500,000 inhabitants, its water demands are supplied solely by groundwater extraction. The main aquifer under Ribeirão Preto is the Guarany Aquifer System. The sandstones of Pirambóia and Botucatu formations, which make up the aquifer's geological framework, crop out in the northeast portion of the municipal district. While this northeast area is of low population density, it is slated for future urban expansion area by the public administration. The municipal district of Ribeirão Preto represents a classic example urban growth and its effects on aquifer intensive exploration. This work presents some characteristics of the city, a discussion on overexploitation and problems on groundwater resource management in the urban areas, and Bayesian Maximum Entropy as methodological proposition for the space-time mapping of natural phenomena. In this case study, however, the available data (low quality) and difficulties related to the methodology did not permit the formulation of a suitable predictive model for the situation diagnose and appropriate municipal groundwater resource management plans and environmental management.

**Keywords:** Groundwater, Hydrogeology, Overexploitation, Geostatistics, Bayesian Maximum Entropy

## **R E S U M E N**

### Estimación espacio-temporal de la superficie potenciométrica del Sistema Acuífero Guarany en la ciudad de Ribeirão Preto (SP), Brasil

La ciudad de Ribeirão Preto (SP) es un polo regional de desarrollo, teniendo como base su historia en la inmigración y agro negocios, destacándose en el escenario de la provincia como polo universitario, medico, industrial y político. Con una población que ultrapasa los 500 mil habitantes, su demanda hídrica es 100% abastecida por la captación de las aguas del acuífero subterráneo. El principal acuífero bajo Ribeirão Preto es el Sistema Acuífero Guarany. Las areniscas de las formaciones Pirambóia y Botucatu, que componen la base geológica del acuífero, afloran en la porción nordeste de la municipalidad, un área de baja densidad de población, aunque indicada por la administración pública como área de expansión urbana. La ciudad de Ribeirão Preto representa un ejemplo clásico de un área urbana en crecimiento e su efecto en la exploración intensiva del acuífero. Este estudio presenta algunas de las características de la municipalidad, una discusión sobre sobreexplotación y problemas en la gestión de los recursos hídricos subterráneos en el medio urbano y la Máxima Entropía Bayesiana como propuesta metodológica para el mapeamiento espacio-temporal de fenómenos naturales. En este estudio, sin embargo, los datos disponibles (de baja calidad) y dificultades con la metodología no permitieron la formulación de un modelo predictivo satisfactorio para el diagnóstico de la situación y apropiada gestión ambiental y de los recursos hídricos subterráneos para la municipalidad.

**Palabras-llave:** Águas Subterráneas, Hidrogeología, Sobreexplotación, Geoestadística, Máxima Entropía Bayesiana

## I. INTRODUÇÃO

### 1. Justificativa

É crescente a preocupação das instituições responsáveis pela gestão dos recursos hídricos no Brasil, principalmente no tocante à proteção e uso sustentável da água, porém com maior destaque às águas superficiais que às águas subterrâneas. Quando tratam de recursos hídricos subterrâneos, o foco principal desses órgãos gestores, bem como agências e entidades governamentais, associações profissionais e de classe e organizações não-governamentais, é a qualidade e a recarga dos aquíferos, ligado muitas vezes às conseqüências do uso e ocupação do espaço e seu impacto às reservas de água subterrânea subjacente, chegando algumas vezes ao mapeamento de vulnerabilidade e risco geoambiental, mas atribuindo um papel pouco expressivo a um monitoramento adequado do nível potenciométrico, mapeamento do fluxo das águas subterrâneas e transporte de partículas, que são assuntos mais abordados em relatórios de empresas e trabalhos acadêmicos.

Para estudos sócio-ambientais aplicados as águas subterrâneas representam importante elemento a ser considerado, principalmente quando associados ao uso e ocupação do espaço e à demanda por água para abastecimento público. Nestes casos devem ser consideradas diversas variáveis hidrogeológicas: desde o mapeamento de nascentes e drenagens e a medida da profundidade da superfície potenciométrica até a localização das zonas de recarga do aquífero, identificação dos mananciais, bacias e corpos d'água de interesse para o abastecimento público (no âmbito local e regional), figurando, geralmente como zonas de descarga, fluxo das águas subterrâneas e simulações de transporte de partículas. Essas informações têm grande relevância no zoneamento geoambiental, definição de unidades de conservação e de manancial, bem como delimitação do perímetro de proteção de poços, além de subsidiar o planejamento urbano e o plano de gestão de bacias hidrográficas, bases para o Plano Diretor Municipal.

O desenvolvimento desse trabalho justifica-se pela necessidade do conhecimento da superfície potenciométrica do Aquífero Guarani em Ribeirão Preto, numa base espaço-temporal, servindo de base ao plano de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, na prevenção de contaminação da água subterrânea e rebaixamento da superfície potenciométrica.

Ribeirão Preto (SP) foi a área escolhida para estudo por apresentar, a priori, dados confiáveis de diversos poços tubulares em uma região de geologia relativamente complexa por ser borda de bacia e com aquífero com características de livre a confinado, com variações no nível d'água dada pela exploração, características hidrogeológicas e sazonalidade climática, com risco potencial à contaminação dos recursos hidrominerais subterrâneos.

A metodologia elegida para o desenvolvimento desse trabalho foi a Máxima Entropia Bayesiana, que possui um conjunto de processos de identificação do conhecimento geral e específico de uma área, a classificação dos dados disponíveis (tipo *hard* ou *soft*), fazendo uso das funções aleatórias para o mapeamento espaço-temporal da variável de interesse. A operacionalização dessa metodologia será pormenorizada mais adiante.

## **2. Objetivo**

O principal objetivo é o mapeamento espaço-temporal da superfície potenciométrica do Aquífero Guarani no município de Ribeirão Preto (SP), utilizando os dados dos poços tubulares do Departamento de Água e Esgoto de Ribeirão Preto (DAERP) por métodos geoestatísticos e discussões sobre a exploração dos recursos hídricos subterrâneos nessa cidade.

Objetivos secundários são: aplicação da metodologia de Máxima Entropia Bayesiana na cartografia hidrogeológica e caracterização da área, nos seus aspectos fisiográficos e sócio-econômicos.

## **3. Estrutura**

A primeira parte dessa monografia é esta introdução, que apresenta a justificativa, objetivos e estrutura desse trabalho. A segunda parte dessa monografia (II. Recursos Hídrico) trata de aspectos gerais da hidrogeologia, com destaque às águas subterrâneas, sua gestão e a questão da exploração intensiva e sobreexploração. Na terceira parte (III. Caracterização da Área), são apresentados os aspectos geográficos e geológicos da área, com ênfase nos recursos hídricos subterrâneos de Ribeirão Preto. Uma síntese dos métodos aplicados é feita na quarta parte (IV. Metodologia), onde é apresentada uma breve revisão sobre cartografia hidrogeológica e uma revisão mais extensa sobre métodos de estimativa por Análise de Superfícies de Tendência, Geoestatística (Krigagem e Simulação) e Máxima Entropia Bayesiana, buscando uma

abordagem mais didática que breve, bem como uma relação dos equipamentos e *softwares* utilizados na pesquisa. A aplicação da metodologia para a cidade de Ribeirão Preto e a discussão dos resultados constam da quinta parte (V. Aplicação e Discussão). A sexta parte (VI. Conclusões) possui as conclusões da pesquisa, bem como aspectos práticos do desenvolvimento do projeto e sugestões para futuras pesquisas. Por fim são apresentadas as referências citadas (VII. Referências) organizadas por tópicos e apêndices (VII. Apêndices), com a planilha de dados, anexos (VIII. Anexos) e um glossário (IX. Glossário) com termos pertinentes à compreensão desse trabalho.

Para a elaboração desta tese procurou-se seguir as normas do documento “Normas gerais para a confecção do exemplar da Dissertação de Mestrado ou Tese de Doutorado” do Programa de Pós-Graduação em Geociências (<http://www.rc.unesp.br/igce/pos/normas.pdf>), bem como as normas da NBR 6023 (Ago/2000): Informação e documentação - Referências - Elaboração; NBR 10520 (Jul/2001): Informação e documentação - Apresentação de citações em documentos; e ABNT: NBR 14724 (Jul/2001): Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação.

## II. RECURSOS HÍDRICOS

### 1. Aspectos Gerais

A água é um recurso renovável que se encontra no meio ambiente em constante movimento, através do conjunto de processos denominado ciclo hidrológico.

Por ser a água um recurso de fundamental importância para a sobrevivência dos seres vivos, o homem, como ser racional e consumidor deste recurso natural, empenha-se em estudá-lo com rigor para compreender suas peculiaridades e principalmente mensurar, com o auxílio da estatística, a sua ocorrência.

De acordo com Barth e ABRH apud Setti (1996) a água distribui-se de modo irregular, no tempo e no espaço, em função das condições geográficas, geológicas, climáticas e meteorológicas. A água, embora recurso renovável, deve então ser considerada recurso finito e de ocorrência aleatória.

Setti (1996) enfoca que as quantidades e a natureza dos constituintes presentes em águas variam, principalmente, em função da natureza do solo de onde são originárias, das condições climáticas e do grau de poluição que lhes é conferido, especialmente por lançamento de esgoto doméstico e efluentes industriais. Os aspectos de quantidade e qualidade da água são indissociáveis. Desta forma, é pertinente afirmar que os recursos hídricos devem ser abordados enfaticamente em qualquer projeto de análise e planejamento urbano-ambiental.

No entanto, antes de iniciar a abordagem dos tópicos deste trabalho, é necessário buscar uma conceituação sobre sustentabilidade<sup>1</sup>, que será abordada mais adiante. Sob o ponto de vista de uma percepção pessoal, conceitua-se aqui sustentabilidade como: o processo da escolha da alternativa de uso de recursos e meios produtivos que visa o desenvolvimento social, atendendo às necessidades vitais do ser humano, buscando implementação da sua qualidade de vida, sem ultrapassar a capacidade de suporte e resiliência do meio ambiente e sócio-econômico, com *justa* distribuição dos produtos dessa sociedade, de forma *prudente* no tocante ao desenvolvimento tecnológico, científico e social e fazendo uso do Princípio da Precaução; *ética* e *segura* quanto aos riscos associados à alternativa escolhida; *responsável* nos possíveis danos e prejuízos

---

<sup>1</sup> Neste trabalho está sendo evitado o uso do termo *desenvolvimento sustentável* por se julgar incompatível desenvolvimento, que possui um enfoque econômico/capitalista, com uma sociedade sustentável.

ainda assim decorrentes; e sem limitar a possibilidade de usufruto dos recursos pelas gerações futuras.

Um aspecto a ser destacado nos sistemas públicos de abastecimento no Brasil é o desperdício de água (perdas físicas e de faturamento), estimado em cerca de 45% do volume ofertado à população, correspondendo a 4,68 bilhões de metros cúbicos de água produzidos no Brasil por ano. Entre os problemas mais graves na gestão dos recursos hídricos está a poluição: poluição por esgotos domésticos, poluição industrial, disposição inadequada de resíduos sólidos, poluição difusa de origem agrícola, acidentes (e.g., vazamentos), eutrofização de corpos d'água, salinização de rios e açudes, poluição por mineração, falta de proteção de mananciais superficiais e subterrâneos.

Uma obra básica para temas diversos da hidrogeologia básica é "Hidrogeologia: conceitos e aplicações" (FEITOSA; MANOEL-FILHO, 1997) e Azevedo e Albuquerque (1998). Mais recente, didática e de excelente qualidade editorial é "Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo" (LÓPEZ-GETA et al., 2001), editado na Espanha. Trazendo muitos estudos de casos "Groundwater and Surface Water: a single resource" (WINTER et al., 1999) é uma valiosa obra para entender aspectos particulares da hidrogeologia e, para referências voltadas à gestão de recursos hídricos, são recomendadas Brown e outros (2000) e Leal (1998).

No Brasil os recursos hídricos são gerenciados tendo por unidade básica a bacia hidrográfica. Uma Bacia Hidrográfica ou Bacia de Drenagem é uma área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou um sistema concentrado de cursos d'água de tal modo que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída (VILLELA; MATTOS, 1975). A bacia hidrográfica é necessariamente contornada por um divisor, que é uma linha de separação que divide as precipitações que caem em bacias vizinhas e que encaminham o escoamento superficial resultante para outro sistema fluvial. O divisor segue uma linha rígida em torno da bacia, atravessando o curso d'água somente no ponto de saída. O divisor une os pontos de máxima cota altimétrica entre as bacias, o que não impede que no interior de uma bacia existam picos isolados com cota altimétrica superior a qualquer ponto do divisor. Na área de uma bacia ocorrem os seguintes fenômenos: precipitação, evaporação, transpiração, escoamento superficial, infiltração nas camadas do subsolo, escoamento subterrâneo e armazenamento (VILLELA; MATTOS, 1975).

As bacias hidrográficas possuem características físicas definidas: área, forma da bacia, tipo de drenagem efetiva e artificial, tipos de solo/rocha, formas e extensão de relevo, variação e dimensões de classes de declividade, uso e ocupação do espaço. O

gestor ambiental deve reconhecer essas características na análise ambiental para o desenvolvimento de projetos de qualquer natureza. Uma pergunta seria: Qual a relação entre a bacia hidrográfica (definida enfocando as águas superficiais) e o aquífero? A essa pergunta cabe a cada comitê gestor de bacia responder, dada as peculiaridades regionais.

O Governo Federal Brasileiro, instituindo a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento dos recursos hídricos da União, define a criação de comitês gestores para essas bacias. Somente no Estado de São Paulo já se contam 20 comitês de bacias, que recebem apoio técnico e gestão de recursos financeiros da Associação de Bacias e investimento em seus projetos de recursos advindos do FEHIDRO, da ordem de milhões de reais por ano. Além disso, já em estudo encontra-se em tramitação o Projeto de Lei nº 20 que se refere à cobrança da água como bem natural, ficando a cargo do Comitê de Bacias Hidrográficas a decisão de quando e como aplicar os recursos que lhe cabem, como orçamento participativo.

## **2. Águas Subterrâneas e Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos**

As águas subterrâneas constituem-se na maior reserva estratégica de água doce do planeta, possuindo no Brasil uma reserva estimada de 112 trilhões de metros cúbicos, com uma disponibilidade de 5.000 m<sup>3</sup>/habitante/ano (REBOUÇAS apud CETESB, 1998b).

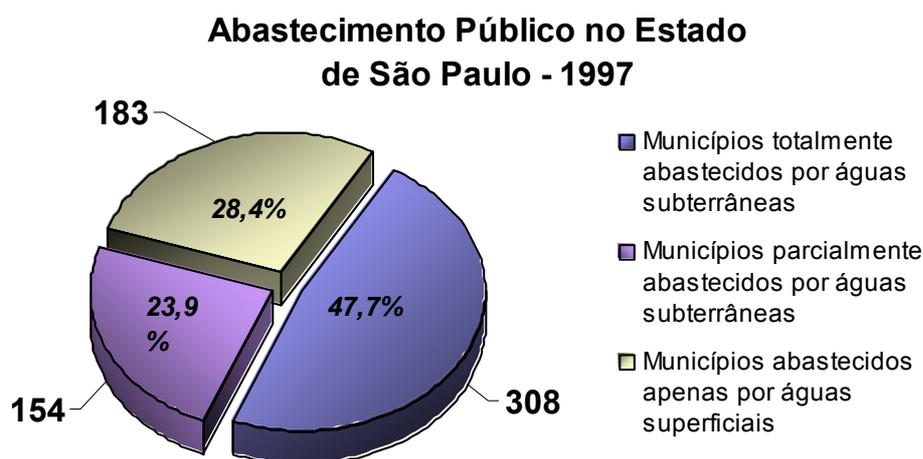
UNESCO e outros (1996) denominam de Província Hidrogeológica do Paraná, localizada no sudeste do continente sulamericano, a região correspondendo à bacia sedimentar do Paraná, com cerca de 1 milhão km<sup>2</sup> no território brasileiro, 132 mil km<sup>2</sup> no Paraguai, 96,5 mil km<sup>2</sup> no Uruguai e 66,5 mil km<sup>2</sup> na Argentina, em seu limite ocidental, onde se encontra o Sistema Aquífero Guarani.

### **2.1. Abastecimento e Saneamento Ambiental**

A água é um recurso natural de uso múltiplo, desde o abastecimento domiciliar e industrial, usos que sem dúvida mais nos chamam a atenção, até a irrigação, piscicultura/aqüicultura, transporte, turismo, industrialização e lazer. Nesse trabalho se enfatiza o uso desse bem para o abastecimento público.

Segundo DAEE (1999), 61% da população brasileira é abastecida por água subterrânea, sendo 43% por poços tubulares, 12% por fontes ou nascentes e 6% por poços escavados. O Estado de São Paulo, com 645 municípios, possui 462 (71,6%)

abastecidos por águas subterrâneas, sendo que 308 (47,7%) destes municípios são totalmente abastecidos por esse recurso (Fig. 01). Existem 223 (34,6%) dos municípios do Estado de São Paulo abastecidos totalmente pelos recursos hídricos subterrâneos e com uma população inferior a 10 mil habitantes. A exploração das águas subterrâneas do Estado de São Paulo é efetuada em 234 municípios (51%) pela SABESP e em 228 (49%) por serviços autônomos das prefeituras municipais (CETESB, 1998b).



*Fig. 01: Abastecimento público no Estado de São Paulo (CETESB, 1998b)*

Com uma população de mais de 5,525 milhões de habitantes abastecidos diariamente pelos recursos hídricos subterrâneos e um consumo médio diário de 200 litros por habitante, o volume total de água subterrânea explorado diariamente no interior paulista, somente para abastecimento público, é da ordem de 1.105.068 m<sup>3</sup>, com um total de 2.628 poços tubulares profundos.

Dentre as cidades que são abastecidas exclusivamente pelos recursos subterrâneos destacam-se Ribeirão Preto, Catanduva, Fernandópolis, Jales, Lins, Matão, Tupã, Andradina e Cajamar, além de cidades que dependem em 50% a 100% dos mananciais subterrâneos, como Lorena, Bauru, Araraquara, São Carlos e São José do Rio Preto.

Entre as vantagens comparativas que se têm em relação ao uso preferencial sobre águas superficiais destacam-se: qualidade natural, maior proteção à contaminação e quantidade assegurada ao longo do tempo, além do que o abastecimento por águas subterrâneas pode ser desenvolvido por etapas, de acordo com as demandas e recursos financeiros disponíveis (CETESB, 1998b), porém à que se considerar os aspectos de gestão desses recursos.

Entre os maiores problemas de saneamento ambiental no Brasil estão o tratamento de água e sua distribuição e a coleta e tratamento do esgoto doméstico.

Existem problemas severos de contaminação dos recursos hídricos por indústrias em geral, mas são restritos a zonas mais industrializadas e, principalmente, regiões metropolitanas.

## **2.2. Qualidade e Contaminação das Águas Subterrâneas**

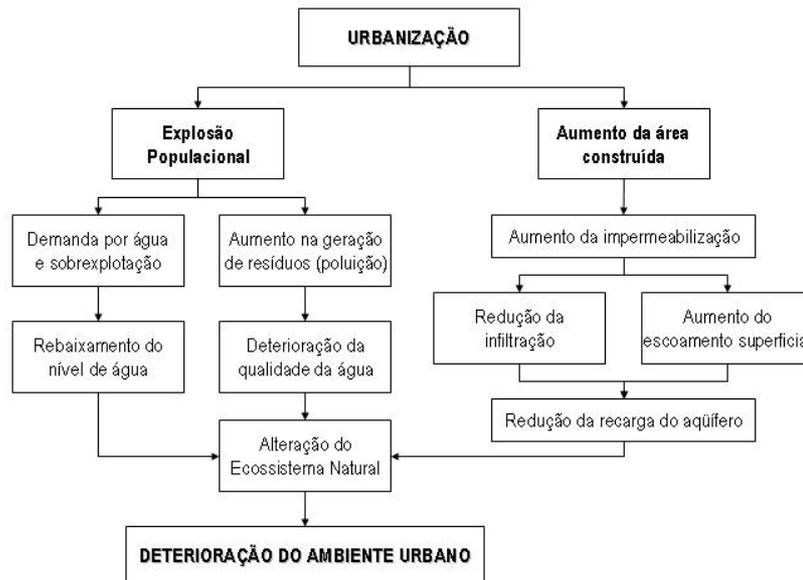
Inicialmente, por uma questão de definição, *poluição* é qualquer alteração física e/ou química e/ou biológica de um recurso natural, no caso, água. Neste trabalho adotou-se *contaminação* como o processo que ocorre quando essas alterações apresentam valores observados acima do limite crítico, indicando risco à saúde humana.

Freqüentemente nascentes, córregos, erosões (ravinas e voçorocas), minas abandonadas e outras depressões são usados para a disposição irregular de lixo doméstico, e, por vezes, até resíduos hospitalares e industriais. Essas atitudes são uma das mais graves causas de poluição e contaminação, de alto risco para a saúde pública.

Naturalmente mais protegidas que as águas superficiais, as águas subterrâneas também estão sujeitas à contaminação, principalmente por agentes biológicos, resultado direto da grande expansão das atividades antrópicas em áreas urbanas e rurais, sobretudo por “lixões”, aterros industriais, armazenamento, manuseio e descarte inadequados de produtos químicos, efluentes e resíduos, incluindo-se uso indiscriminado de agrotóxicos e fertilizantes (CETESB, 1998b).

## **2.3. Urbanização**

A água é um recurso necessário à vida, porém limitado para consumo em quase todo o mundo e que necessita de um gerenciamento adequado. O impacto negativo da urbanização no regime hídrico urbano pode ser severo e comprometer o abastecimento da população. Segundo Suresh (1999) as principais causas de problemas na gestão do recurso hídrico no meio urbano são a explosão demográfica e o aumento de áreas construídas (Fig. 02), que causam por fim a perda na qualidade de vida. O autor, no entanto, não considerou a recarga induzida por vazamentos da rede de distribuição de água tratada e coleta dos esgotos, o que minimiza o impacto negativo da redução da recarga, ainda que, muitas vezes, possa agravar problemas de contaminação dos aquíferos.



**Fig. 02:** Impacto da urbanização no Regime Hidrológico (SURESH, 1999)

A rápida expansão urbana demanda habitação, transporte, suprimento de água e fontes de energia. Alguns conceitos, discussões e casos podem ser encontrados em Legget (1973), ressaltando que a questão da água subterrânea é vital para o sucesso do planejamento urbano.

Para Suresh (1999) os impactos da urbanização podem ser minimizados pela redução da densidade populacional, alcançada pelo desenvolvimento de cidades satélites, a conservação e economia no uso da água, introdução e melhoramento de práticas de reciclagem da água, e uma adequada gestão dos recursos hídricos e resíduos sólidos e líquidos. Deve ser incentivada a participação de agências governamentais, organizações não-governamentais e cidadãos no plano de gestão, associada à penalização de agentes poluidores, o que irá motivar a uma menor geração de resíduos e a sua disposição apropriada (SURESH, 1999).

A conurbação de cidades é um processo observado em muitas regiões do Brasil, mas principalmente no Estado de São Paulo. Esse fenômeno passa pela diminuição de espaços abertos e, muitas vezes, pela drenagem e ocupação de áreas alagadas, de corpos de água ou mananciais e áreas de proteção ambiental, podendo causar a redução da recarga dos aquíferos. Essa ocupação, muitas vezes clandestina e em áreas de mais vulneráveis e de risco, geram muitos outros problemas que a municipalidade deverá enfrentar.

## **2.4. Quantidade e sobreexploração**

Além das conferências internacionais da ONU sobre 'desenvolvimento sustentável' (Estocolmo-1972, Rio-1992 e Johannesburg-2002) e o 3º Fórum Social Mundial (Porto Alegre, 2003), existem outros encontros sobre sustentabilidade e gestão de recursos hídricos que poderiam ser destacados (VILLAROYA; ALDWELL, 1998), bem como o 2º Fórum Mundial Sobre Águas (Holanda). Mais relacionados à sobreexploração de aquíferos, destacam-se o 23<sup>rd</sup> IAH Congress on Aquifer Overexploitation, realizado nas Ilhas Canárias (Espanha), em 1991, e o 23<sup>rd</sup> IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment, realizado em Nottingham (UK), 1997. Neste ano de 2003 está sendo aguardado o 3º Fórum Mundial sobre Águas a ser realizado em março no Japão e seus desdobramentos.

A questão das reservas de águas subterrâneas é extensamente discutida na literatura, bem como a flutuação do nível d'água suas causas e conseqüências.

O aumento do nível de água é um problema menos comum que o rebaixamento. Wilkinson e Brassington (1991) destacam o aumento do nível d'água como um problema mundial, tendo como principais causas origens antrópicas e naturais: *antrópicas* – 1. recuperação do nível d'água e fluxo seguindo uma redução ou interrupção da abstração da água subterrânea para abastecimento público e industrial e rebaixamento do lençol para mineração e construção civil; 2. aumento do nível d'água acima do nível natural por trabalhos de engenharia, represas e barreiras, vazamento de redes de esgoto e encanamentos e irrigação; 3. recarga artificial por bacias ou poços; e 4. ocupação humana da superfície resultando em um aumento relativo do nível d'água; e *natural* – por variações extremas do nível d'água devido à grandes precipitações e aumento de maré.

Os autores registram ainda os possíveis efeitos desse aumento do nível d'água: 1. aumento do fluxo de água de fontes e rios; 2. reaparecimento de fontes secas; 3. inundação de porões; 4. aumento de vazamentos em túneis; 5. enchentes; 6. dispersão de poluição no subsolo; 7. redução da inclinação e estabilidade de muros de retenção; 8. redução da capacidade de carga de fundações e pilares; 9. aumento de soerguimento hidrostático da fundação de estruturas; 10. aumento de tensões em fundações subterrâneas e estruturas; 11. expansão de argilas levando a elevação do terreno e recalque; e 12. ataque químico de fundações. Medidas mitigadoras a esses aumentos do nível d'água, principalmente indicadas para áreas urbanas, são: a definição de uma política de bombeamento regional, bombeamento local próximo a estruturas, fundações permeáveis e drenagem, drenagem de poços para alívio de pressão, estruturas a prova

d'água, ancoragem e lastro de fundação e canais de drenagem.

Tratando especificamente do problema de sobreexploração de aquíferos, Llamas (1992) e Margat (1992a;1992b) afirmam que é praticamente impossível uma definição exata e operacional de sobreexploração. Llamas (1992) a apresenta, no entanto, como sendo, *stricto sensu*, toda extração de água subterrânea que produza efeitos físicos, econômicos, ecológicos ou sociais, cujo balanço final é negativo à humanidade atual e de anos futuros. O conceito de sobreexploração tem significado diferente para diversos autores, muitas vezes entendida como uma exploração excessiva em relação a uma exploração julgada máxima segundo critérios definidos, sendo de certa forma uma definição análoga ao de extração segura (*safe yield*) de Meinzer (1923). No Glossário Internacional de Hidrologia (<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/HINDPT.HTM>) sobreexploração é definido como o ato de extrair a um sistema de recursos hídricos um fluxo de água que exceda o fornecimento ótimo. Para Dijon e Custódio apud Villaroya e Aldwell (1998), no entanto, exceder os limites de um recurso renovável não caracteriza necessariamente sobreexploração, assim como respeitar esses limites não implica que todos os efeitos indesejáveis sejam evitados e aproveitados os benefícios.

Essa definição, em princípio, parece consonante ao conceito de sustentabilidade, mas é difícil a identificação de efeitos nocivos ou benéficos em médio prazo. As diferentes condições climáticas, geológicas, econômicas, culturais, legais e religiosas das diversas regiões do planeta consistem em uma casuística praticamente infinita para a caracterização da sobreexploração, juntando-se a estes, fatores intrínsecos de incerteza, tais como possíveis deficiências concernentes ao conhecimento teórico e prático do fenômeno físico ou contexto social. A essas incertezas devem somar-se erros analíticos, técnicos e metodológicos, incertezas nos processos de medida das variáveis envolvidas (sistemáticas ou aleatórias), espacialização do fenômeno, suposições, hipóteses e extrapolações, além de uma aleatoriedade intrínseca ou comportamento do fenômeno, no caso, da água no subsolo. Sobreexploração é geralmente sinônimo de uma exploração ineficiente do aquífero (VILLARROYA; VILLARROYA e REBOLLO apud VILLARROYA; ALDWELL, 1998), atrelando-se assim o conceito às questões de gestão. De acordo com Custódio apud Villaroya e Aldwell (1998) a causa mais séria da exploração inadequada de um aquífero é a ignorância sobre o que acontece e a negligência em produzir os dados necessários para avaliar corretamente a situação hidrogeológica e econômica. E porque não dizer também sócio-ambiental?

A caracterização de uma sobreexploração é difícil, principalmente por não haver uma definição comumente aceita sobre esse fenômeno. Talvez a melhor discussão a

respeito de sobreexploração de aquíferos seja de Margat (1992b) e Custódio (2002). “O conceito de sobreexploração de um aquífero é ambivalente, até mesmo ambíguo, uma vez que algumas vezes é aplicado para o conceito hidráulico de exploração não-balanceada e exaustão de reservas e outras vezes para uma noção multi-critério de exploração excessiva com conseqüências indesejáveis” (Margat, 1992b).

O termo sobreexploração é utilizado aqui como sinônimo de sobreexploração, superexploração, superexploração (ou, do inglês, *over* ou *super exploitation* ou *exploration*, *overdraft*, *overabstraction*). É, porém, utilizado para descrever efeitos negativos de uma exploração de águas subterrâneas, ignorando-se os efeitos positivos correspondentes que freqüentemente passam de longe os efeitos negativos.

As perguntas que cabem aos tomadores de decisão, gestores, operadores e usuários dos recursos hídricos subterrâneos são: como podemos avaliar se um aquífero está sendo sobreexplorado ou prever se isso pode acontecer com o planejamento de uma nova exploração? De acordo com qual critério? A sobreexploração de um aquífero é sempre indesejável, devendo ser proibida e prevenida, ou seria permitida, e até mesmo vantajosa em certas condições e situações, e quais impactos devem ser antecipados e compensados? Para Margat (1992b) parece não haver um consenso nas respostas a esses questionamentos.

Os três pontos chaves para o entendimento do problema são (MARGAT, op. cit.):

(a) Definição se a sobreexploração deve ser definida como um estado de não equilíbrio ou por suas conseqüências (exploração excessiva);

(b) Plano de manejo das reservas hídricas subterrâneas e diversidade de condições hidrogeológicas possíveis; e

(c) Impactos negativos como conseqüência da exploração das águas subterrâneas.

Sobreexploração, do ponto de vista semântico, como uma exploração excessiva em relação a uma exploração julgada ser o máximo possível sobre a base de um critério definido e, desta forma, trazendo conseqüências negativas que, cedo ou tarde, serão prejudiciais aos próprios operadores ou a terceiros. Esses critérios podem ser (MARGAT, 1992b):

1. *físico/quantitativo*: interrupção do equilíbrio hidrodinâmico, que precisa ser preservado; estabelecimento de um recurso depletado;

2. *qualitativo*: degradação da qualidade de água devido a feitos da exploração;

3. *econômico*: custos da exploração excedendo o valor das vantagens que esse desenvolvimento oferece ou que se torna não competitivo em relação a outras fontes de

suprimento de água ou, de forma mais geral, todos os custos diretos (para os operadores) e “custos externos” (advindos de outros) maior que as vantagens coletivas<sup>2</sup>;

4. *social*: conflitos do uso entre diferentes categoriais de usuários desse recurso com efeitos prejudiciais sofrido por terceiros, como usuários de água superficial e subterrânea<sup>3</sup>;

5. *ambiental*: dano do ambiente natural, especialmente ecossistemas aquáticos mais sensíveis.

A avaliação de sobreexploração é, assim, relativa ao critério usado, ligado diretamente aos objetivos do plano de gestão do aquífero, podendo ser: 1. objetivos conservadores para a exploração num dado estágio da exploração do recurso, 2. dados pela busca de meios de explorar mais e mais esse recurso; ou 3. de minimização dos impactos negativos aos usuários de água superficial ou proprietários de terras sobrejacentes ao aquífero.

A preservação das condições de um aquífero explorado, num dado estágio, significa a manutenção de um regime de equilíbrio dinâmico médio, maximizando e perpetuando a média anual de produção de água (MARGAT, 1992b), porém, é necessário, no entanto, levar em conta a demografia, qualidade de vida e uso e ocupação do espaço sobre o aquífero, além dos aspectos sócio-econômicos da região. Assim, a caracterização de uma sobreexploração corresponde a uma condição de abstração superior à recarga média, i.e., o índice de exploração (abstração/recarga média) é maior que 1 (ou 100%) e, conseqüentemente, a exploração encontra-se num regime não-balanceado (ou não-equilibrado) e excessivo (Tab. 01), porém muitas incertezas estão associadas a essas medidas. Segundo Margat (1992b) a sobreexploração é diagnosticada a posteriori, baseada na observação de manifestações de manutenção prolongada de um regime de não-equilíbrio: contínua queda do nível d'água (rebaixamento da superfície potenciométrica) e possíveis conseqüências no fluxo das bordas do sistema aquífero e da qualidade da água.

---

<sup>2</sup> Esses custos externos, entretanto, são freqüentemente difíceis de avaliar ou comparar com custos monetários. Acredito que Margat (1992b) tenha considerado em “custos externos” as externalidades negativas, ressaltando aqui as ambientais, resultantes da exploração, tomando em conta a legislação ambiental, principalmente a Lei de Crimes Ambientais e sujeição de multas e outras penas ao usuário e operador.

<sup>3</sup> Podendo, inclusive, serem considerados conflitos culturais e religiosos decorrentes do uso do recurso hídrico, não abordados por Margat (1992b)

**Tab. 01: Caracterização de sobreexploração segundo regime e impacto**

		IMPACTO	
		Explotação	Excessivo
REGIME	Equilíbrio	<b>explotação adequada</b>	<b>sobreexploração?</b>
	Não Equilíbrio	<b>sobreexploração?</b>	<b>sobreexploração</b>

Fonte: modificado de Margat (1992, p.32)

Margat (1992b) ainda chama a atenção para o fato de que um regime não-balanceado, revelado pelo rebaixamento da superfície potenciométrica e, então, de diminuição das reservas, não necessariamente implica que a abstração de água seja maior que a recarga média natural do aquífero, podendo refletir somente um aumento local da abstração de água subterrânea, que é maior que a recarga natural ou efeitos de que a abstração de fluxos nas bordas do sistema aquífero não foi ainda completamente sentida.

Sabe-se, contudo, que “toda exploração de água subterrâneas começa com uma fase de não-equilíbrio” (MARGAT, 1992b, p.33), quando parte do volume da água produzida pelo poço é removida da reserva, sendo a duração dessa fase dependente da taxa de abstração (vazão), das condições de contorno e da velocidade de resposta do aquífero. Aqui cabe introduzir o conceito de resistência e resiliência, importado da Ecologia. Um dos aspectos chaves da função do ecossistema é o grau de estabilidade das propriedades desse ecossistema ou da habilidade de seus componentes e atributos resistirem a distúrbios (resistência) ou recuperarem-se deles (resiliência) (WARDLE; BONNER; BARKER, 2000).

Consideremos um aquífero teoricamente estável (ainda não explorado). Quando se inicia sua exploração e exploração de seus recursos, introduz-se uma perturbação. O sistema naturalmente busca uma nova condição de equilíbrio dinâmico. Com a instalação de novos poços e/ou uma maior abstração da água subterrânea, a “estabilidade” desse sistema é constantemente perturbada e o aquífero vai apresentar uma resposta a isso. Um aquífero resistente seria aquele que oferece grande resistência à sua exploração, dadas suas dimensões, porosidade/permeabilidade, e outras propriedades, respondendo com um rebaixamento médio pequeno, uma alta vazão específica para seus poços. A resiliência é a capacidade do aquífero retomar os níveis anteriores à perturbação, como a velocidade de recuperação do nível estático com a interrupção do bombeamento. Obviamente, muitas vezes não são atingidas as mesmas

condições iniciais, porém, um nível de equilíbrio próximo ao anterior. A avaliação da resistência e resiliência de um aquífero ficam comprometidas se não se tem uma boa medida de quanto e quando são explorados os recursos hídricos subterrâneos. Na prática podem ser definidos padrões para verificar a recuperação dos níveis e a resposta do aquífero às perturbações a ele impostas.

Estes conceitos já fazem, de certa forma, parte da avaliação hidrogeológica, porém, o conceito de 'safe yield' tem como referência a recarga, mas muitas vezes parece ser mais interessante considerar como níveis de referência um estágio anterior para servir de indicador da evolução da exploração do aquífero.

É possível observar, como medida da exploração da água subterrânea e subsidiar o plano de gestão desse aquífero, processos de rebaixamento local da sua superfície potenciométrica na área de exploração do recurso hídrico subterrâneo.

Os estudos de sobreexploração e rebaixamento podem fornecer importantes subsídios à gestão de um aquífero. Para seu desenvolvimento é necessário um estudo espacial e temporal dos níveis potenciométricos, sendo sugerido o uso de dados de piezômetros, podendo ser ainda realizado com medidas nos poços instalados e com auxílio de dados geofísicos.

A sobreexploração é associada, na literatura, com certas características físico-químicas, como rebaixamento da superfície potenciométrica, subsidência, recalque e colapso do terreno, mas a observação desses fatos não revela necessariamente uma sobreexploração.

O rebaixamento contínuo dos níveis d'água num certo período de tempo é assumido como característico de uma sobreexploração, considerado como sinal de uma extração que ultrapassa a recarga média anual do aquífero, indicando a utilização de reservas multiseculares ou exploração mineira, como se tratando de um recurso não renovável. A cidade de Aguascalientes (México), que guarda muitas semelhanças com Ribeirão Preto, desde o número de habitantes e poços até a demanda, usos e algumas características do aquífero, tem severos problemas com a depleção do aquífero e chega a apresentar uma taxa de rebaixamento de mais de 3 m/ano (LARA; ORTIZ, 1999). Pela depleção e contaminação dos aquíferos, algumas cidades como Bangalore (Índia) já captam água para abastecimento de um rio a 100 km de distância (SURESH, 1999).

Porém, é necessário lembrar ainda que podem ocorrer fenômenos (endógenos ou exógenos) ainda pouco conhecidos ou que tenham periodicidade maior que o da história humana, como o *El Niño* ou outros, que poderiam não ser identificados ou ter ciclos de larga escala (não sendo observado pelo homem) e causando um rebaixamento

progressivo e não estar relacionado a uma sobreexploração. A sobreexploração pode causar o adensamento do solo, que leva a subsidências e recalques, i.e., movimentos descendentes verticais da superfície do terreno, sendo os movimentos horizontais desprezíveis. Esse movimento vertical pode ser da ordem de dezenas de centímetros ou alguns metros e com um raio de influência de até centenas de metros (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

No mundo são descritos alguns problemas relacionados à sobreexploração, principalmente causando subsidência, como na Cidade do México, Berlim, Milão, Veneza, Londres e várias cidades estadunidenses (MARGAT, 1992b). No Brasil citam-se casos de alta concentração de poços em pequenas áreas como as regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas e o município de Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo, reflexo de certo déficit hídrico pela alta densidade demográfica. Existem ainda diversos pontos e áreas no estado com risco potencial à contaminação urbana, agrícola e industrial, além de problemas de subsidência e colapso do solo em cavidades cársticas.

São inúmeros os problemas advindos do que seria a sobreexploração de aquíferos, muitos listados por Margat (1992b): 1. rebaixamento progressivo do nível d'água nos poços e região, gerando conflito entre operadores e usuários (CERÓN-GARCIA, 1997) ou flutuações devidas às mudanças na recarga e/ou exploração (CUSTÓDIO, 1992); 2. diminuição de produção dos poços e aumento de custos; 3. rebaixamento local causando colmatação das margens de rios e interrupção da conexão hidráulica com a água superficial; 4. Aumento da zona não saturada do solo, principalmente em regiões de clima semi-árido, inclusive diminuindo a capacidade de campo e trazendo prejuízos para o solo e vegetação natural e cultivada; 5. deterioração da qualidade da água, principalmente em aquíferos costeiros; 6. subsidência e recalque da superfície do terreno, diminuição na capacidade de armazenamento do aquífero e conflitos sociais pelos problemas geotécnicos decorrentes (OLIVEIRA; BRITO, 1998; 7. colapso do terreno (SUÁREZ; REGUEIRO, 1997); 8. redução da vazão de fontes naturais e diminuição do nível de base de rios conectados ao aquífero e danos ao ecossistema aquático, bem como redução de superfícies de áreas pantanosas (CUSTÓDIO, 1992); e 9. conflitos quando o rebaixamento da superfície potenciométrica traz benefícios externos (MARGAT, 1992b), tal como para o desenvolvimento mineiro, construção civil e diminuição de inundações.

Custódio (1992) ressalta diversos desses resultados indesejáveis promovidos pela sobreexploração, segundo o ponto de vista técnico/hidrogeológico, geotécnico,

energético, de qualidade de água, econômico, legal, social e ambiental.

Dentre os benefícios advindos da sobreexploração estão (LLAMAS, 1992; CUSTÓDIO, 1992): 1. possibilidade do uso extensivo na irrigação de áreas agrícolas para produção de alimentos (como em muitos países em via de desenvolvimento como Índia, China e México; e desenvolvidos como EE.UU., Rússia, Japão, Itália e França); 2. provisão de água potável para grandes aglomerados urbanos (como Lima, Cidade do México e Shangai); 3. recuperação de solos salinos ou alagadiços em áreas de drenagem superficial inadequada (tal como em Punjab na Índia e nas planícies do nordeste da China); 4. obtenção de água próximo de onde ela é necessitada; e 5. redução de enchentes. Outro reflexo benéfico da sobreexploração está no rebaixamento do nível d'água para exploração de minas (a céu aberto ou subterrânea) e construção de fundação de grandes obras, mas que também podem causar a depleção dos aquíferos (cf. LEADBEATER et al., 1999).

Os benefícios gerados pela exploração das águas subterrâneas são geralmente superiores aos possíveis prejuízos, havendo mesmo ações preventivas, mitigadoras e corretivas para esses prejuízos, porém, para uma adequada gestão desses recursos, é necessário conhecimento suficiente do funcionamento do sistema aquífero, algo raramente disponível. São raros os casos de benefícios bem documentados do ponto de vista econômico, sociológico ou ambiental pela sobreexploração de águas subterrâneas, mas são comuns casos concernentes a problemas de subsidência (e.g., Cidade do México, Houston, Veneza, Bangkok etc.), bem como problemas relativos à deterioração da qualidade de água em zonas costeiras. No Brasil o cenário é semelhante, sendo famoso o caso do colapso do terreno cárstico de Cajamar (SP) e intrusões salinas em diversas cidades do litoral norte paulista.

Margat (1992b) cita as características que tornam os aquíferos mais vulneráveis à sobreexploração (listagem com modificações):

- ✓ aquíferos pouco espessos onde rebaixamentos substanciais reduzem a produtividade ou aquíferos estratificados com uma camada permeável que pode ser drenada;
- ✓ aquíferos com alta produtividade, onde a água subterrânea pode ser facilmente obtida por muitos operadores e usuários, resultando em uma abstração acumulada que facilmente excede a recarga média;
- ✓ aquíferos recarregados por cursos d'água, cuja conectividade pode deixar de existir por um substancial rebaixamento;
- ✓ aquíferos com importantes restrições na conservação da vazão de áreas

de descarga (fontes e drenagens);

- ✓ aquíferos com interface de água doce/salgada (em zonas costeiras) ou com grande amplitude de qualidade de água;
- ✓ aquíferos sedimentares inconsolidados em solo compactável, onde o rebaixamento pode causar significativa subsidência;
- ✓ aquíferos cársticos que são extremamente vulneráveis à contaminação e colapso do terreno;
- ✓ aquíferos fissurais, principalmente em áreas sujeitas a sismos naturais ou induzidos; e
- ✓ qualquer aquífero sob região metropolitana que não possua um plano de gestão dos recursos hídricos adequado.

Um outro fato relacionado à extração de águas subterrâneas é o sentimento de propriedade privada dos usuários pela água, levando alguns países à criação de leis rígidas inviabilizando sua aplicação. Em países menos desenvolvidos e/ou menos democráticos há o risco do mito da sobreexploração, pelo efeito inverso do que Margat chama de “subexploração malthusiana” (MARGAT apud LLAMAS, 1992).

Na Espanha 70% das águas subterrâneas é utilizada para irrigação e o país tem uma das taxas mais baixas do mundo comparado a outros países semi-áridos de condições semelhantes, reflexo este de uma mentalidade “hidroesquizofrênica” (sic) afinada totalmente com a separação da gestão de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (LLAMAS, 1992).

A Lei de Águas da Espanha, vigente desde 1866, considerava praticamente todas as águas subterrâneas como de domínio privado. A nova Lei de Águas, aprovada em 1985, estende ao domínio público as águas superficiais e subterrâneas, sendo necessária uma concessão administrativa para sua captação. Esta nova lei talvez seja a primeira lei que considera o conceito de sobreexploração de um ponto de vista jurídico, tratado essencialmente no artigo 54.1, que diz: “O organismo de bacia competente, ouvido o Conselho de Águas, poderá declarar que os recursos hidráulicos subterrâneos de uma zona estejam sobreexplorados ou em risco de estar, devendo por sua vez impor uma ordenação de todas as extrações para lograr sua exploração mais racional e proceder a correspondente revisão do Plano Hidrológico” (Lei 29/1985, de 02 de agosto de 1985). Os dispositivos regulamentares estão nos artigos 171 e 184.1d do “Regulamento do domínio público hidráulico” (aprovada em 1986) e artigo 84.2 do “Regulamento da Administração pública sobre a Água e a Planificação Hidrológica” (aprovada em 1988). Para maiores detalhes sobre

Segundo dados de Llamas (1992) fornecidos pela administração espanhola existem 75 unidades hidrogeológicas com problemas, divididas em 3 grupos: um primeiro grupo com 45 unidades nas quais o bombeamento ultrapassa a recarga; um segundo grupo de 17 aquíferos com bombeamento entre 80 a 100% da recarga; e um terceiro grupo com problemas locais não especificados. Na Espanha existe somente um aquífero *legalmente superexplorado*, dito como *definitivamente* declarado superexplorado; é o aquífero de “Campos de Montiel”, na porção central da Espanha. Além desse, existiam, em 1991, uma dúzia de outros aquíferos declarados como *provisoriamente superexplorados* ou em *risco de sobreexploração* pela Agência de Bacias, subordinada ao Ministério de Trabalhos Públicos (LÓPEZ-CAMACHO; ANGUITA, 1991; LLAMAS, 1992). O Aquífero Campos de Montiel foi declarado provisoriamente superexplorado em 1988 e definitivamente superexplorado em 1989, dado impacto causado sobre certos ecossistemas.

Algumas alternativas para mitigar ou eliminar o rebaixamento progressivo do nível do aquíferos já existem, tais como a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, através de instrumentos como a *outorga de concessões de exploração* e a *recarga artificial* de aquíferos (MURILLO-DÍAZ et al., 1999), ou mesmo *realocação de poços*, o que pode ser bastante caro (LARA; ORTIZ, 1999), e *cobrança pelo uso da água* (RAMNARONG, 1999).

Llamas apud Villaroya e Aldwell (1998) destaca ainda a grande importância da *educação ambiental* na implantação de um plano de gestão dos recursos hídricos, que deve envolver três princípios básicos: solidariedade, subsídio e participação. A solidariedade deve ser estabelecida entre a geração presente e futura, quando deve se ter um uso sustentável do recurso. O subsídio advém da transferência de recursos e tecnologias essenciais entre países, sem visar a um lucro excessivo. Por último, a efetiva participação da sociedade e demais atores, que deve motivar responsabilidade pela gestão da água e encorajar para maiores esforços, devendo envolver associações de usuários, associações científicas e profissionais, organizações não-governamentais etc.

Uma experiência de sucesso na gestão dos recursos hídricos subterrâneos foi conseguida em Bangkok (Tailândia), com o uso de diversos instrumentos, através de medidas corretivas para a mitigação da crise de água subterrânea e subsidência do terreno (RAMNARONG, 1999).

A gestão dos recursos hídricos subterrâneos já é quase que um tema a parte da hidrogeologia, justamente por ter de gerir não só as águas subterrâneas do ponto de

vista técnico-científico, mas todos os recursos sócio-ambientais, quais sejam: recursos humanos (aspectos sócio-culturais, religiosos e legais), recursos econômicos (aspectos financeiros e mercadológicos), recursos energéticos e tecnológicos e recursos naturais (físicos - rocha, solo, ar e água; biológicos - fauna, flora).

Abordando uma das facetas do gerenciamento desses recursos, Margat (1992b) identifica, de acordo com estratégias de exploração, três métodos de gestão das reservas de um aquífero:

1. Estratégia de máxima e duradoura exploração dos recursos renováveis, sob um regime de equilíbrio dinâmico, com abstração média  $\leq$  recarga média, sem levar em conta flutuações sazonais e mesmo possíveis variações anuais (mais exploração no período de estiagem). Então, após um período de descenso do nível d'água numa fase inicial de não-equilíbrio, a reserva estabilizada é usada, usualmente, como fator regulador, sob a restrição de preservar uma taxa de fluxo mínima nas áreas de descarga do aquífero (fontes, rios) ou para preservar o equilíbrio de água doce/salgada em aquíferos costeiros. Esta estratégia é apropriada para aquíferos livres de pequena a média capacidade e de limite espessura, com alta taxa de recarga e aquíferos confinados próximos à zona de recarga, i.e., casos onde as restrições limitam o possível rebaixamento.

2. Estratégia de repetida exploração do armazenamento num regime prolongadamente não-balanceado, que pode ser dirigido ou não intencional numa fase inicial, e na qual a abstração (aumentando ou estabilizada) é maior que a recarga. A segunda fase envolve uma redução da exploração para restaurar o equilíbrio. Pode ser limitado por restrições externas ou redução na produtividade dos poços (rebaixamento excessivo ou limitado pela base do aquífero). É mais apropriada para aquíferos livres ou semi-confinados com alta capacidade e pequena a média taxa de recarga, sem apreciáveis restrições pela conservação dos níveis d'água, e.g., aquíferos desconectados de cursos d'água.

3. Estratégia de mineração ou exploração até a exaustão do aquífero, com abstração alta e muito superior à recarga. Nesse caso a depleção da reserva provê a maioria da água produzida e a exploração é, em longo prazo, mais ou menos limitada quando o rebaixamento torna-se excessivo sem retomar o equilíbrio. A recuperação da reserva nesse caso por ser muito lenta ou mesmo impedida por uma degradação excessiva da capacidade de armazenamento do reservatório devido à subsidência. É a única estratégia possível para aquíferos com alta capacidade e com recarga muito baixa.

O problema todo desse questionamento é como identificar se um aquífero está ou

não sendo sobrexplotado. Essa qualificação é resultante de uma percepção de alguns resultados indesejáveis, que varia de acordo com o ponto de vista e do grupo social que emite esse parecer. Não há certeza de um sinal de alarme sobre o que está acontecendo com o aquífero (CUSTÓDIO, 2002).

Como ressaltado por Custódio (2002), e já supracitados, sinais de fácil identificação são: rebaixamento contínuo do nível d'água, diminuição da vazão de fontes e progressiva deterioração da qualidade da água, ainda que outras causas possam resultar nesses mesmos resultados. Outras mudanças como diminuição da vazão de um rio, redução de área alagada, migração de água subterrânea de baixa qualidade e subsidência de terreno geralmente ocorrem num ritmo muito lento, necessitando de um monitoramento contínuo e uma série histórica para sua correta avaliação e redução do efeito da variabilidade que falsearia essa tendência (CUSTÓDIO, 2002).

Para Custódio (2002), declarar um aquífero sobrexplotado com confiança exige profundo conhecimento do aquífero, o que é difícil quando se trata do maior aquífero do mundo. O conhecimento necessário para declarar sobrexplotado um aquífero deve passar por um modelo conceitual realístico, baseado em uma larga base de monitoramento espacial e temporal, freqüentemente suportada por cálculos de fluxo e transporte de massa e modelagem numérica.

Neste trabalho não é assumida nenhuma definição de sobrexplotação, pois é necessário que esse conceito seja delimitado pelos atores envolvidos na gestão dos recursos hídricos da bacia sobrejacente. Os limites dessa delimitação devem ser decididos de forma participativa, inclusiva e ter ponderado os critérios técnico-científicos, culturais, sócio-econômicos e ambientais, principalmente por envolver aspectos normativos e jurídicos que podem comprometer seriamente o desenvolvimento regional.

### **3. Legislação para Recursos Hídricos Subterrâneos**

É vasta a legislação de recursos hídricos no Brasil, envolvendo desde a classificação das águas, política de gestão dos recursos hídricos, saneamento e energia. Essa legislação é bastante atualizada e está sendo, a pouco e pouco, implantada e cumprida. Alguns dos aspectos legais de recursos hídricos são bastante discutidos por Machado (2002) e, com enfoque especificamente em recursos hídricos subterrâneos, por Freire e outros (1998).

A inserção da água subterrânea, que é um recurso invisível por achar-se no subsolo, no sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos é, conforme

Rebouças (2002), um desafio à sociedade, inclusive sob o ponto de vista técnico.

Um grande impulso no sentido de uma correta gestão dos recursos hídricos é devido à Lei Federal nº 9.433/97, sancionada em 08 de janeiro de 1997, instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos e criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Ela cria um sistema de gestão de recursos hídricos e define competências para agências e comitês de bacias, esboçada no modelo francês, mas não ainda consolidado e ineficientemente fiscalizado, nem sempre gerindo parcimoniosamente todos os fatores econômico-financeiros, políticos, sócio-culturais, legais e ambientais. Talvez essa ineficácia seja dada por uma carência de cotas de orçamento adequadas para investimentos, um levantamento nacional sistemático, um sistema de outorga eficiente e recursos humanos tecnicamente qualificados.

Abaixo são apresentadas tabelas com a compilação das leis federais (Tab. 02) e paulistas (Tab. 03) sobre recursos hídricos e afins.

**Tab. 02:** Legislação Federal para Recursos Hídricos e afins

Lei/Decreto	Data	Assunto
Constituição Federal	05/out/1998	Artigos 20 a 24, 26, 30, 46, 49, 68, 200, 231
Lei 6.938	31/ago/1981	Política Nacional do Meio Ambiente
Lei 7.754	14/abr/1989	Proteção das florestas em mananciais
Lei 7.990	28/dez/1989	Compensação financeira das energéticas
Lei 8.001	13/mar/1990	Política Nacional e Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
Lei 9.433	08/jan/1997	Crimes Ambientais
Lei 9.605	12/fev/1998	Código das Águas
Decreto 24.643	10/jul/1934	Institui comitê para integração da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul - CEIVAP
Decreto 1.842	22/mar/1996	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
Decreto 2.612	03/jun/1998	Qualidade da Água
Resolução CONAMA 20	1986	Saneamento Básico – José Serra
PL Senado 266	1996	Saneamento Básico – Lima Neto
PL 3.525	1997	Outorga e Cobrança pelo uso da água
Minuta de Decreto	jun/1998	Sistema Nacional de Informações
Minuta de Decreto	jun/1998	Comitês de Bacias Hidrográficas
Minuta de Decreto	jun/1998	

Fonte: modificado da compilação do site <http://www.geocities.com/CapitolHill/Senate/6505/>

**Tab. 03:** Legislação Estadual (São Paulo) para Recursos Hídricos e afins

Lei/Decreto	Data	Assunto
Constituição do Estado	05/out/1989	Seção II – Dos Recursos Hídricos
Decreto Lei Compl. 7	06/nov/1969	Entidades descentralizadas do Estado
Lei Complementar 837	20/dez/1997	Excepciona Agências de Bacias do DCL 7/69
Lei 898	18/dez/1975	Lei de Proteção de Mananciais
Lei 997	31/mai/1976	Leis 1.172/76 e 3.286/82
		Controle da Poluição do Meio Ambiente

Lei 1.563		Leis 2.090 e 2.446
Lei 6.134	02/jun/1988	Preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo
Lei 7.663	30/dez/1991	Política Estadual e Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos
Lei 7.750	31/mar/1992	Política Estadual de Saneamento
Lei 7.964	16/jul/1992	FEAP – 30% da compensação das energéticas
Lei 8.275	29/mar/1993	Cria a Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras
Lei 9.866	28/nov/1997	Diretrizes e normas para a proteção e recuperação das bacias hidrográficas dos mananciais de interesse regional do Estado
Lei 10.020 (PL 710/96)	03/jul/1998	Autoriza o poder executivo a participar das Agências de Bacias do Estado de São Paulo
Decreto 8.468	08/set/1976	Regulamenta a Lei 997/76, Controle de Poluição Dec. 11.720, 12.045, 15.425, 12.266, 17.299, 18.386, 22.032, 23.128, 27.399, 28.313
Decreto 9.714	19/abr/1977	Regulamenta as leis 898/75 e 1.172/76
Decreto 10.755	22/nov/1977	Enquadramento dos corpos d'água receptores do Decreto 868/76. Dec. 24.839/86
Decreto 27.576	11/nov/1987	Criação do Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CRH. Modificada pelo decreto 36.787/93.
Decreto 28.489	09/jun/1988	Considera como Modelo Básico a Bacia do Rio Piracicaba
Decreto 32.954	07/fev/1991	Aprova o 1º Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH
Decreto 32.955	07/fev/1991	Regulamenta a Lei 6.134/88 de Água Subterrânea Adapta o Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CRH e o Comitê Coordenador do PERH – CORHI criados pelo Decreto 27.576/87 às disposições da lei 7.663/91. Alterações: 38.455/94, 39.742/94, 43.265/98
Decreto 36.787	18/mai/1993	Regulamenta o fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO, criado pela lei 7.663/91. Alteração: 43.204.98
Decreto 40.815	07/mai/1996	Normas para indicação dos representantes do Estado no comitê para integração da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul – CEIVAP
Decreto 41.258	31/out/1996	Outorga e Fiscalização
Decreto 41.679	31/mar/1997	Composição e funcionamento do Conselho Estadual de Saneamento – CONESAN
Decreto 43.022	07/abr/1997	Regulamenta Plano Emergencial de Recuperação de Mananciais da RMSP, da Lei 9.866/97
Decreto 43.594	27/out/1998	Inclui dispositivo no Dec. 8.468/76. Regulamenta lançamento de esgotos tratados em rios de classe 1
Portaria DAEE 717/96	12/dez/1996	Portaria sobre outorga de uso da água
Portaria DAEE 1/98	03/jan/1998	Fiscalização de uso da água
Projeto de Lei 05	03/fev/1996	Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH
Projeto de Lei 20 (com 20 emendas e 2 substituições)	06/fev/1998	Projeto de lei sobre a cobrança pelo uso da água do domínio do Estado de São Paulo

Fonte: modificado da compilação do site <http://www.geocities.com/CapitolHill/Senate/6505/>

Muitas unidades da federação já possuem definidas sua Política Estadual de Recursos Hídricos e Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos, mencionando a proteção de área de recarga dos aquíferos e algumas a sobreexploração:

Minas Gerais – Lei nº 11.504, de 20 de junho de 1994 e Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999; Distrito Federal – Lei nº 512, de 28 de julho de 1993; Santa Catarina – Lei nº 9.748, de 30 de novembro de 1994; Rio de Janeiro – Lei nº 3.239, de 02 de agosto de 1999.

A legislação específica para recursos hídricos subterrâneos no Brasil ainda é muito restrita, e normalmente contempla somente a qualidade da água e não sua quantidade. A seguir são destacados os acordos, tratados e legislações que envolvem mais especificamente os recursos hídricos subterrâneos.

No âmbito internacional a **Conferência Rio 92** (UNCED – *United Nations Conference on Environment and Development*), promovida pela ONU, na cidade do Rio de Janeiro, no seu documento conhecido por AGENDA 21 declara no seu Capítulo 18 (Proteção da qualidade e do suprimento de água doce: aplicação de abordagens integradas para o desenvolvimento, gerenciamento e uso de recursos hídricos), a necessidade pela manutenção da qualidade de água como recurso natural indispensável para todos os aspectos da vida, ressaltando, destacando a demanda por informação em água subterrânea e qualidade de água (item 18.23 e 18.39f) e a gestão integrada (item 18.24b), afirmando que a proteção de água subterrânea é elemento essencial para a gestão de recursos hídricos (item 18.37).

É sugerida na Agenda 21 a implementação de algumas atividades para a proteção de águas subterrâneas (item 18.40d, <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21text.htm>):

- ✓ desenvolvimento de práticas agrícolas que não degradem as águas subterrâneas;
- ✓ aplicação de medidas necessárias para mitigar a intrusão salina nos aquíferos de pequenas ilhas e planícies costeiras como consequência do aumento do nível do mar ou sobreexploração de aquíferos costeiros;
- ✓ prevenção de poluição de aquíferos através da regulação de substâncias tóxicas que infiltram pelo subsolo e estabelecimento de zonas de proteção de áreas de recarga e abstração de águas subterrâneas;
- ✓ elaboração e gestão de aterros sanitários baseados em informação hidrogeológica e avaliação de impacto, usando as tecnologias mais viáveis e disponíveis;
- ✓ promoção de medidas para melhorar segurança e integridade de áreas de poços e boca de poços para reduzir a contaminação por agentes biológicos patogênicos e substâncias químicas perigosas nos aquíferos em zonas com exploração de água subterrânea; e
- ✓ monitoramento da qualidade de água, quando necessário, superficial e subterrânea

potencialmente afetada por áreas de armazenamento de materiais tóxicos e perigosos.

A Agenda 21 prevê a gestão dos recursos hídricos subterrâneas, mas aponta para problemas de sobreexploração em áreas sobre aquíferos costeiros.

Nas “Ações Prioritárias” da Agenda 21 Brasileira (<http://www.mma.gov.br/>, link Agenda 21, publicada em 16 de julho de 2002) o tema de águas subterrâneas é tratado superficialmente nos seguintes itens:

*Objetivo 9* – universalizar o saneamento ambiental protegendo o ambiente e a saúde

*Objetivo 12* – promoção da agricultura sustentável

*Objetivo 15* – preservar a quantidade e melhorar a qualidade da água nas bacias hidrográficas

Nestes itens a água subterrânea é contemplada somente do ponto de vista de alvo de contaminação agrícola e por disposição de resíduos sólidos. Em nenhum momento é tratada pelo documento como fonte de água para abastecimento público ou mesmo irrigação. Infelizmente nossa Agenda 21 é negligente nesse ponto, não tratando este tema como prioridade, sendo que centenas de cidades brasileiras de médio e grande porte já são 100% dependentes desse recurso para abastecimento público. O documento esquece-se que a gestão dos recursos hídricos precisa se preocupar com a sobreexploração de aquíferos, além de levar em conta a contaminação pelo lançamento de esgoto nos corpos d’água que podem estar recarregando aquíferos, principalmente na estiagem.

Como documento subsidiário para a elaboração da Agenda 21 Brasileira, a publicação de “Gestão dos Recursos Naturais” ressalta a importância das águas subterrâneas para abastecimento de núcleos urbanos, de forma exclusiva ou complementar. Nesse documento pode-se destacar a Estratégia 4 sobre controle da qualidade ambiental, principalmente no seu item 4.7. *Proteção dos Mananciais Superficiais e Subterrâneos* e item 4.8. *Conservação dos Recursos Hídricos com vistas aos aumento da Disponibilidade de Água*, que trata da relação entre bacias hidrográficas e áreas de aquíferos e objetivo de prevenir a escassez de água nos mananciais.

A **Constituição da República Federativa do Brasil**, de 1988, diz no seu Capítulo VI (Do Meio Ambiente), Artigo 225: “*todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras.*”. Como está claro nesse artigo da nossa Constituição

Federal, a preservação do meio ambiente é de responsabilidade do Poder Público e da coletividade (i.e., a população, a comunidade); é expresso então o dever de cada um na construção desse meio ambiente que seja ecologicamente equilibrado... e meio ambiente não é somente o meio biológico (flora e fauna), mas também os meios físico e antrópico (sócio-econômico e cultural). Isso envolve as questões de avaliação das relações custo-benefício.

Nesses termos cabe aos estados, municípios e órgãos responsáveis (como o ANA, IBAMA, CONAMA, DNAEE e outros) a definição de normas, padrões de qualidade, procedimentos, investigação e documentação necessários para a outorga de licença/concessão para a exploração dos recursos hídricos na sua área de ação.

São inúmeros os dispositivos da legislação ordinária que se referem aos recursos hídricos, sua classificação, padrões de qualidade e questões sobre a poluição das águas.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) possui diversas resoluções visando à manutenção e implementação da qualidade ambiental.

A **Resolução CONAMA nº 020, de 18 de junho de 1986**, estabelece uma classificação das águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional, como instrumento de avaliação da evolução da qualidade das águas, com vistas ao seu uso, através de parâmetros e indicadores específicos. Para águas subterrâneas não contaminadas, a qualidade da água doce insere-se geralmente na *Classe Especial*, destinada ao abastecimento doméstico, sem prévia ou com simples desinfecção ou à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e à *Classe 1*, destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento simplificado, proteção de comunidades aquáticas, recreação de contato primário; irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; ou criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

Por águas doces entendem-se águas com salinidade inferior a 50‰. Para cada classe a resolução supracitada define os limites e/ou condições para seu enquadramento, baseados na presença/ausência e quantidade e qualidade em: materiais flutuantes (inclusive espumas não naturais), óleos e graxas, substâncias que denunciam odor ou sabor, corantes artificiais, substâncias que formam depósitos objetáveis, coliformes, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), OD (Oxigênio Dissolvido), turbidez, cor, pH e outras substâncias químicas potencialmente prejudiciais. A resolução dispõe ainda sobre outras medidas que dizem respeito à poluição industrial,

balneabilidade e métodos de coleta e análise de águas.

Segundo a **Resolução CONAMA nº 005, de 15 de junho de 1988**, estão sujeitas a licenciamento as obras de abastecimento de água, sistemas de esgotos sanitários, sistemas de drenagem e sistemas de limpeza urbana.

A **Resolução CONAMA nº 007, de 17 de outubro de 1990**, resolve reformular a distribuição de suas Câmaras Técnicas, que vigoram com a seguinte composição: I. Recursos Hídricos; II. Poluição Industrial; III. Agrotóxicos; IV. Mineração; V. Flora e Fauna; VI. Assuntos Jurídicos; VII. Saneamento Básico; VIII. Zoneamento Ambiental; IX. Energia Nuclear e Rejeitos Radioativos; e X. Carvão Vegetal, considerando a necessidade premente de sistematização da avaliação e adequada manutenção da qualidade de recursos hídricos e outros fatores.

Além de todos esses dispositivos ainda tem-se:

A **Lei Federal nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997**, que instituindo a Política Nacional de Recursos Hídricos, incorpora a mudança de dominialidade das águas subterrâneas e mantém tratamento diferenciado para “águas minerais”. Quanto à gestão de águas subterrâneas recomenda o uso dos mecanismos de outorga de concessões de exploração como principais instrumentos de gestão. Apresenta significativas contribuições relativas aos aspectos de poluição e superexploração de aquíferos, proibindo a poluição das águas subterrâneas, prevendo o monitoramento de aterros sanitários e estudos de vulnerabilidade de aquíferos. No campo de normatização, toda e qualquer obra de captação de água subterrânea é considerada uma obra de engenharia, para a qual se exige habilitação legal nas diferentes etapas da pesquisa, projeto e exploração.

**Lei Federal nº 9.605, de 12 de Fevereiro de 1998**, que trata de crimes ambientais prevê como crime ambiental de poluição hídrica qualificada (art. 54, §2º, III), qualquer “poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade”, não havendo necessidade de que a poluição tenha causado danos à saúde humana (cf. MACHADO, 2002, p.670). A sobreexploração pode ser considerada crime ambiental no momento em que se constate que o abastecimento tenha sido suspenso.

O **Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)** estabeleceu as diretrizes complementares para a elaboração dos planos de recursos hídricos de bacias hidrográficas, baseados na Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002, requerendo a caracterização dos aquíferos e definição das inter-relações dos cursos d’água superficiais com o aquífero subjacente, que pode dar-se de várias formas, buscando a

gestão integrada dos recursos hídricos.

O Programa de Água Subterrânea para a região Nordeste do Brasil (1996-1999) (<http://www.abasce.org.br/P-ASub-NE.html>) tem dois subprogramas que envolvem a questão de superexploração: IV - Subprograma Bacias Costeiras; e VI - Subprograma Projetos Específicos. Este último contempla a avaliação e desenvolvimento de modelos para acompanhar os aquíferos onde ocorre a superexploração.

No âmbito estadual, a Lei Estadual 7.663/91, que estabeleceu a Política Estadual de Recursos Hídricos, e o Decreto 32.955/91, que regulamenta a Lei Estadual 6.134/88 e dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo e assegura que as águas subterrâneas terão programa permanente de conservação e proteção, visando ao seu melhor aproveitamento, são os dois mais importantes instrumentos jurídicos para a gestão de recursos hídricos subterrâneos no estado.

**A Constituição do Estado de São Paulo, de 05 de outubro de 1989**, no artigo 193 da Seção I (Do Meio Ambiente) do seu Capítulo IV (Do Meio Ambiente, dos recursos Naturais e do Saneamento) estabelece as bases para a criação de um sistema de administração da qualidade ambiental, proteção, controle e desenvolvimento do meio ambiente e uso adequado dos recursos naturais. Nessa seção é destacada a relevância e a necessidade de um planejamento e zoneamento ambiental como instrumento auxiliar na tomada de decisões pelo Poder Público. Também são expostos os alicerces para a criação e gerência de consórcios entre os municípios, como os Comitês de Bacias, onde há a participação direta da coletividade, no caso o já criado Comitê da Bacia Hidrográfica Moji-Pardo. Para o artigo 206 (Seção II - Dos Recursos Hídricos) “as águas subterrâneas, reservas estratégicas para o desenvolvimento econômico-social e valiosas para o suprimento de água às populações, deverão ter programa permanente de conservação e proteção contra poluição e superexploração, com diretrizes em lei”, mencionando claramente o problema de sobreexploração.

**Lei Estadual nº 7.663, de 30 de Dezembro de 1991**, estabeleceu as diretrizes e instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Integrado de Gerenciamento de Águas Superficiais e Subterrâneas, fazendo menção sobre o abastecimento de água para a população e sobreexploração dos recursos hídricos subterrâneos (art. 4º, incisos I e IV).

O **Decreto Estadual nº 8.468, de 08 de Setembro de 1976**, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente, e a **Lei Estadual nº 9.034, de 27 de Dezembro de 1994**, que estabelece as Unidades de Gerenciamento de recursos

Hídricos (UGRHI's) e os Programas de Duração Continuada (PDC), não mencionam problemas relacionados à sobreexploração.

Desta forma, por esses recursos legais, o Estado busca gerenciar os recursos hídricos subterrâneos, considerando o desenvolvimento de projetos locais e priorizando ações de fiscalização de poços e áreas de proteção, fazendo uso dessa legislação estadual, realizando o zoneamento e a ocupação do solo, levando em conta a vulnerabilidade ao risco e prevenção da poluição, além do monitoramento constante da qualidade e contaminação desses recursos.

A **Lei Estadual nº 6.134, de 02 de junho de 1988**, torna possível à administração pública desenvolver o cadastramento de poços tubulares profundos e dispõe sobre meios efetivos de controle da exploração e proteção dos recursos hídricos subterrâneos do Estado de São Paulo, principalmente na “implantação de distritos industriais e de grandes projetos de irrigação, colonização e outros, que dependam da utilização de águas subterrâneas [... que] deverá ser precedida de estudos hidrogeológicos para a avaliação de reservas e do potencial dos recursos hídricos [...]” (Art. 6º). No Art. 9º lê-se:

*Artigo 9º - Sempre que necessário o Poder Público instituirá áreas de proteção aos locais de extração de águas subterrâneas, a fim de possibilitar a preservação e conservação dos recursos hídricos subterrâneos.*

É possível interpretar que se a sobreexploração causar risco à preservação e conservação da água subterrânea, o Poder Público pode impedir a abstração desse recurso como meio de o proteger.

O **Decreto 32.955, de 07 de fevereiro de 1991**, que regulamenta a **Lei Estadual 6.134, de 02 de junho de 1988**, classifica como *Área de Máxima Proteção* (Art. 20, I) a área “compreendendo, no todo ou em parte, zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para abastecimento público”. O Artigo 22 desse decreto prevê a proibição de novas captações e restrições das captações já existentes quando existe uma “carência de água”, que pode ser entendida como um processo de sobreexploração:

*Artigo 22 - Se houver escassez de água subterrânea ou prejuízo sensível aos aproveitamentos existentes nas Áreas de Proteção Máxima, o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE e a CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de acordo com as respectivas atribuições poderão:*

*I - proibir novas captações até que o aquífero se recupere ou seja superado o fato que determinou a carência de água;*

*II - restringir a captação de água subterrânea, estabelecendo o volume máximo a ser extraído e o regime de operação;*

*III - controlar as fontes de poluição existentes, mediante programa específico de monitoramento e*

*IV - restringir novas atividades potencialmente poluidoras.*

*Parágrafo Único: Quando houver restrição à extração de águas subterrâneas, serão prioritariamente atendidas as captações destinadas ao abastecimento público de água, cabendo ao*

*Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE estabelecer a escala de prioridades, segundo as condições locais.*

O instrumento de gestão dos recursos hídricos subterrâneos pelo DAEE é dado pela licença de execução de obras para extração de águas subterrâneas e autorização ou concessão para derivação da água subterrânea (**Decreto 41.258, de 31 de outubro de 1996** – Outorga de direitos de uso dos recursos hídricos).

Estima-se que são perfurados mais de 1.000 poços anualmente no Estado de São Paulo, totalizando cerca de 35.000 poços (<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/perh90/perh9013a.htm>). Em algumas áreas já é prevista a exaustão dos aquíferos e em outras o comprometimento da qualidade das águas pelo lançamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos, principalmente urbanos e industriais. O Plano Estadual de Recursos Hídricos (**Lei nº 9.034, de 27 de dezembro de 1994**) prevê a proteção das águas subterrâneas pelo cadastramento de poços tubulares profundos, licenciamento da perfuração de poços e da exploração de águas subterrâneas e da gestão de aquíferos em áreas críticas de superexploração ou poluição.

#### **4. Aquífero Guarani**

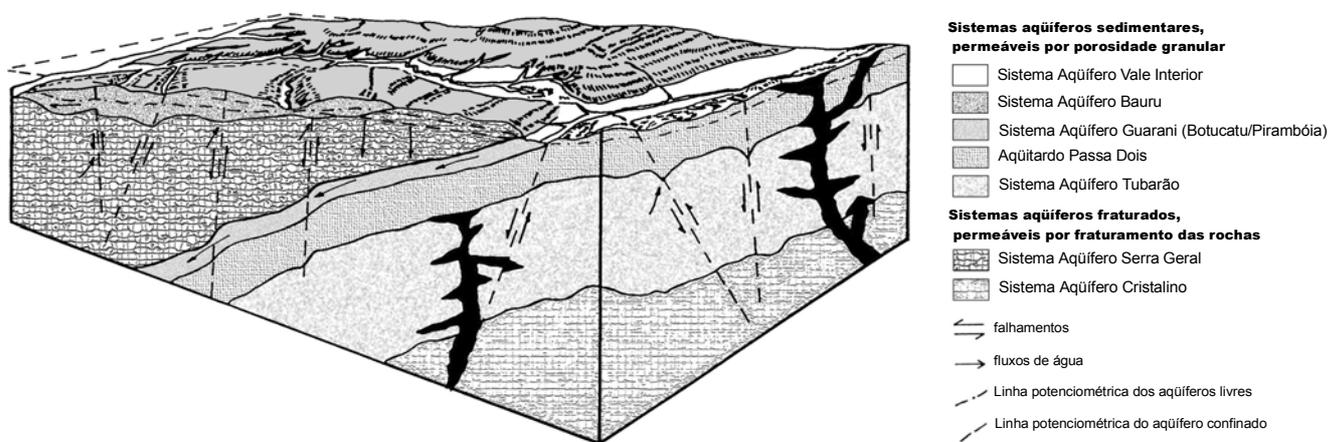
A Bacia do Paraná abriga um enorme reservatório de água subterrânea, com cerca de 1,5 milhões de quilômetros quadrados, denominado de Aquífero Guarani pelo geólogo uruguaio Danilo Anton, em memória do povo indígena da região, compreendendo as unidades siliciclásticas do Grupo São Bento (formações Pirambóia e Botucatu, no Brasil). É também conhecido por Aquífero do Mercosul (ARAÚJO et al. apud MENG; MAYNARD, 2001). No Estado de São Paulo esse sistema aquífero divide sua relevância também com outros grandes sistemas aquíferos (Fig. 03), sendo formado pelas formações Botucatu e Pirambóia que afloram no sentido de SW para NE, perfazendo a área de recarga do aquífero.

O Sistema Aquífero Guarani é sem dúvida um dos mais importantes recursos minerais da Bacia do Paraná, para o Brasil e seus países vizinhos, como já destacado por FULFARO e outros (1997). O Aquífero Guarani tem uma extensão regional, é granular/poroso, e assumido por muitos autores como homogêneo, contínuo e isotrópico.



**Fig. 03:** Distribuição dos maiores sistemas aquíferos do Estado de São Paulo (modificado de Campos, 1993)

Um modelo em bloco esquemático sobre a relação dos sistemas aquíferos e seu funcionamento hidráulico na bacia pode ser observado na Figura 04.



**Fig. 04:** Modelo esquemático do funcionamento hidráulico dos principais sistemas aquíferos (adaptado de DAEE por CAMPOS, 1993 e modificado neste)

Esse reservatório é um dos maiores aquíferos do mundo, um recurso compartilhado por 5 países, possuindo grande relevância política, social e econômica. Estende-se pelos territórios do Brasil (1.415 mil km<sup>2</sup>), Argentina (920 mil km<sup>2</sup>), Paraguai (410 mil km<sup>2</sup>), Bolívia (205 mil km<sup>2</sup>) e Uruguai (150 mil km<sup>2</sup>) (CAMPOS, 2000) e possui uma espessura conjunta de até 450 metros na porção central da Bacia do Paraná, confinada por espessos derrames basálticos, sendo a Formação Pirambóia responsável, geralmente, por 2/3 da seqüência, dispendo de um volume da ordem de 40 km<sup>3</sup>/ano, o

que, segundo Rocha (1996), permite suprir em pelo menos trinta vezes a demanda por água de toda a população existente em sua área de ocorrência, cerca de 15 milhões de habitantes.

É um aquífero poroso, formado por arenitos de idade mesozóica e característicos de depósitos eólicos e flúvio-eólicos da Formação Botucatu e Pirambóia, sotoposto discordantemente por unidades lamíticas (formações Corumbataí/Teresina e Serra Alta, no Estado de São Paulo) e sobreposto pelo derrame basáltico toleítico da Formação Serra Geral e intrusivas associadas, formando por vezes arenitos intertrapeanos.

Para Fili e outros (1998) as estimativas preliminares da reserva de água doce do aquífero predizem que seria suficiente para abastecer uma população de 5,5 bilhões de pessoas, a uma razão de 100 litros/dia por habitante durante 200 anos. Hoje em dia quase que a totalidade da água explorada é utilizada para o abastecimento público de centenas de cidades de médio e grande porte, por meio de poços de profundidade que variam de algumas centenas a mais de 1.000 metros. Essa área de recarga do aquífero é de 150 mil km<sup>2</sup> e a área confinada de 1 milhão de km<sup>2</sup>, com uma espessura média de 250 metros. Suas reservas de água armazenada alcançam 37 mil km<sup>3</sup>, sendo 60 km<sup>3</sup>/ano ativa e 40 km<sup>3</sup>/ano explorável (FILI et al., 1998), com uma recarga natural de 160 km<sup>3</sup>/ano.

A Formação Botucatu aflora com forma semi-circular acompanhando os limites da Bacia do Paraná desde o Rio Paranapanema até o Rio Grande. Os arenitos aflorantes formam ondulações suaves e cobertas por um solo delgado com baixa retenção, refletindo infiltração acentuada das precipitações. Esta unidade possui uma espessura média de 300 a 400 metros no Estado de São Paulo, excetuando-se os arenitos intertrapeanos, que apresentam espessura máxima de 160 m. A área aflorante da Formação Botucatu é de 16.665 km<sup>2</sup>, ao longo de 400 km, numa área total (aflorante e subsuperficial) de cerca de 150 mil km<sup>2</sup>, somente em São Paulo. A Formação Botucatu mergulha para o centro da Bacia do Paraná, na direção norte e noroeste na sua porção oriental, com cota altimétrica do topo da unidade em São Paulo de 800 m em São Carlos, a 250 m em Lins e -1.365 m em Presidente Epitácio, com desníveis dado pela tectônica da bacia (DAEE, 1972). Nas proximidades do rio Paraná, divisa dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, e no rio Paraguai, na divisa do estado do Rio Grande do Sul com a Argentina, apresentam-se zonas com possibilidade de artesianismo e termalismo (UNESCO e outros, 1996).

O aquífero, praticamente um desconhecido até o início da década de 70, sofre hoje sérios problemas de sobreexploração localizada, com mais de 2.000 poços nas

bordas da bacia, a profundidades de 1.000 a 300 metros e centenas de outros poços em áreas mais centrais da bacia, com profundidades que atingem 1.500 metros, além da contaminação por produtos químicos, rejeitos industriais, agrotóxicos e necrochorume a partir das bordas da bacia, em áreas urbanizadas, que poderão comprometer o aquífero. A Organização Mundial de Saúde (OMS) afirma que 80% das doenças que se alastram em países de 3º mundo são provenientes de água contaminada, daí a necessidade de conhecimento da água e seu tratamento para consumo humano, não somente das águas já contaminadas, mas das anomalias regionais podem apresentar-se, no tempo, contaminadas. Levantamento do DATASUS permite concluir que 70% dos leitos hospitalares no Brasil são ocupados por pacientes com doenças de veiculação hídrica.

#### 4.1. Aspectos Físicos e Hidráulicos

No Estado de São Paulo podemos sintetizar as características físicas e hidrogeológicas do Sistema Aquífero Guarani (ou Botucatu/Pirambóia) da seguinte forma (Relatório Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Áreas Subterrâneas no Estado de São Paulo – IG, CETESB, DAEE apud CETESB, 1998b) (Tab. 04 e 05):

**Tab. 04:** Aspectos da geometria do Aquífero Guarani

Aquífero	GEOMETRIA DO AQUIFERO			
	Área de Afloramento	Espessura Média	Extensão em Subsuperfície	Espessura Média Confinada
Porção Livre	16.665 km <sup>2</sup>	250 m	—	—
Porção Confinada	—	500 m	136.800 km <sup>2</sup>	500 m

fonte: CETESB (1998b)

**Tab. 05:** Aspectos hidráulicos do Aquífero Guarani

Aquífero	HIDRÁULICA DO AQUIFERO					
	Vazão Média por Poço	Profundidade dos Poços	Capacidade Específica	Trasmisividade	Permeabilidade Aparente	Coefficiente de Armazenamento
Porção Livre	10 a 100 m <sup>3</sup> /h	50 a 250 m	0,03 a 17 m <sup>3</sup> /h/m	40 a 400 m <sup>3</sup> /d	0,2 a 4 m/d	0,001 a 0,2
Porção Confinada	50 a 1.000 m <sup>3</sup> /h	60 a 5.300 m	0,01 a 26 m <sup>3</sup> /h/m	70 a 1.300 m <sup>3</sup> /d	0,5 a 4,6 m/d	0,000001 a 0,001

fonte: compilado de CETESB (1998b), UNESCO e outros (1996) e São Paulo(Estado)/SEMA (1997)

A permeabilidade média é de 3,5 m/dia na Formação Botucatu e 2,5 m/dia na Formação Pirambóia, sendo inferior nas fácies argilosas, e a porosidade efetiva média é de 25% na Formação Botucatu e de 15% a 20% na Formação Pirambóia (CETESB, 1978). Na Formação Pirambóia a variação na porosidade é dada pela diferença nas quantidades de silte e argila nos arenitos. A transmissividade média do aquífero é de

300 m<sup>3</sup>/dia, aumentando para oeste. O coeficiente de armazenamento médio é da ordem de 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-6</sup>, dependendo do grau de confinamento do aquífero. A recarga do aquífero é limitada às áreas de afloramento e da drenagem de zonas de fraturas dos basaltos em alguns altos estruturais. A precipitação média anual nessa área é de 1.500 mm, fornecendo uma quantidade de água adequada para sua recarga.

#### 4.2. Aspectos Hidrogeoquímicos

Campos (1993), sistematizando as informações hidrogeoquímicas do Sistema Aquífero Guarani, aponta anomalias pontuais nos teores de fluoreto, ainda não bem explicada, e ferro ferroso que excedem os padrões de potabilidade e podem inviabilizar o uso doméstico e certo uso industrial dessas águas.

Requer-se, no entanto, uma política governamental específica para o gerenciamento desses recursos, buscando um equilíbrio na sua exploração, de maneira não-desordenada, e projetos de pesquisa do aquífero, como a elaboração do Mapa de Recursos Hídricos do Aquífero Guarani, identificação e zoneamento das áreas sujeitas à ocorrência de teores excessivos de fluoreto nas águas (impróprias para o consumo) e ainda pesquisas relacionadas aos mecanismos de descarga do aquífero e seu artesianismo na porção extremo sudoeste, tal como proposto por Rocha (1996), além de outros projetos que busquem atender a programas de pesquisa básica, desenvolvimento econômico, defesa contra a poluição e difusão de informações, em equipes inter- e multidisciplinares de cooperação internacional, para garantir o suprimento de água em quantidade e qualidade para o próximo milênio.

O aquífero tem águas com diversas características químicas (Tab. 06) dada a variabilidade geológica de toda a região, tanto horizontalmente quanto em profundidade:

**Tab. 06:** Principais características hidrogeoquímicas do Aquífero Guarani

CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS PRINCIPAIS			
Aquífero	pH	Resíduo Seco a 105 °C	Classificação das Águas
Porção Livre	ácido	<100 mg/l	bicarbonatadas magnesianas e cálcio-magnesianas
Porção Confinada	ácido a neutro	200 mg/l	Zona de menor confinamento: águas bicarbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas
	alcalino	650 mg/l	Zona de maior confinamento: bicarbonatadas sódicas passando a cloro-sulfatadas sódicas a oeste

fonte: CETESB (1998b)

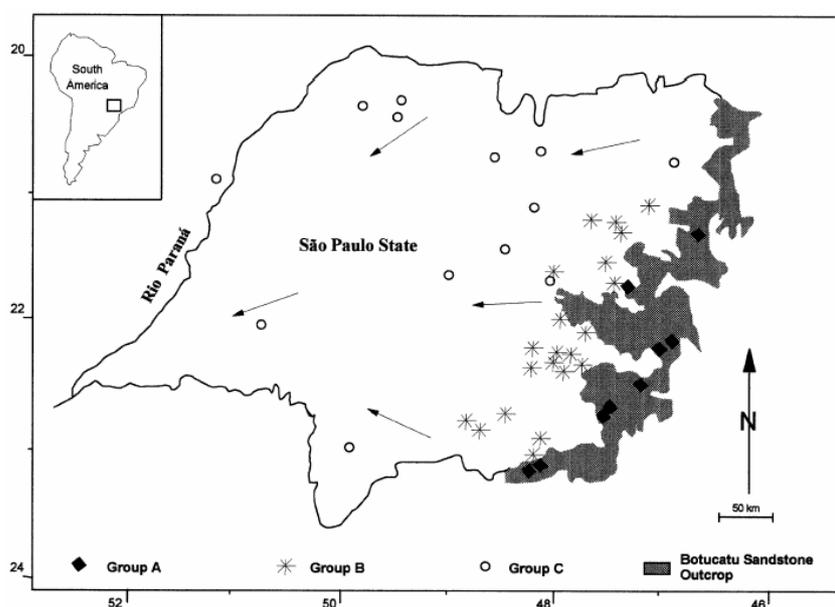
O Sistema Aquífero Guarani (CETESB, 1998b) possui temperaturas de 20°C a 26°C e pH de 4,9 a 7,27 na porção livre; e 21°C a 35°C e pH de 4,8 a 9,39 em sua

porção confinada.

Nesse sistema há um aumento da temperatura e pH com o aumento da profundidade. Apesar de o sistema apresentar uma amplitude de variação de 0 a 4,7 mg/l para o nitrato, 98% das amostras analisadas por CETESB (1998b) apresentam teores inferiores ou iguais a 1,0 mg/l, mas ainda assim não ultrapassa o valor crítico indicativo de contaminação de 5,0 mg/l, valendo a mesma análise para o potássio.

Valores indicativos da presença de coliformes totais e fecais nas amostras podem indicar contaminação dessa amostra por ocasião da coleta ou contaminação do aquífero.

Meng e Maynard (2001) aprofundaram os estudos hidrogeoquímicos do aquífero no Estado de São Paulo, com água doce em profundidades de até 2.000 m, incomum a grandes profundidades por causa da dissolução de cimentação ou arcabouço dos grãos. Através de análises multivariadas os autores classificaram as amostras em 3 grupos geoquimicamente distintos (Fig. 05): *região de recarga*, com mais baixa temperatura e pH, maior quantidade de água doce e química caracterizada por alto conteúdo de sílica total dissolvida e alta concentração de bicarbonato; *região intermediária*, com as maiores concentrações de bicarbonato e cálcio; e *interior da bacia*, dominado por concentrações de sódio, carbonato e sulfato, além de flúor.

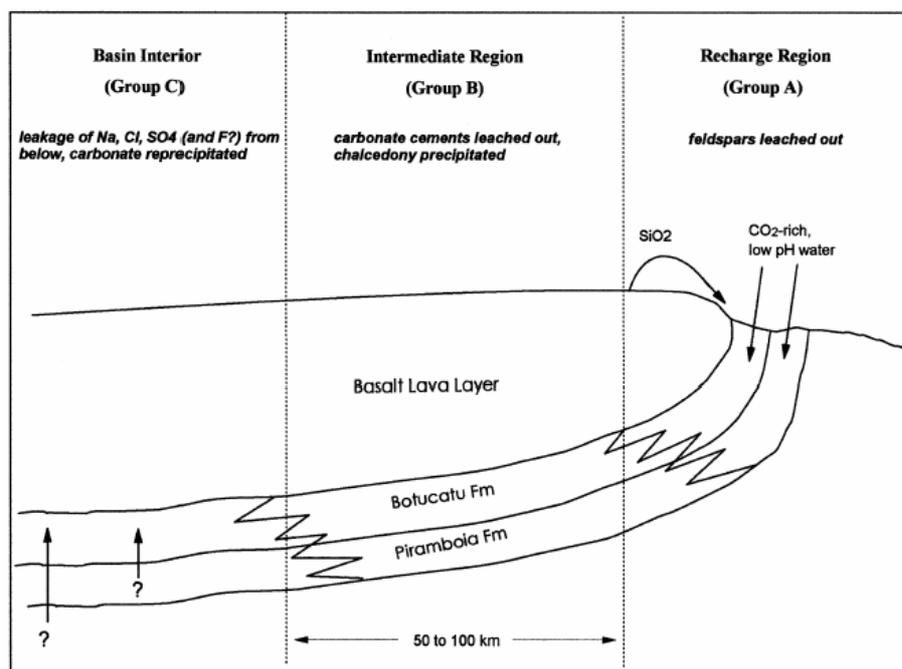


**Fig. 05:** Grupos da análise hidrogeoquímica do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (MENG; MAYNARD, 2001)

◆ região de recarga; \* região intermediária; e ○ interior da bacia

No modelo proposto pelos autores (Fig. 06) água meteórica rica em CO<sub>2</sub>, talvez advindo do solo, e baixo pH promovem a dissolução de feldspato alcalino do basalto e

produzem água rica em  $\text{SiO}_2$ . A região de recarga deve ter sofrido uma lixiviação dos cimentos calcíticos, fazendo com que a dissolução de carbonato seja uma contribuição subordinada à química dessas águas. Na região intermediária da bacia o bicarbonato é o íon dominante indicando que a calcita é ativamente dissolvida na área, penetrando cerca de 100 a 200 km para o interior da unidade a partir do afloramento ocorrendo também a precipitação de cimento silicoso na forma de calcedônia. No interior da bacia a lixiviação de águas mais salina, introduzindo  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $(\text{SO}_4)^{2-}$  e possivelmente  $\text{F}^-$ , de unidades inferiores, torna-se dominante, acompanhada pela precipitação da calcita.



**Fig. 06:** Diagrama esquemático mostrando regiões hidrogeoquímicas (Meng; Maynard, 2001)

Sracek e Hirata (2002), estudando as tendências geoquímicas e de isótopos estáveis do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, identificaram o relevante papel da troca catiônica e dissolução de carbonatos na evolução das águas do aquífero, resultando em uma água bicarbonatada sódica em direção à porção central da bacia, corroborando com as observações de Meng e Maynard (2001). Estima-se que as frentes de capacidade de troca catiônica movimentaram-se muito mais lentamente que a velocidade do fluxo das águas subterrâneas (SRACEK; HIRATA, 2002).

Assim, o aquífero tem características distintas para cada unidade litoestratigráfica e apresentando vulnerabilidade diferente conforme a profundidade do nível d'água na porção livre (Tab. 07).

**Tab. 07: Vulnerabilidade do Aquífero Guarani**

<b>VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO</b>			
Aquífero	Unidade	Nível d'água	Índice
Porção Livre	Botucatu	<10 m	ALTO alto
		10 a 20 m	ALTO baixo
		> 20 m	MÉDIO alto
	Pirambóia	<10 m	ALTO baixo
		10 a 20 m	MÉDIO alto
		> 20 m	MÉDIO baixo
Porção Confinada	Não definido		

fonte: CETESB (1998b)

No Estado de São Paulo são mais de 1.000 poços perfurados anualmente, se aproximando de cerca de 35.000 no total, sendo somente 7.435 cadastrados no SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, da CPRM). Cerca de 70% dos núcleos urbanos são total ou parcialmente abastecidos por poços, muitos construídos sem condições técnicas desejáveis e levando algumas áreas para a exaustão do aquífero e comprometendo a qualidade da água (<http://sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/perh90/Perh9013a.htm>).

Os poços tubulares que drenam o Aquífero Guarani são surgentes e semi-surgentes na área confinada, obtendo vazão de 20 a 300 m<sup>3</sup>/h, gerando rebaixamentos de 10 a 60 metros e com vazão específica de até mais de 20 m<sup>3</sup>/h/m (DAEE, 1972).

Questões sobre o cadastramento dos poços do aquífero, especificamente em Ribeirão Preto, serão discutidas mais adiante

### III. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

#### 1. Localização e Acesso

O município de Ribeirão Preto (SP) tem uma área total de 651,74 km<sup>2</sup> (urbana: 274,09 km<sup>2</sup>; e rural: 377,65 km<sup>2</sup>), localizado na porção norte-nordeste do Estado de São Paulo (Fig. 07), entre as coordenadas aproximadas de 188 e 226 UTME e 7.634 e 7.669 UTMN (quadrícula SF. 23-V-C-I e parte em SF. 22-X-D-III), compreendendo o distrito sede (c. 477 km<sup>2</sup>) e o distrito de Bonfim Paulista (c. 174 km<sup>2</sup>). A articulação das cartas topográficas permite a identificação do município em relação aos seus vizinhos (Fig. 08).

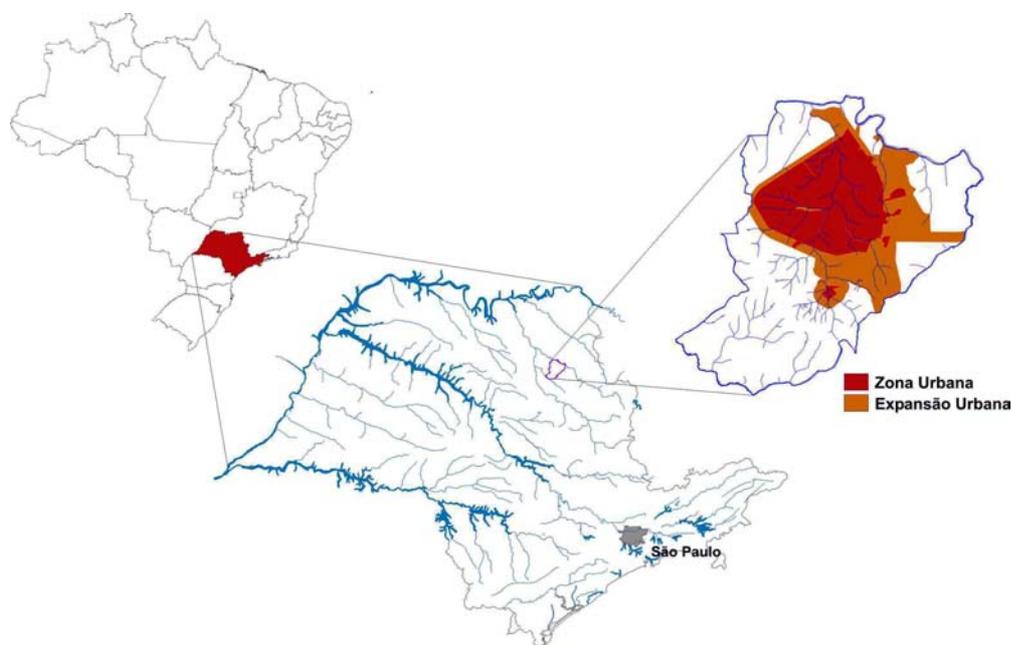


Fig. 07: Localização do município de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo

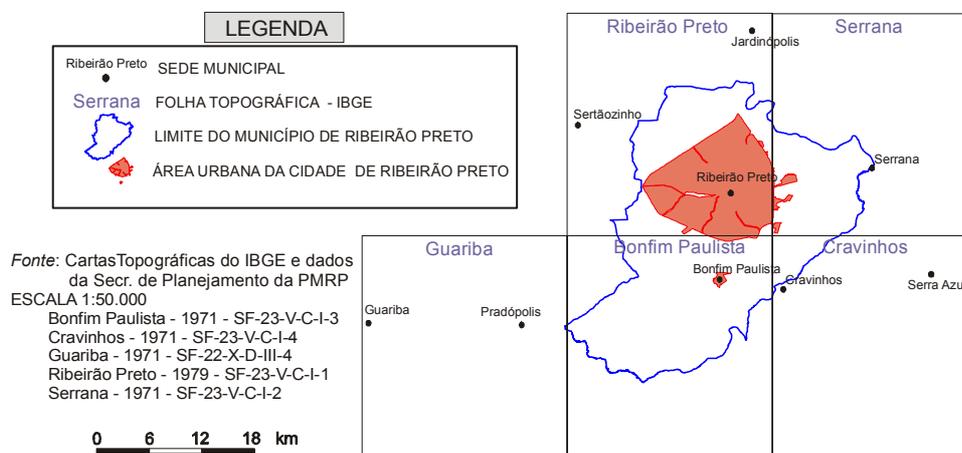


Fig. 08: Articulação das folhas topográficas 1:50.000 (IBGE, 1971 a,b,c,d; 1979)

O acesso para a área pode ser feito, a partir de São Paulo, pela Rodovia SP-330 (Rodovia Anhangüera), que liga São Paulo à Campinas e ao Triângulo Mineiro, atravessando a cidade de Ribeirão Preto de sul para norte, com uma distância de 313 km para nordeste a partir da capital paulista (Fig. 09).



**Fig. 09:** Acesso para a área a partir de São Paulo

## 2. Aspectos Históricos e Econômicos

Ribeirão Preto apresentava, nos meados do século XIX, suas terras integradas aos termos Reunidos de Casa Branca e Moji-Mirim, sendo distrito de São Simão. Neste período, os fazendeiros, em sua maioria proveniente de Minas Gerais devido à decadência do ouro, estabeleceram criações de gado.

O senhor José Mateus dos Reis doou terras para a construção da capela em homenagem a São Sebastião e em 19 de julho de 1856 foi fundado o povoado de São Sebastião de Ribeirão Preto. O povoado foi prosperando e em 02 de julho de 1870 foi elevado à categoria de freguesia e no ano seguinte à vila, desmembrando-se do município de São Simão. A igreja foi inaugurada a 15 de julho de 1870 sendo seu primeiro vigário o Padre Ângelo Philledory Torres. Somente em 22 de fevereiro de 1874 é que foram realizadas as eleições para a escolha dos primeiros vereadores e juízes de paz, sendo que a Câmara Municipal da Vila de São Sebastião do Ribeirão Preto ficou, definitivamente, constituída a 04 de junho de 1874.

Neste período o Brasil já contava com a cultura do café para o seu desenvolvimento econômico. Em virtude da espantosa fertilidade das suas terras, São Sebastião de Ribeirão Preto, abriu suas portas para muitas famílias oriundas de diversas regiões do país e principalmente do próprio Estado de São Paulo. O médico e cientista Dr. Luís Pereira Barreto, acompanhado de seus irmãos, abandonou o Vale do Paraíba e trouxe para Ribeirão Preto a riqueza através das sementes do café tipo "Bourbon". Outros fazendeiros trabalharam lado a lado com os "Pereira Barreto", entre eles: o

Coronel Francisco Schmidt e Henrique Dumont – pai de Santos Dumont.

Por seu solo oferecer condições excelentes para a cultura do café, na Vila de São Sebastião de Ribeirão Preto, em 1873, teve início a maior fase de progresso da região, principalmente com a chegada de numerosos imigrantes a partir de 1876, sobretudo italianos, espanhóis e portugueses, além de uma legião de profissionais liberais, comerciantes e aventureiros, sendo que os italianos tiveram importante papel na cultura da oligarquia cafeeira.

Em 7 de abril de 1879 mudaram o nome da Vila para "Entre Rios", por se localizar entre dois grandes rios (Pardo e Moji-Guaçu – na época Guataparará ainda não era emancipado), entretanto, a reivindicação popular em devoção ao santo guerreiro homenageado e a convivência com o curso d'água de leito barrento, alcançaram em 1881 a devolução do nome antigo.

Em 1883, Ribeirão Preto já contava cerca de 10.000 habitantes, quando recebe a Estrada de Ferro Mojiana (29 de novembro) e algum tempo depois, São Paulo-Minas e Companhia Paulista, o que permitiu maior escoamento da produção cafeeira. O reconhecimento de Ribeirão Preto como cidade ocorre com a promulgação da Lei nº 88, de 1º de abril de 1889.

No ano de 1996 o município de Ribeirão Preto perde grande parte de sua extensão territorial com a emancipação da sua porção sul, então denominada de Guataparará.

De acordo com Monbeig apud Francisco (1996), em termos de meios de produção, a região de Ribeirão Preto no período de 1890 e 1915 foi a maior produtora de café "fino" do mundo, destacando essa região como um dos grandes centros produtores de café responsáveis pela superprodução de 1900-1905. Monbeig (op. cit.) enfatiza que em 1920, a DIRA de Ribeirão Preto, com uma superfície de 3,6 milhões de hectares, apresentava-se como a principal região agrícola do Estado de São Paulo, a mais diversificada e com a maior área de lavouras. A estabilização da produção cafeeira entre 1920 e 1925 atingira um quinto da colheita paulista de café, quando sofre sensível decréscimo na sua produção no ano seguinte e a partir da Primeira Guerra Mundial (FRANÇA, 1960 e MONBEIG apud FRANCISCO, 1996). As fortes geadas ocorridas em 1918, o uso intensivo do solo levando ao perigo de uma degradação ambiental da terra roxa através dos processos erosivos e da perda da fertilidade (exaustão) do solo (sinais alertados pelos agrônomos entre 1915 e 1925 em suas publicações oficiais através da necessidade de práticas conservacionistas de solo), o aparecimento da praga da broca-do-café (*Hypothenemus hampei* Ferrari) e a crise da Bolsa de Valores de Nova Iorque

(*New York Stock & Exchange*) em 1929 são os principais fatores que explicam essa queda.

Para Francisco (1996), sem dúvida, o principal fator responsável pela queda da produção de café na região de Ribeirão Preto foi a crise da Bolsa de Valores de Nova Iorque em 1929, que ocasionou uma baixa no preço do café no mercado internacional. Esse fato levou ao fracionamento de grande número de propriedades, a instalação da policultura e reativação da pecuária na área.

Como conseqüência do declínio do café grandes fazendas foram desmembradas e vendidas a preços baixos para imigrantes. Os sítios proliferaram e muitas chácaras suburbanas localizadas em antigos cafezais se transformaram em setores de especulação imobiliária, multiplicando-se os loteamentos urbanos.

Ribeirão Preto é uma cidade que impressiona ao analisar a capacidade de diversificar sua economia. Sempre ativa, não se abateu com o declínio do café e a extinção dos “Barões do Café”. De acordo com Larousse (1998), após atravessar uma fase de crescimento da policultura (algodão, arroz, milho, feijão e hortaliças), seguida de uma expansão da cultura canavieira voltada para a produção de açúcar, a partir de 1940, Ribeirão Preto encontra novas bases econômicas sobre as quais se apóia e mantém seu crescimento. Na década de 80 a cana-de-açúcar assume caráter de monocultura, incentivada pelo programa governamental do Pró-Álcool de produção de álcool combustível. Desde o período pós-2<sup>a</sup> Guerra Mundial o município desenvolve igualmente industrialização e crescimento populacional, tornando-se um dos principais centros manufatureiros do interior paulista, compondo hoje importante entroncamento rodo-ferroviário, além de centro comercial, universitário e médico-hospitalar.

A área de influência de Ribeirão Preto extrapola os limites do Estado de São Paulo atingindo, sobretudo o sul de Minas Gerais e o Triângulo Mineiro, abrangendo 84 municípios, região esta com um total de 2.575.742 habitantes, segundo censo do IBGE de 1996, sendo 2.386.707 residentes na zona urbana (92,66%) e 189.035 habitantes residentes na zona rural (7,34%), com renda per capita de US\$ 6 mil. Caracteriza-se como uma das cidades mais ricas do país, informação esta atestada na estimativa do Produto Interno Bruto (PIB) estadual, feita em 1990, que calcula um valor aproximado de 1,9 bilhões de dólares estado-unidenses (USD) para o PIB do município e de 18 bilhões USD para o PIB da região, sendo responsável por 37% do PIB total e 50% do PIB industrial do país. Atualmente o PIB de Ribeirão Preto é de 4,3 bilhões USD (cf. <http://www.adtp.org.br/news/restrito/regional/ribeirao.htm>, acessado em fev/2003).

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M), calculado pelo

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), é um indicador que segue a metodologia estabelecida pela ONU, determinado por 3 aspectos da condição de vida (renda, educação e saúde). Ribeirão Preto ocupava a 4ª posição no IDH-M do Estado de São Paulo em 1991, e hoje ocupa a 6ª posição no estado e a 22ª no Brasil (PNUD, 2003).

O setor agrícola de Ribeirão Preto é expressivo, sendo responsável por 33% do álcool e 20% do açúcar produzidos no país; e, em nível estadual, 38% da laranja e 50% da soja saem do seu solo, além de exportar suco de laranja, soja, algodão herbáceo, cana-de-açúcar para a industrialização, milho, café, farelo de oleaginosas (soja, algodão e amendoim), couro curtido e cromo, máquinas e equipamentos para a indústria extrativa mineral. Essas características proporcionaram a instalação de dezenas usinas de açúcar e álcool, esmagadores e industrializadoras de suco concentrado de laranja e outras frutas, produtores de óleo vegetal, centenas de outras indústrias de alimentos e também produtores de insumos como rações, sementes, defensivos, máquinas e implementos agrícolas.

A macroregião de Ribeirão Preto possui ainda um forte setor cerâmico e vidreiro, um grande pólo calçadista e centro produtor de bens de capital, produtores de celulose e papel, um diversificado setor metal-mecânico, com destaque para equipamentos hospitalares e odontológicos, autopeças, bens de consumo duráveis e diversas indústrias de bens de artigos de higiene, limpeza e confecções. O distrito industrial e empresarial de Ribeirão Preto encontra-se em expansão, principalmente ativo com a abertura do mercado pelo Mercosul.

O setor terciário (comércio e prestação de serviços) tem grande peso na economia da cidade. O comércio atende a população local e flutuante por ser um dos mais variados e dinâmicos, além de estar distribuído por todo o município, contando ainda com a presença de três *shopping centers*. São 33.396 estabelecimentos registrados na Associação de Comércio e Indústria de Ribeirão Preto (ACI), sendo 19.450 prestadoras de serviço, 12.860 estabelecimentos comerciais e 1.086 estabelecimentos industriais, onde se destaca o comércio de: veículos e peças, gêneros alimentícios, artigos de vestuário, calçados e artigos de couro, livros e materiais escolares.

Ribeirão Preto também conta com o reconhecimento nacional quando se trata da área da saúde, por possuir o maior hospital do país e um dos mais avançados centros de pesquisa da América Latina. Este qualificativo atrela-se à educação do município que atende da pré-escola à universidade, com escolas das redes municipal, estadual e

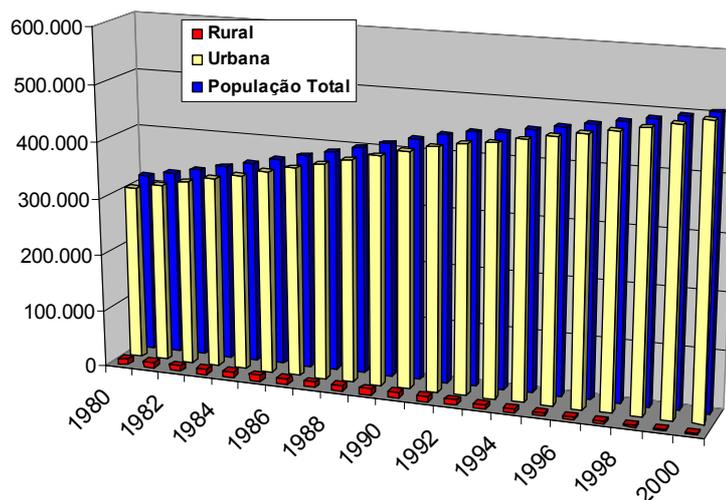
particular, formando um vasto campo de opções profissionais para os jovens da cidade e da região.

Ribeirão Preto lidera o franco desenvolvimento da região, destacando sua importância pelos diversos aspectos sociais, culturais, políticos e econômicos que lhe atribuíram, ao longo de sua história, títulos como "Capital do Café", por ter sido até 1930 o maior centro produtor de café do mundo; "Capital da Cultura", pelos movimentos culturais iniciados nos anos 60; "Texas", pela excelente qualidade de sua agropecuária e "Califórnia Brasileira", por possuir uma das maiores rendas per capita da América Latina.

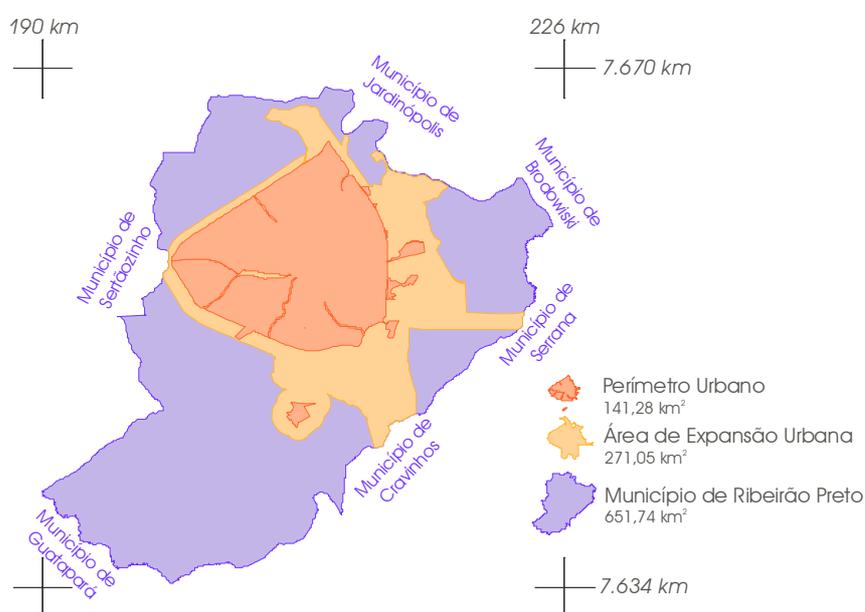
### **3. Aspectos Populacionais**

Segundo o estudo censitário da Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE, 2003) a população de Ribeirão Preto cresceu de 316.918 hab. em 1980 para 498.994 hab. em 1998 (Projetada pela Secretaria de Planejamento), havendo diminuição da população rural, talvez migrada para a zona urbana (Fig. 10). Atualmente a população total é de 512.382 habitantes, sendo 99,47% em área urbana e com uma densidade demográfica de 786 hab./km<sup>2</sup> (SEADE, 2003). Ainda que haja esse crescimento populacional há um decréscimo na taxa de crescimento populacional anual de 2,90 % nos anos de 1980 a 1991 para 1,17% entre 1991 e 1996 (SEADE, *op. cit.*), com uma densidade populacional de 735,96 hab./km<sup>2</sup> em 1996.

Ainda que se tenha sofrido uma desaceleração do crescimento populacional o município apresenta uma taxa de urbanização de 96,81 % em 1980 para 99,57 % em 2000 (SEADE, 2002). Na Figura 11 pode-se perceber o planejamento da urbanização do município e seus vetores de crescimento a partir do perímetro urbano atual, de forma radial e com maior desenvolvimento para sudeste (em direção a Cravinhos).



**Fig. 10: População de Ribeirão Preto**



**Fig. 11: Área urbana e expansão urbana do município de Ribeirão Preto (mod. de RIBEIRÃO PRETO/SEPLAN, 1999)**

Maiores informações sobre o município podem ser diretamente acessadas em <http://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/>.

## 4. Aspectos Fisiográficos

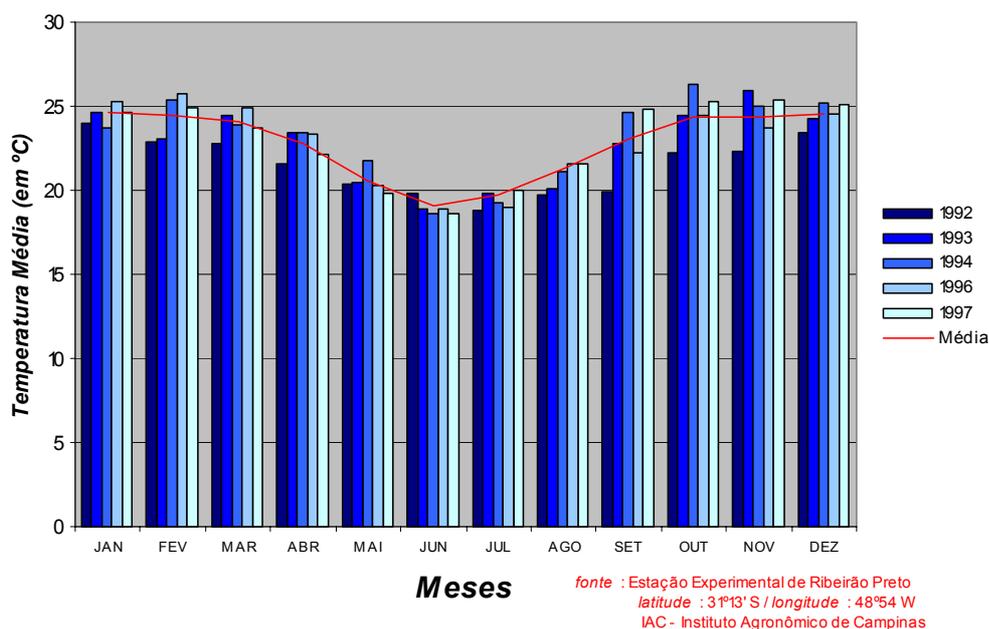
### 4.1. Clima

O clima de Ribeirão Preto, influenciado pelos sistemas extratropicais e intertropicais que atuam na área, caracteriza-se habitualmente por dois períodos: quente e úmido (primavera-verão) e frio e seco (outono-inverno).

Segundo Monteiro apud Francisco (1996), a região de Ribeirão Preto pertence ao grupo de feições climáticas individualizadas denominada "Centro-Norte", apresentando como característica principal a existência de um período seco muito nítido. A freqüência da chuva diminui consideravelmente no sentido dos paralelos, culminando no setor norte, que se constitui na área de inverno, período mais nitidamente seco do estado. Nessa área verifica-se acentuada participação da massa Tropical Atlântica, que em certos invernos é mais ativa do que no litoral norte, submetido a passagens de massa Polar.

FRANCISCO (1996) afirma que na região de Ribeirão Preto as temperaturas não apresentam grandes variações durante o ano, tendo como média anual 22°C. Ainda, as temperaturas inferiores a 0°C são raras na região de Ribeirão Preto, sendo a última ocorrência registrada nos meses de junho e julho de 1994 com temperaturas de -0,2°C.

De forma mais sintética o clima de Ribeirão Preto pode ser classificado como de Tropical Úmido, com temperatura média de 29,7°C no verão e média de 12,9°C no inverno, parecendo haver uma diminuição da amplitude de variação quando são consideradas as médias mensais (Fig. 12).



**Fig. 12:** Temperatura de mensal de Ribeirão Preto de 1992-1997

A precipitação pluviométrica média é de 1.426,80 mm de chuva (total ano), com uma grande variação de ano a ano (Fig. 13), e a média anual da umidade relativa do ar é de 71%. O município possui baixos índices de poluição atmosférica, estando entre os principais poluentes o monóxido de carbono e gases e fuligem, provenientes da queima da cana-de-açúcar.

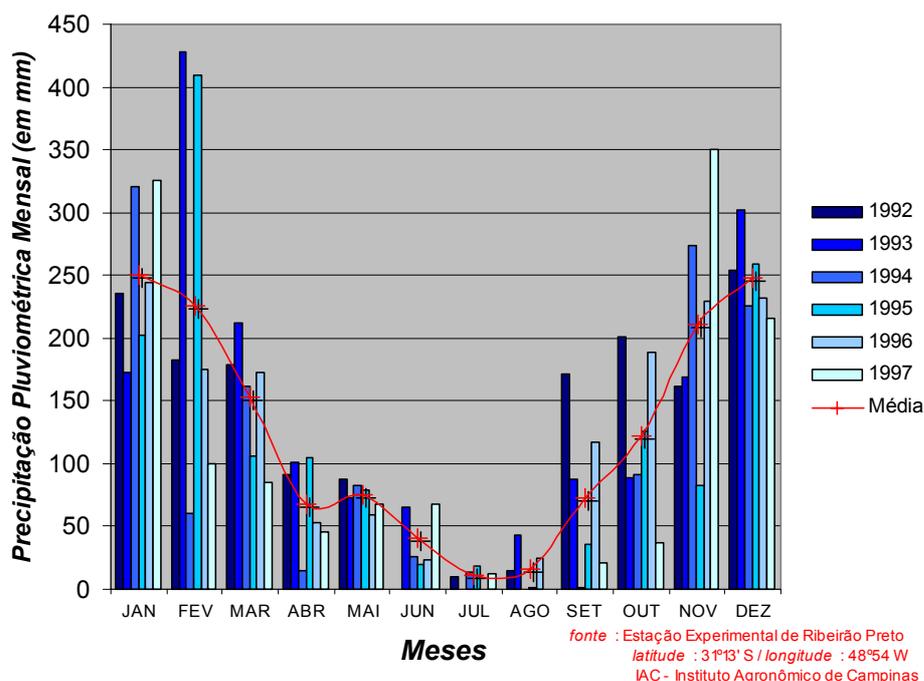


Fig. 13: Precipitação pluviométrica mensal de Ribeirão Preto de 1992-1997

#### 4.2. Geomorfologia e Hidrografia

A região de Ribeirão Preto (Fig. 14) ocupa o Planalto Ocidental Paulista, sustentado pelas cuestas basálticas, compondo um relevo colinoso, favorável à mecanização agrícola, na zona denominada de indivisa (IPT, 1981a), com uma altitude média de 518 metros e sendo o Morro São Bento seu ponto mais alto.

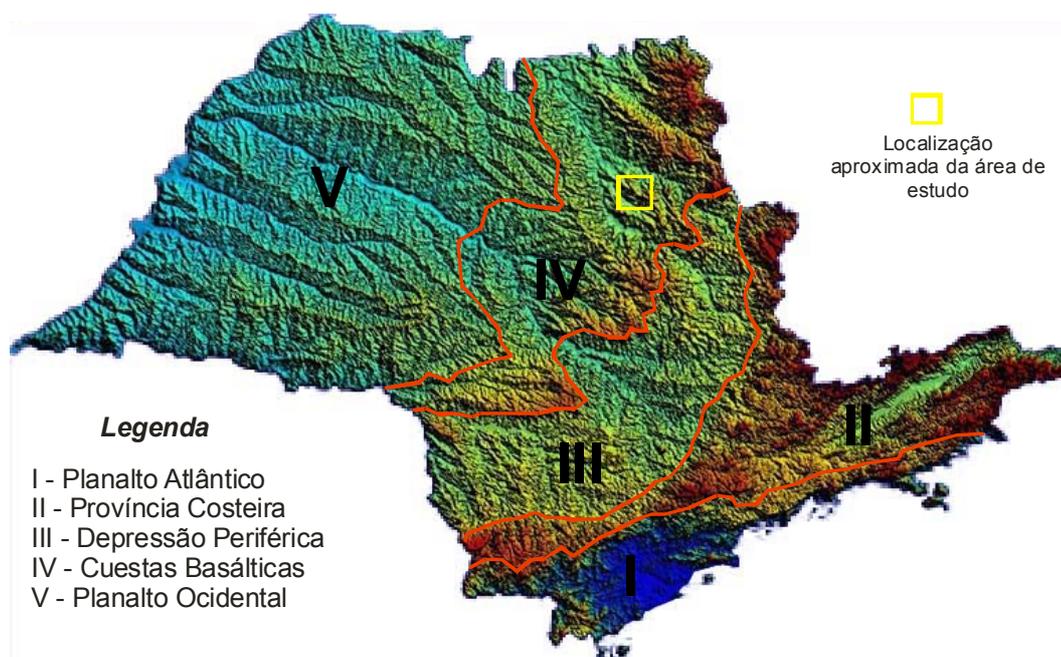


Fig. 14: Principais províncias geomorfológicas e localização da área sobre MDT (figura modificada e sem referência)

São encontradas três formas principais de relevo, classificadas segundo IPT (IPT, 1981a) como relevos de degradação, em planaltos dissecados: relevo colinoso de colinas amplas, relevo de morros amplos com encostas suavizadas e relevo de morros arredondados.

O relevo colinoso de colinas amplas é caracterizado por apresentar baixas declividades de até 15%, amplitudes locais inferiores a 100 metros, com predomínio de interflúvios com área superior a 4 km<sup>2</sup>, topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. A drenagem é de baixa densidade, possuindo padrão subdendrítico, vales abertos e planícies aluviais interiores restritas, com presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

No relevo de morros amplos com encostas suavizadas predominam baixas declividades, de até 15%, amplitudes locais de 100 a 300 metros, com interflúvios arredondados com área superior a 15 km<sup>2</sup>, topos arredondados a achatados e vertentes com perfis retilíneos a convexos. A drenagem tem baixa densidade, apresentando padrão dendrítico, vales abertos e planícies aluviais interiores restritas, existindo também uma propensão para a formação de voçorocas.

O relevo de morros arredondados apresenta declividades médias a altas, acima de 15%, amplitudes locais de 100 a 300 metros, mostrando topos arredondados e localmente achatados e vertentes com perfis convexos a retilíneos, localmente ravinados. Existem exposições locais de rocha e presença de espigões curtos locais. A drenagem é de média densidade, com padrão dendrítico a subdendrítico, em vales abertos.

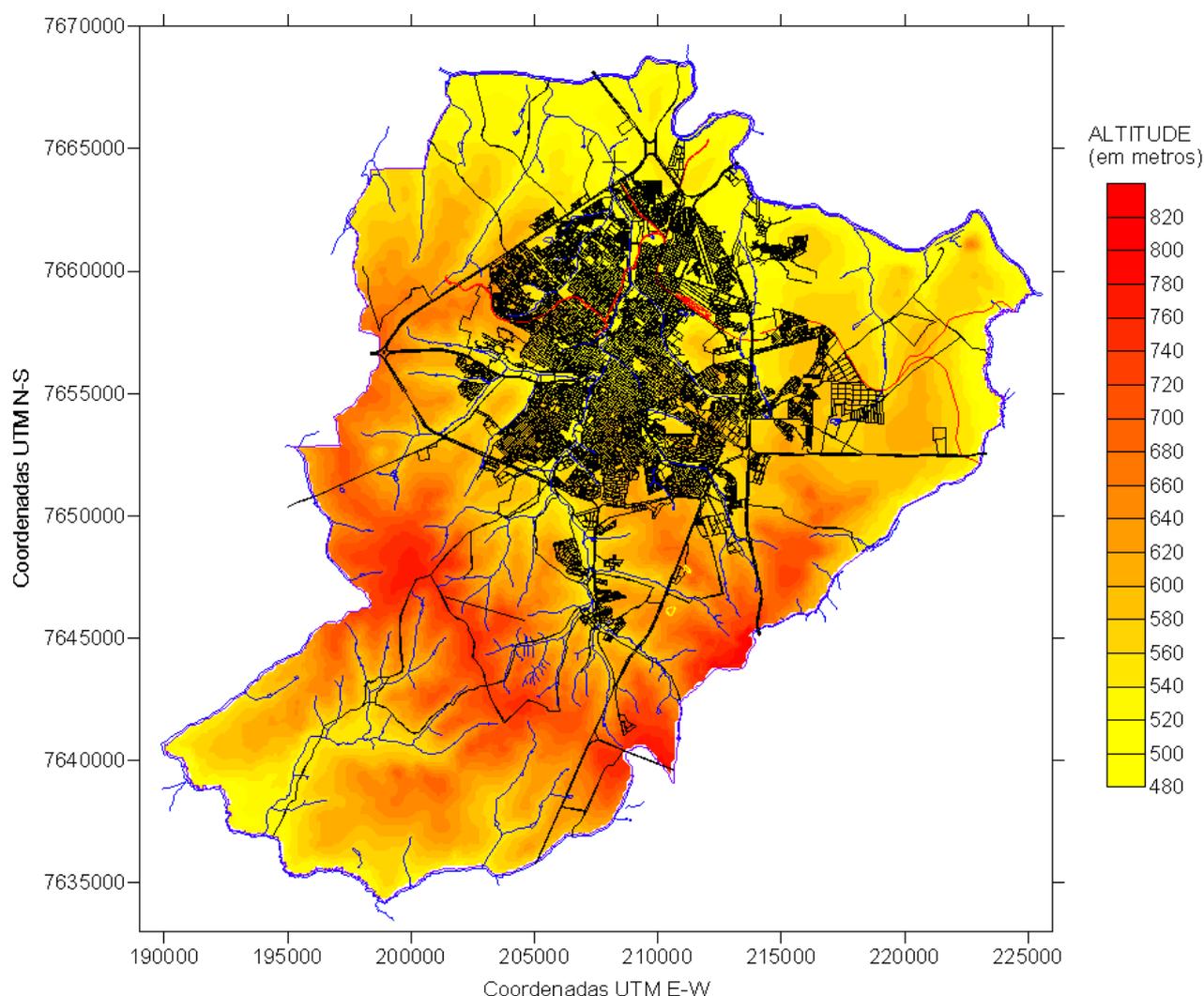
Com relação à classificação discutida por Ross e Moroz (1997), Ribeirão Preto faz parte da unidade morfoescultural denominada Patamares Estruturais de Ribeirão Preto, localizando-se na porção noroeste da morfoescultura da Bacia do Paraná e limitando-se a oeste e sudoeste com o Planalto Residual de São Carlos, ao norte com o Planalto Centro Ocidental e a leste e sudeste com a Depressão Periférica Paulista.

Ross e Moroz (*op. cit.*) enfatizam que as formas de relevo são denudacionais, constituindo-se basicamente por colinas amplas e baixas com topos tabulares, tendo os vales com entalhamento médio de menos de 20 m e uma dimensão interfluvial variando de 750 m até mais de 3.750 m. As altimetrias estão entre 500 e 700 m e as declividades médias estão entre 2% e 10%.

As características morfoesculturais dessa “unidade de Ribeirão Preto” são caracterizadas por relevo pouco dissecado e vales pouco entalhados, com vertentes de declividades baixas e solos argilosos, além da baixa densidade de drenagem, fatores

que contribuem para que o potencial erosivo desta unidade seja consideravelmente baixo.

As altitudes no município de Ribeirão Preto variam de 470 a 820 metros, com um importante divisor de água cortando o município de sudeste a noroeste (Fig. 15). O mapa foi elaborado com a digitalização das folhas topográficas do IBGE (1:50.000) em AutoCAD® r14, gravação em arquivo no formato ASCII pela rotina lisp *vert14.lsp* e interpolação com 150x150 m no programa Surfer® 8 por mínima curvatura e sobreposição do mapa viário do município obtido na Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental.



**Fig. 15:** Topografia, drenagem e infra-estrutura urbana de Ribeirão Preto

A rede hidrográfica da região compõe a bacias dos rios Pardo/Moji-Guaçu, com alguns rios de mais alta ordem e uma lagoa principal no câmpus da Universidade de São Paulo (USP), além de outros corpos d'água de menor expressão.

O rio Pardo, que faz o limite norte com os municípios de Brodósqui e Jardinópolis, é o principal rio do município, mas Ribeirão Preto possui ainda outros cursos de água importantes. O limite sul do município com Cravinhos e Guataparé é dado pelo córrego da Onça e córrego São Francisco (ou Jaboticabal). São importantes afluentes do rio Pardo pela margem esquerda: o ribeirão Preto (que atravessa a zona central urbana) e o córrego das Palmeiras. Como afluentes do ribeirão Preto e de grande importância para o município temos córrego do Tanquinho, córrego do Retiro Saudoso, pela margem direita, e córrego Monte Alegre pela margem esquerda. Os cursos de água são os principais limites municipais de Ribeirão Preto e têm, em grande parte da área, sentido de sul para norte, afluindo ao rio Pardo. Quando atravessam a zona urbana encontram-se canalizados, gerando problemas de inundações registradas com certa frequência. A Secretaria de Planejamento dividiu o município em 17 microbacias hidrográficas para efeito de gestão ambiental, segundo o “Projeto de Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo”, atendendo ao Plano Diretor do Município de Ribeirão Preto (Lei Complementar nº 501, de 31 de outubro de 1995) (RIBEIRÃO PRETO, 2003).

A hidrografia será discutida mais adiante de forma mais sistemática no item 6. *Recursos Hídricos*.

### **4.3. Pedologia**

No município de Ribeirão Preto predomina um latossolo roxo. É subordinada a presença de latossolos vermelho-escuro e vermelho-amarelo e, em menor quantidade, terra roxa estruturada, areia quartzosa profunda, cambissolos, solos hidromórficos e litólicos (EMBRAPA, 1983).

Segundo EMBRAPA (1983) os solos no município podem ser classificados e caracterizados da seguinte forma:

#### **Latossolos Roxos**

*Unidade Ribeirão Preto*: eutrófico, com A moderado ou chernozênico, textura muito argilosa ou argilosa, predominante no município;

*Unidade Barão Geraldo*: distrófico, com A moderado ou proeminente, textura argilosa ou muito argilosa. Possui grande distribuição em área do município, predominante juntamente com a Unidade Ribeirão Preto;

*Unidade Capão da Cruz*: ácrico, com A moderado, textura argilosa ou muito argilosa. Geralmente ocorre associado a Unidade Barão Geraldo, nas porções norte e sul do município.

### **Latossolos Vermelho-Escuro**

*Unidade Hortolândia:* álico ou distrófico, com A moderado, textura média. Presença na porção sul do município e a leste da cidade de Ribeirão Preto;

*Unidade Bonfim:* álico, distrófico ou ácrico, com A moderado, textura argilosa. Ocorre na porção nordeste do município e principalmente a oeste do distrito de Bonfim Paulista;

*Unidade Dois Córregos:* álico, com A moderado, textura média. Apresenta ocorrências modestas nas proximidades dos córregos do Retiro Saudoso e do Guataparazinho, e geralmente está associada a Unidade Hortolândia.

### **Latossolos Vermelho-Amarelo**

*Unidade Coqueiro:* álico, com A moderado, textura média. Ocorre a leste da cidade de Ribeirão Preto e nas proximidades do Córrego das Palmeiras;

*Unidade Laranja Azeda:* álico, com A moderado, textura média. Ocorre a leste da cidade de Ribeirão Preto.

### **Terra Roxa Estruturada**

*Unidade Estruturada:* eutrófico ou distrófico, com A moderado.

### **Areia Quartzosa Profunda**

Álica, com A moderado, apresenta ocorrência nas proximidades do trevo da estrada que liga Ribeirão Preto a Serrana (SP-333) com a Rodovia Anhangüera (SP-330).

### **Solos Hidromórficos**

Associação de Gley húmico e Gley pouco húmico com ou sem solo orgânico. Ocorre principalmente na planície aluvial do Rio Pardo, e nas planícies dos ribeirões Tamanduá, da Onça e Preto e do Córrego das Palmeiras.

### **Solos Litólicos**

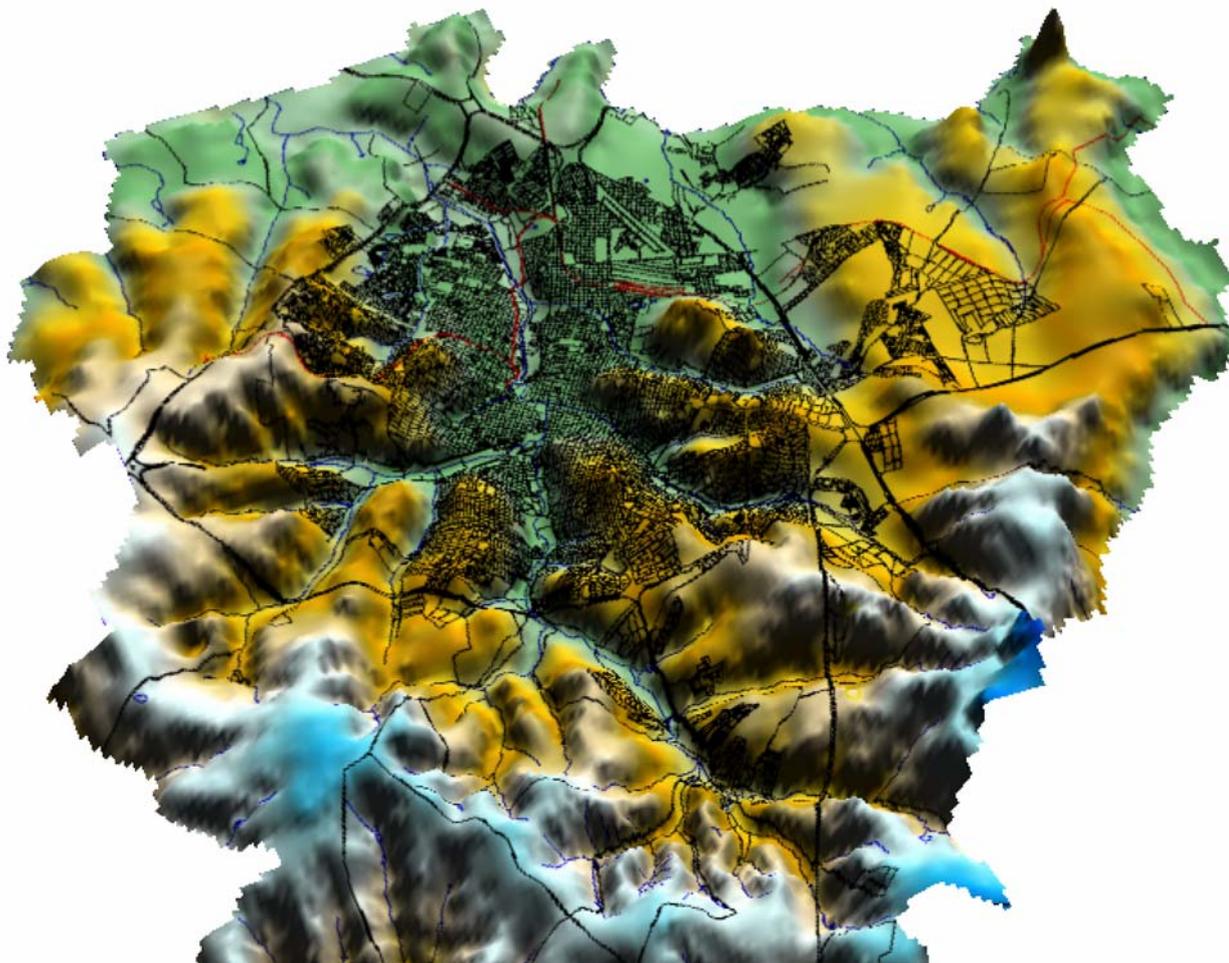
Eutróficos ou distróficos, horizonte A chernozênico, proeminente ou moderado, textura argilosa, com ou sem pedras ou cascalhos, substrato formado por basalto ou diabásio. Ocorre na porção sul do município nas proximidades do distrito de Bonfim Paulista.

### **Cambissolos**

*Unidade Sete Lagoas:* distrófico, com A moderado ou proeminente, textura indiscriminada, bem a imperfeitamente drenado. Ocorre a nordeste da cidade de Ribeirão Preto, na planície aluvial do Rio Pardo, entre as confluências deste com os córregos da Ponta da Serra e das Palmeiras.

#### **4.4. Uso e ocupação do espaço e vegetação**

A cidade de Ribeirão Preto ocupa a região topograficamente mais baixa e ao sul possui morros que são uma barreira natural ao vetor de crescimento da cidade (Fig. 16).



**Fig. 16:** Modelo 3-D e infra-estrutura urbana de Ribeirão Preto (exagero vertical de 15x)

As áreas ainda passíveis de ocupação estão na porção sul e nordeste no município, esta onde afloram os arenitos Botucatu/Pirambóia, sendo, portanto, área de recarga e mais vulnerável do aquífero (FERREIRA, S.T., 1996). Porém, é para essas áreas que a Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental definiu a área de expansão urbana (vide Fig. 05, item II.3. Aspectos populacionais), representando risco potencial para o aquífero. No entanto o município possui um plano para ocupação dessas áreas.

Ribeirão Preto já conta diversos instrumentos de gestão urbana (RIBEIRÃO PRETO, 2003) e o Plano Diretor e os projetos de Lei Complementar prevêm o uso e a ocupação do espaço no município, destacando-se o Código Municipal do Meio Ambiente, definindo as restrições sobre as ações antrópicas nas zonas ambientais de: *Zona de Proteção Máxima*, correspondentes às áreas de preservação permanente, às

várzeas e aos remanescentes de vegetação natural; *Zona de Uso Especial Urbano*, nas áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia; e *Zona de Uso Disciplinado*, que corresponde à área da Formação Serra Geral e básicas associadas; subdivididas sob critérios de grau de urbanização e geomorfológicos.

Para essas zonas são definidos usos e ocupações para cada zona como: (a) ação compatível; (b) ação não compatível; e (c) ação sujeita a licenciamento. Os temas de ações previstas pelo Código Municipal do Meio Ambiente são: saneamento, indústrias e prestação de serviços, ocupação urbana e rural, atividade agrícola e proteção ambiental.

As áreas cultivadas mais significativas para a economia de Ribeirão Preto estão vinculadas ao plantio da cana-de-açúcar e culturas anuais, como milho, soja e amendoim. Com relação à vegetação natural percebe-se que esta ocupa uma ínfima área no município, mesmo quando se associa a mata latifoliada e a mata ciliar típica dos cursos d'água, enfatizando-se que, às margens do Rio Pardo, grandes áreas de solo exposto reforçam o predomínio inadequado da retirada da mata ciliar dos cursos d'água de municípios importantes.

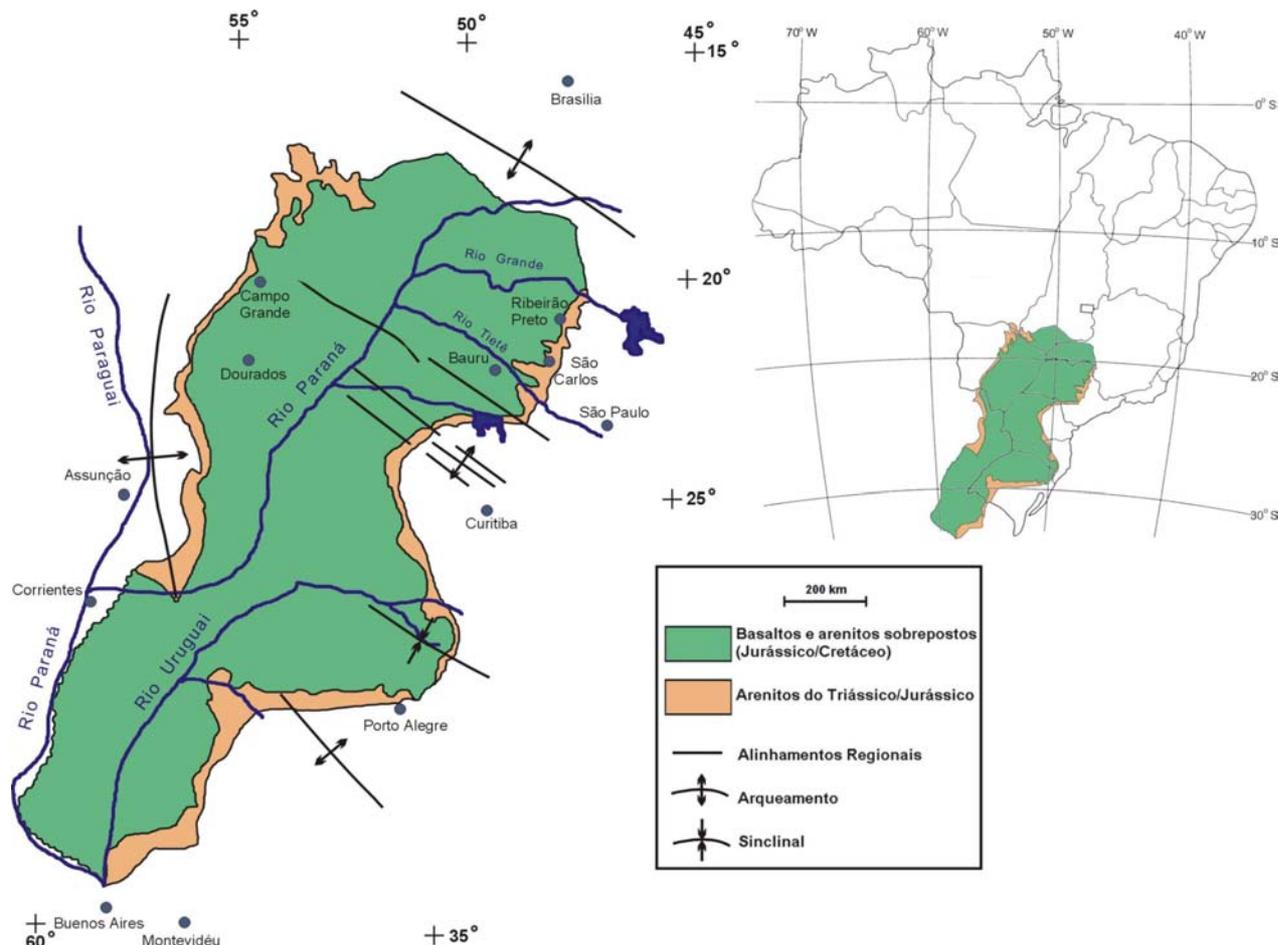
Os principais maciços remanescentes de vegetação natural são compostos por mata, cerrado, cerradão, capoeira e várzea. As áreas de reflorestamentos são pequenas, demonstrando desinteresse nesta prática conservacionista.

BURIN (1999) analisando o uso e ocupação do espaço na bacia do ribeirão Preto verificou que a cana-de-açúcar ocupa hoje grande parte de área ocupada anteriormente pelo cultivo anual, perene e vegetação nativa na década de 70. De forma especulativa, pode-se supor que a cana deve ter um aumento novamente, resultado dos altos preços dos combustíveis derivados do petróleo e da possibilidade de uma retomada de incentivos ao uso do álcool como combustível por demanda ambiental.

## **5. Geologia Regional**

A área de estudo encontra-se na Bacia Sedimentar do Paraná, uma extensa bacia intracratônica capeando cerca de 1.400.000 km<sup>2</sup>, de grande importância para o Brasil e Mercosul. Essa depressão deposicional de forma elíptica é preenchida por mais de 8.000 m de espessura de rochas sedimentares e ígneas (principalmente vulcânicas), cujas idades variam do Siluro-Ordoviciano, relacionada ao final do Ciclo Brasileiro (ZALÁN et al., 1987), ao Cretáceo, com ocorrência local de depósitos neocenozóicos. Sua evolução estratigráfica é influenciada marcadamente por estruturas do embasamento, composto por um mosaico de terrenos precambrianos, com sua história

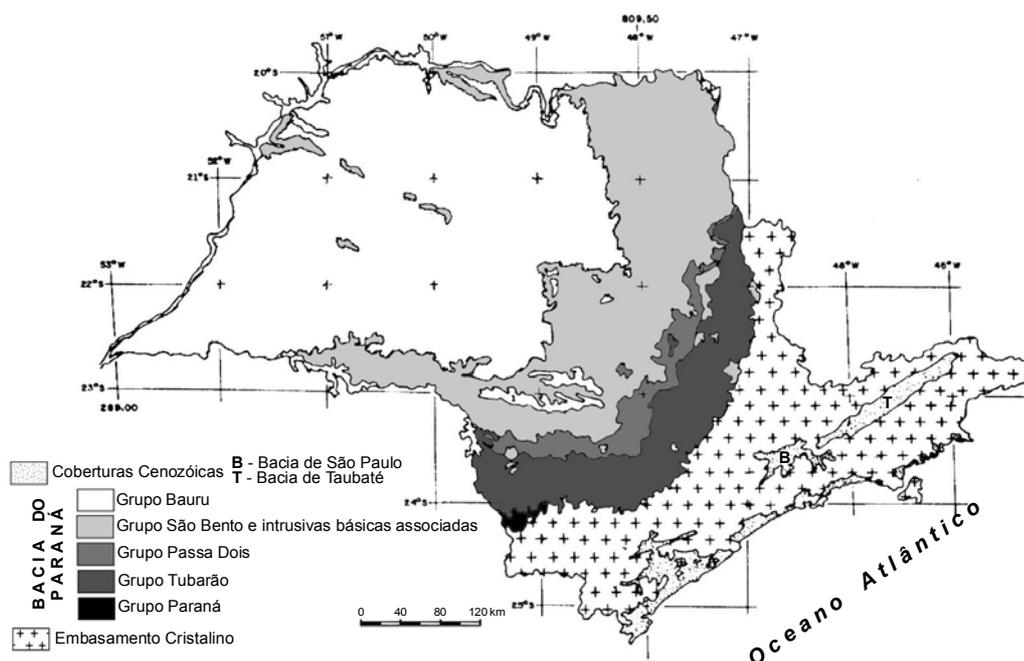
materializada por seis grandes unidades (superseqüências), representando fases de subsidência e acumulação limitada por inconformidades tectonicamente controladas (MILANI et al., 1998). A esse estudo interessa principalmente a geologia mesozóica da Bacia do Paraná, visando as unidades litoestratigráficas compostas por arenitos e basalto/diabásios (Fig. 17) pertencentes à Superseqüência Gondwana II e III de Milani (1997) (Fig. 18).



**Fig. 17:** Geologia mesozóica da Bacia do Paraná (modificado de ROCHA, 1996)



cinza claro – Fig. 19), que serão detalhadas a seguir.



**Fig. 19:** Mapa geológico simplificado do Estado de São Paulo (modificado de IPT, 1981b)

### 5.1. Estratigrafia

A Bacia do Paraná possui na sua porção norte-nordeste grande expressão aflorante da sua fase mesozóica, onde predominam litologias arenosas e basaltos, compondo as formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, que perfazem o Grupo São Bento, evidenciando uma sedimentação nitidamente continental, em clima árido a semi-árido, encerrada por amplo vulcanismo basáltico. Seu flanco nordeste foi principalmente estudado, no aspecto estratigráfico, por Soares e Landim (1973) e Landim, Soares e Gama-Júnior (1980).

As principais unidades litoestratigráficas da área de estudo podem ser assim sintetizadas, da base para o topo:

#### *Formação Pirambóia*

O nome Pirambóia foi dado por Pacheco apud Schneider e outros (1974), definido como formação por Sanford e Lange apud Soares e outros (1973) e redefinido por Soares apud Soares e outros (1973). Um estudo mais completo para todo o Estado de São Paulo foi realizado por Soares (1975) e subsidiou o desenvolvimento de outras pesquisas posteriores. A Formação Pirambóia (correlacionada ao Grupo Rosário do Sul na porção sul da bacia – formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita, cf. MILANI, 1997 e NOWATZKI; KERN, 2000) é composta por um pacote de espessos

corpos de subarcóseos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, de granulometria muito fina a média com matriz argilosa infiltrada, numa porcentagem média de 20% de material siltico-argiloso, com camadas de siltito, e, localmente, com níveis conglomeráticos. Parte do silte é carregada em suspensão pelo vento e é depositado em lâminas distintas nos *foresets* de dunas ou independentemente das areias, que são tracionadas nas áreas de interdunas e *sandsheets*, podendo misturar-se a elas por compactação, mas não constituindo matriz dos arenitos na maioria das vezes (CAETANO-CHANG; WU, 1992). Os grãos, segundo Wu e Caetano-Chang (1992), são subangulares a arredondados, ferruginosos, com grau de seleção predominantemente regular e texturalmente submaturos a maturos. Ainda segundo os autores, são formados por quartzo, feldspato, fragmentos de rochas (geralmente sílex), muscovita, cimento de oxi-hidróxido de ferro e argila autigênica e matriz de composição siltica original. O quartzo apresenta muitas vezes sinais de recrescimento de sílica cristalina, sendo, principalmente quartzo comum, quartzo metamórfico e quartzo retrabalhado. O feldspato, muito freqüente e abundante, apresenta-se parcialmente intemperizado e alterado para caulinita e/ou illita (WU; CAETANO-CHANG, op. cit.).

Apresenta estratificações cruzadas de pequeno a grande porte, tabulares ou acanaladas, tangenciais na base, e plano-paralelas, intercalando lamitos e argilitos arenosos, que representariam uma alternância cíclica de fácies de canal fluvial e de transbordamento (CAETANO-CHANG; WU, 1992), inclusive com o desenvolvimento de interdunas úmidas (*damp*) e aquosas (*wet*) (BRIGHETTI; CAETANO-CHANG, 1992; CAETANO-CHANG; WU, op. cit.), lençóis de areia (*sandsheets*), cortados por canais fluviais de pequeno porte e temporários. Da base para o topo ocorre um evidente processo de aridização climática, refletido na faciologia do depósito, com desaparecimento do sistema fluvial, definindo um sistema eólico úmido com proximidade à costa em clima árido.

Para Caetano-Chang e Wu (1992) o contato inferior da Formação Pirambóia com a Formação Corumbataí é discordante/erosivo no Estado de São Paulo, mas Milani (1997) e Donatti (2002) identificaram um contato é interdigitado com os siltitos costeiros permianos das formações Serra Alta (marinho profundo), Corumbataí/Teresina (lacustre/marinho raso) e Rio do Rastro (lacustre/flúvio-deltáico) (Grupo Passa Dois) na porção sul da bacia, representando uma sedimentação periférica e progradacional sobre a “bacia Rio do Rastro” no Permo-Triássico (MILANI, 1997).

O contato superior, com a Formação Botucatu, foi tido como de difícil determinação por trabalhos mais antigos (FULFARO et al., 1980 e SOARES apud

MILANI, 1997), mas o contato Pirambóia-Botucatu é dado por uma superfície de brusca mudança textural, de estruturas e de cor, definido por uma superfície regional como uma notável inconformidade (CAETANO-CHANG; WU, 1992; MILANI, 1997; DONATTI, 2002), havendo um hiato deposicional de cerca de 90 Ma entre as duas unidades (MILANI, 1997).

Landim, Soares e Gama-Júnior (1980) propõem à formação idade triássica, tendo por base relações de contato e uma superfície peneplanizada pré-Pirambóia, com provável deposição entre o Mesotriássico e o Eojurássico. Porém, Milani (1997) sugere que a idade da Formação Pirambóia seja neopermiana a eocretácica.

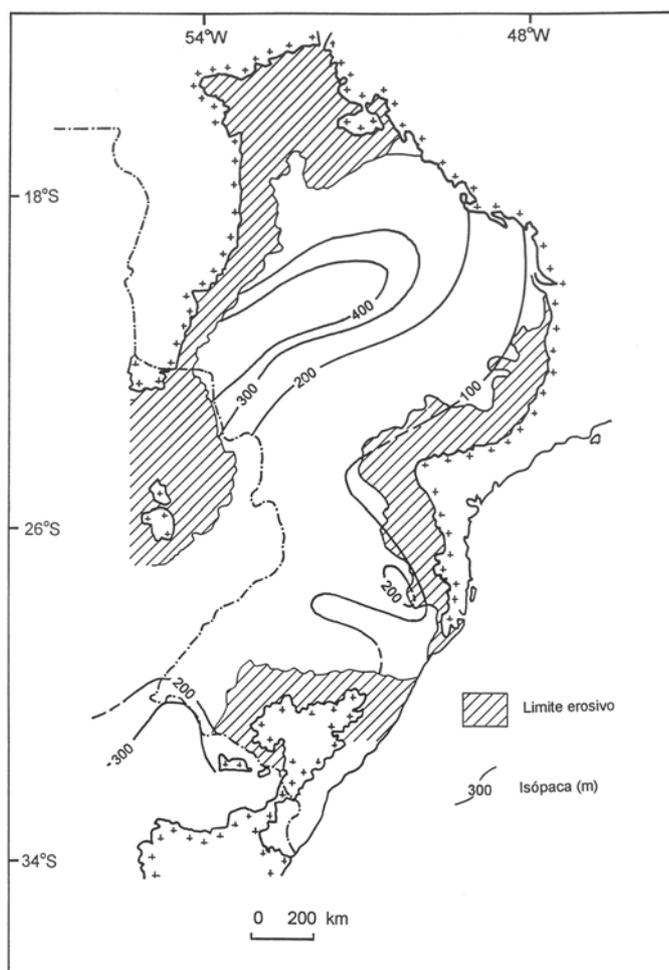
#### *Formação Botucatu*

O termo Botucatu foi primeiramente empregado por Campos apud Schneider e outros (1974) para uma “grez” e foi posteriormente melhor estudado e definido formalmente como unidade estratigráfica, sendo constituída por um pacote homogêneo de arenitos (*lato sensu*) avermelhados, bimodais (areia média a grossa e muito fina a fina, no *foreset* das cruzadas), predominando granulometria fina a média, com grãos arredondados a bem arredondados na fração grossa e subangulares a arredondados na fração fina (WU; CAETANO-CHANG, 1992), alta esfericidade e foscos, muito friáveis ou silicificados, destituídos de matriz. Para Wu e Caetano-Chang (1992) geralmente essas litologias possuem cimento ferruginoso com traço de óxi-hidróxidos de ferro e poucas argilas autigênicas nas superfícies dos grãos, precipitados de águas capilares e de infiltração por águas meteóricas. Para esses autores a Formação Botucatu possui termos classificados como quartzo-arenitos e subarcóseos, com grau de seleção bom a muito bom e maturidade textural variando de maturo a supermaturo. Localmente podem ocorrer arenitos argilosos, mas sempre com uma porcentagem de material siltico-argiloso inferior a 5%, e estratos lenticulares grosseiros (conglomerados e arenitos conglomeráticos), depositados por correntes torrenciais efêmeras e arenito grosseiros, interpretados como lençóis de areia, na base (cf. SCHERER, 2000). A presença de magnetita e ilmenita, preferencialmente euédricos na Formação Botucatu, pode ser devido à contribuição do magmatismo juro-cretácico na deposição da unidade. A abundância de cimento esmectítico nos arenitos das duas unidades é indício de ambiente de diagênese precoce com pouca água em circulação e os óxi-hidróxidos de ferro associados, principalmente na Formação Botucatu, apontam para cimentação na zona de aeração, portanto em condições de paleosuperfície freática baixa (DONATTI,

2002). Nas partes mais profundas da unidade a calcita e a dolomita são os cimentos mais abundantes (FRANÇA et al. apud MENG; MAYNARD, 2001). Donatti (op. cit.) identificou ainda a presença de paligorskita em fácies subaquosas do topo dos arenitos Pirambóia, indicando condições evaporíticas que já imperavam no final do desenvolvimento da unidade.

Os materiais da Formação Botucatu, bem como os da Formação Pirambóia, são derivados de áreas de relevo pouco acentuado, advindos de rochas cristalinas e sedimentares preexistentes, depositados em uma bacia estável, com transporte relativamente prolongado e fortemente retrabalhados por abrasão seletiva em clima semi-árido e árido de ambiente desértico, eventual e temporariamente cortado por rios (WU; CAETANO-CHANG, op. cit.). Junto à base são encontrados ventifactos localmente (ALMEIDA; MELO apud MILANI, 1997) derivados de intenso retrabalhamento eólico sobre depósitos fluviais subjacentes aos campos de dunas.

Estrutura marcante nesta unidade são estratificações cruzadas de médio e grande porte, atingindo até 15 m de altura, representando paleodunas de um ambiente essencialmente desértico, constantemente retrabalhadas pela sua instabilidade (LANCASTER apud SCHERER, 2000). Essa unidade possui espessuras variando de 100 a 40 m (Fig. 20), exceto no extremo sudoeste, onde atinge uma espessura de 700 m (MENG; MAYNARD, 2001), sendo bastante variável devido ao relevo deposicional (e.g., dunas, *draa-ergs* e zonas de deflação), erosão pré basalto e tectônica sindeposicional ou erosional (SOARES; BAGGIO, 1994). A maior parte da Formação Botucatu foi formada pela acumulação de dunas crescentes simples e compostas e dunas lineares complexas, classificadas morfodinamicamente como acamamento oblíquo, conseqüência de variações periódicas da direção do vento (SCHERER, 2000). A ausência de água, umidade, superfície cimentada ou qualquer outra feição relacionada a condições de interduna úmida implica numa superfície potenciométrica abaixo da superfície e reforça a condição climática severamente árida, provavelmente dada pela configuração paleogeográfica do Gondwana, com uma cadeia de montanhas ao longo da margem oeste, gerando extensivas zonas áridas, desenvolvendo um grande sistema de leques aluviais a leste, principal área-fonte para os sedimentos da Formação Botucatu (SCHERER, op. cit.).



**Fig. 20:** Mapa de isópacas da Formação Botucatu (modificado de MILANI, 1997)

Para Scherer (1998) a formação Botucatu é uma das mais expressivas ocorrências de depósitos continentais no mundo, cobrindo uma área de mais de 1,5 milhões de km<sup>2</sup> (SALAMUNI; BIGARELLA, 1967 apud SCHERER, 2000), sendo um excelente exemplo para o estudo de arquitetura de fácies e mecanismos de sedimentação em sistemas eólicos secos (com ausência de interdunas úmidas). É correlata à Formação Misiones no Paraguai e Rivera/Tacuarembó no Uruguai e a depósitos da Formação Etjo no continente africano.

É limitado em sua base por uma inconformidade regional que se estende por toda a bacia, gerando uma vasta superfície de deflação eólica estabelecida com o clímax de aridez do Gondwana ocidental (MILANI, 1997), e é sobreposto por rochas vulcânicas básicas a ácidas com 700 a 100 metros de espessura da Formação Serra Geral que, associado à subsidência flexural causada por seu peso, cobriu o *erg* Botucatu e preservou a morfologia das dunas eólicas, (cf. SCHERER, 2000).

A idade juro-cretácica da unidade é atribuída com base nas relações estratigráficas e conteúdo fossilífero, admitindo-se uma contemporaneidade entre o topo

da Formação Botucatu e o vulcanismo básico, evidenciado por uma passagem transicional entre as duas unidades (SCHNEIDER et al., 1974), inclusive com presença de material vulcânico (cinzas lápilis e bombas de basalto vesicular) no arenito eólico (ALMEIDA et. al., 1981) e com a sedimentação prosseguindo, formando corpos de arenito “intertrapeano” até que a área fonte das areias ou as dunas fossem recobertas pelos magmatitos (STURARO, 1988). A acumulação eólica dos campos de dunas teve início no Neojurássico, cerca de 150 Ma (BONAPARTE apud MILANI, 1997), marcando um rebaixamento do nível de base, definido por extensa superfície erosiva interregional, produzido por processos alocíclicos e induzidos por processos tectônicos/climáticos (FACCINI, 1997), precedendo o estiramento litosférico e estendendo-se durante o início do vulcanismo basáltico da ruptura do Gondwana. A idade de 132 Ma para a sucessão vulcânica no Rio Grande do Sul, por datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  é tomada como marcador geocronológico do fim da sedimentação da Formação Botucatu segundo Scherer (2000), ao menos naquela região. Scherer (op. cit.) acredita que o desenvolvimento dos campos de dunas eólicas se desenvolveu num curto intervalo de tempo, não superior a algumas centenas de milhares de anos.

Em um estudo mais recente Donatti (2002), estudando as fácies arenosas da Formação Pirambóia e Botucatu no Estado do Paraná, subdividiu os depósitos em quatro associações faciológicas com posicionamento estratigráfico distinto de forma evolutivamente mais clara e coerente com os processos de continentalização e aridização da Bacia do Paraná. Segundo o autor, da base para o topo da sedimentação Pirambóia-Botucatu, tem-se: a) lençóis de areia (*sandsheets*) em planície de maré; b) campo de dunas costeiro com planícies interdunas inundadas; c) planície aluvial com rios entrelaçados (*braided*) e dunas eólicas incipientes; e d) campo de dunas seco. Essas três primeiras associações caracterizam registro do sistema deposicional eólico úmido Pirambóia, i.e., com superfície freática próxima à superfície, provavelmente pela proximidade da paleocosta (DONATTI, 2002), inclusive com gretas de contração, icnofósseis e impressões salinas (NOWATZKI; KERN, 2000). A quarta associação faciológica, de campo de dunas seco, sobrepondo-se abruptamente aos depósitos flúvio-eólicos do sistema Pirambóia, correspondendo ao sistema deposicional seco Botucatu. Esse contraste entre os dois sistemas define a inconformidade regional das unidades. O sistema seco teria sido interrompido pela superfície de extensão regional/bacinal ligada à manifestação do evento vulcânico Serra Geral. Interpretou-se ainda a existência de dois influxos de sedimentos do sistema Pirambóia pela distribuição geográfica das fácies e vetores modais do azimute das estratificações cruzadas eólicas, indicando um aporte

continental, proveniente do norte, e outro costeiro, do sul, com uma convergência de paleoventos possivelmente associada à existência de um paleoalto na região do lineamento de Guapiara (DONATTI, 2002). O sistema Botucatu, por sua vez, teria sido dominado por um influxo a partir de sudoeste e sudeste, com aumento de dispersão para o topo, tal como identificado por Scherer (2000).

O gigantesco paleodeserto Botucatu foi seguido pelo magmatismo eocretácico da Formação Serra Geral, manifestado como um extenso vulcanismo continental (de cerca de 2.000 m de espessura, no Pontal do Paranapanema - MILANI, 1997) relacionado aos processos extensionais que conduziram à ruptura do Gondwana, definindo a maior manifestação ígnea não oceânica no Fanerozóico e gerando muitas falhas e lineamentos na Formação Botucatu, além de algum dobramento (SILVA, 1983 apud MENG; MAYNARD, 2001).

Por sua alta porosidade, permeabilidade, homogeneidade, continuidade e dimensões, as formações Pirambóia e Botucatu constituem um dos maiores aquíferos do mundo, senão o maior deles, o Aquífero Guarani. Na área de estudo a Formação Botucatu aflora na porção leste do município de Ribeirão Preto, perfazendo a área de recarga do aquífero, que será melhor discutido mais adiante.

#### *Formação Serra Geral*

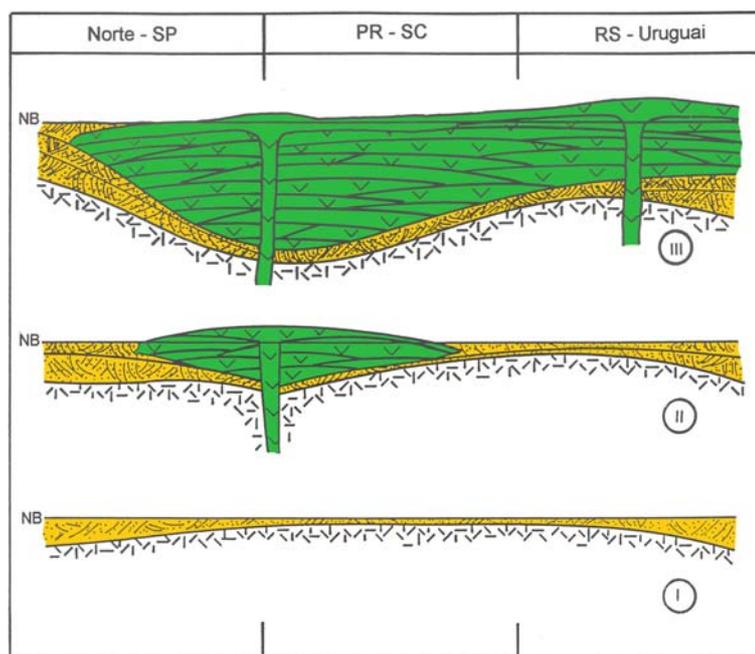
A Formação Serra Geral, associada à ruptura do oeste do Gondwana, é composta essencialmente por basaltos (*lato sensu*), mas também por riódacitos e riólitos (cerca de 4% da lava total e com espessura de até 400 m) sobrepondo-os. Composicionalmente associados às rochas efusivas são observados diques e soleiras (*sills*), estas intrudidas nos sedimentos da bacia. A Província Paraná-Etendeka formava uma única província magmática no início da ruptura do Gondwana com um volume de mais de 800 mil km<sup>3</sup>. As lavas na Bacia do Paraná cobrem uma área superior a 1,2 milhões de km<sup>2</sup>, mais de 15 vezes maior que as lavas de Etendeka (Namíbia), com cerca de 78 mil km<sup>2</sup> na Placa Africana. São observados diques paralelamente à costa brasileira do Estado de São Paulo ao Uruguai e enxames de diques de direção NW-SE que afloram no Paraguai e Arco de Ponta Grossa. As soleiras mais espessas são encontradas em sedimentos do Grupo Itararé e Formação Irati, apesar de também serem encontrados na Formação Botucatu e reconhecidos na própria Formação Serra Geral. Essas intrusões variam de 2 a 250 m de espessura e podem ter uma área de até 900 m<sup>2</sup>, além de formar lacólitos (cf. MANTOVANI et al., 2000).

O magmatismo mesozóico da Bacia do Paraná apresenta características regionais relacionadas a anomalias químicas, indicando uma pluralidade de fontes e mecanismos na formação do magma. O derrame vulcânico continental da Bacia do Paraná é composto em mais de 90% em volume por basaltos toleíticos e andesito basáltico, geralmente exibindo vesículas e amídalas no topo do derrame. Na porção sudeste da bacia, adjacente à margem continental, significativas quantidades de rochas ácidas formam a porção superior da seqüência vulcânica.

Piccirillo e outros (1988 apud MANTOVANI et al., 2000) classificaram os litotipos em três grupos: um ao sul do Rio Uruguai, caracterizado predominantemente por basalto toleítico, andesito e riodacito-riólitos com baixo titânio, denominados tipo Palma; outro a norte do Rio Piquiri, com predominância de basalto toleítico e riodacito-riólitos, com alto titânio, denominado tipo Chapecó; e um terceiro setor entre os dois anteriores onde ocorrem as duas composições anteriores. Nardy e outros (1995) propuseram a classificação das rochas em duas unidades, Membro Palmas e Membro Chapecó. Peate e outros apud Mantovani e outros (2000), baseados em estudos geoquímicos mais detalhados, sugeriram a classificação dos basaltos, andesitos e riodacitos em 6 unidades: tipo Gramado, Urubici, Esmeralda, Ribeira, Paranapanema e Pitanga, além dos riólitos e diques e soleiras de intrusivas associadas.

Assim, para a porção central e norte, onde a seqüência é mais espessa, são presente 3 tipos principais de magma basáltico (tipos Pitanga, Paranapanema e Ribeira), gerados por diferentes graus de fusão parcial de fontes similares. No entanto, o magma da porção sul da bacia, do tipo Gramado, é muito diferente, mais afetado por processos de contaminação crustal e possivelmente derivados de fontes anteriormente diferenciadas. O tipo Urubici é similar aos litotipos da porção do norte do Paraná e o tipo Esmeralda é, possivelmente, resultado da erupção contemporânea à ruptura com uma assinatura astenosférica. Não existe uma correlação cronoestratigráfica entre os diferentes tipos de magma. (MANTOVANI et al., 2000).

Para Milani (1997) o empilhamento da Superseqüência Gondwana II (com as formações Botucatu e Serra Geral), reflete a evolução da bacia onde é possível notar: a) o desenvolvimento do magmatismo a partir da região centro-norte da bacia, expandindo-se a seguir para o sul, segundo o padrão de idades de Turner e outros (1994 apud MILANI, 1997); b) o fenômeno de flexura imposta ao substrato pela massa vulcânica; c) a possibilidade implícita neste modelo de que, na porção norte da bacia, o deserto Botucatu tenha tido um desenvolvimento continuado, acompanhando o extravasamento de lavas, que naquela época não chegara a recobri-lo inteiramente (Fig. 21).



**Fig. 21:** Diagrama esquemático, sem escala, ilustrando o empilhamento da Superseqüência Gondwana II da Bacia do Paraná. I – Meso/Neojurássico, II – Eocretáceo “a” (advento do magmatismo), III – Eocretáceo “b” (instantes finais do evento ígneo) (MILANI, 1997)

Para diversos estudos geocronológicos atuais o evento magmático da Bacia do Paraná tem idades de 138-126 Ma, talvez com um clímax entre 133 e 131 Ma (cf. MANTOVANI et al., 2000). A análise dos dados cronológicos, segundo Turner e outros (1994 apud MILANI, 1997), sugere uma migração do magmatismo de NW para SE com o tempo. A taxa de erupção também foi variável no tempo de 0,03 km/ano entre 138-135 Ma, para mais de 0,13 km/ano entre 135-133 Ma e 0,21 km/ano entre 133-131 Ma, sobrepondo 600 m de basalto em cerca de 1 Ma intercalado com dunas de areia “intertrapeanas” correlatas à Formação Botucatu, com até 10 m de espessura, entre os fluxos, indicando longos períodos de quiescência. A duração total do magmatismo Paraná parece ser de 10 Ma, em contraste ao curto intervalo de tempo de erupção inferida para muitos derrames basálticos continentais e consistente com um modelo de magma produzido pela condução de calor de manto litosférico heterogêneo e com voláteis.

Os dados, segundo Mantovani e outros (2000) são consistentes para indicar a presença de uma anomalia termal (pluma) abaixo da América do Sul enquanto o oeste do Gondwana se movia para noroeste, com deformações extensionais através do enxame de dique de Ponta Grossa. O magmatismo foi inicialmente caracterizado por pequenas extensões e relativamente baixas taxas de erupção, que foi seguido por um magmatismo mais acentuado com grandes extensões através do Proto-Atlântico,

resultando em altas taxas de erupção e grande volume de rochas silicáticas. A espessura anormal da litosfera gerada causou então longos períodos de quiescência.

## **5.2. Geologia Estrutural**

A Bacia do Paraná possui um arcabouço estrutural e evolução que refletem as grandes estruturas do seu embasamento, sendo que a partir destes grandes traços, que compõem linhas de fraqueza, são condicionadas as respostas às atividades tectônicas impostas, tanto na geração e favorecimento de falhamentos, como também na sedimentação.

Regionalmente, segundo Soares (1974), a Bacia do Paraná possui três compartimentos definidos como homoclinais sub-horizontais com mergulhos tendendo para direções convergentes. Soares (1974) usou o termo homoclinal para definir um mergulho que apresenta uma variação sistemática da periferia para o interior da bacia, deve definir topograficamente uma deriva (drift) dos valores de elevação do terreno com vergência para oeste na bacia do Rio Pardo. Este homoclinal na região possui uma vergência de cerca de 1° para a calha do Rio Paraná, i.e., um mergulho para oeste. A Bacia do Paraná é cortada por arcos (e.g., Arco de Ponta Grossa, Arco de Campo grande e Arco Rio Grande), assim como por lineamentos tectônico e/ou magnéticos (e.g., Guapiara, Rio Piquiri e Rio Uruguai) e o Sinclinal de Torres. Os arcos desenvolveram-se do Devoniano até o Triássico-Jurássico (FULFARO et al., 1982). O Arco de Ponta Grossa, cruzando cerca de 600 km e expondo a parte interna da bacia, afetou a sedimentação desde o Devoniano e é principalmente caracterizado por (cf. MANTOVANI et al., 2000): a) um grande número de diques básicos alinhados a NW, correspondendo a parte das estruturas fontes do vulcanismo; b) uma tendência magnética NW (e.g., Guapiara, S. Jerônimo e Rio Alonzo); e c) zonas de fratura na placa oceânica.

Segundo Zalán e outros (1987) a litologia das formações intrudidas por magmas têm grande influência na estruturação observada durante a essa intrusão, possuindo um comportamento rúptil, para as formações ricas em arenitos (Pirambóia e Botucatu, no caso), tendo como resposta mais comum à deformação, fraturamento e falhamento, com predominância de diques.

Manifestações neotectônicas, com falhamentos eminentemente transcorrentes, foram atribuídas ao Neogeno-Quaternário por Hasui (1990) e Faccincani e outros (1994). Essas discontinuidades hoje são fatores reguladores, ainda que secundários, do fluxo e

armazenamento dos fluidos subsuperficiais confinados, tendo importância maior revelada nas fraturas do basalto Serra Geral.

Tratado como uma unidade hidrogeológica por Fraga (1986) a Formação Serra Geral armazena água subterrânea condicionada a fatores de ordem genética e tectônica, sendo o primeiro fator condicionante intrínseco da permeabilidade horizontal e o segundo da permeabilidade vertical, a qual intercomunica as estruturas aquíferas interderrames, evidenciando a relevância dessa estruturação tectônica, recente ou não.

A porção do NNE paulista possui forte controle estrutural (WERNICK; SINELLI, 1970; SOARES, 1974) com acentuado condicionamento da hidrografia expresso pelo paralelismo dos rios Pardo, Moji e Sapucaí e a retilinidade de longos segmentos da rede de drenagem (SINELLI, 1971b). Sinelli (1970) identificou uma “depressão” onde se insere o município de Ribeirão Preto, rebaixada estruturalmente e ressaltada pelo contato entre as formações Serra Geral e Botucatu, principalmente em perfil EW de Ribeirão Preto a Cravinhos e pela profundidade da base da Formação Pirambóia abaixo de 300m (Sturaro, 1988). Posteriormente, Sinelli (1971a) identificou a grande importância das estruturas para a recarga de águas subterrâneas na região.

### **5.3. Aspectos Geotécnicos**

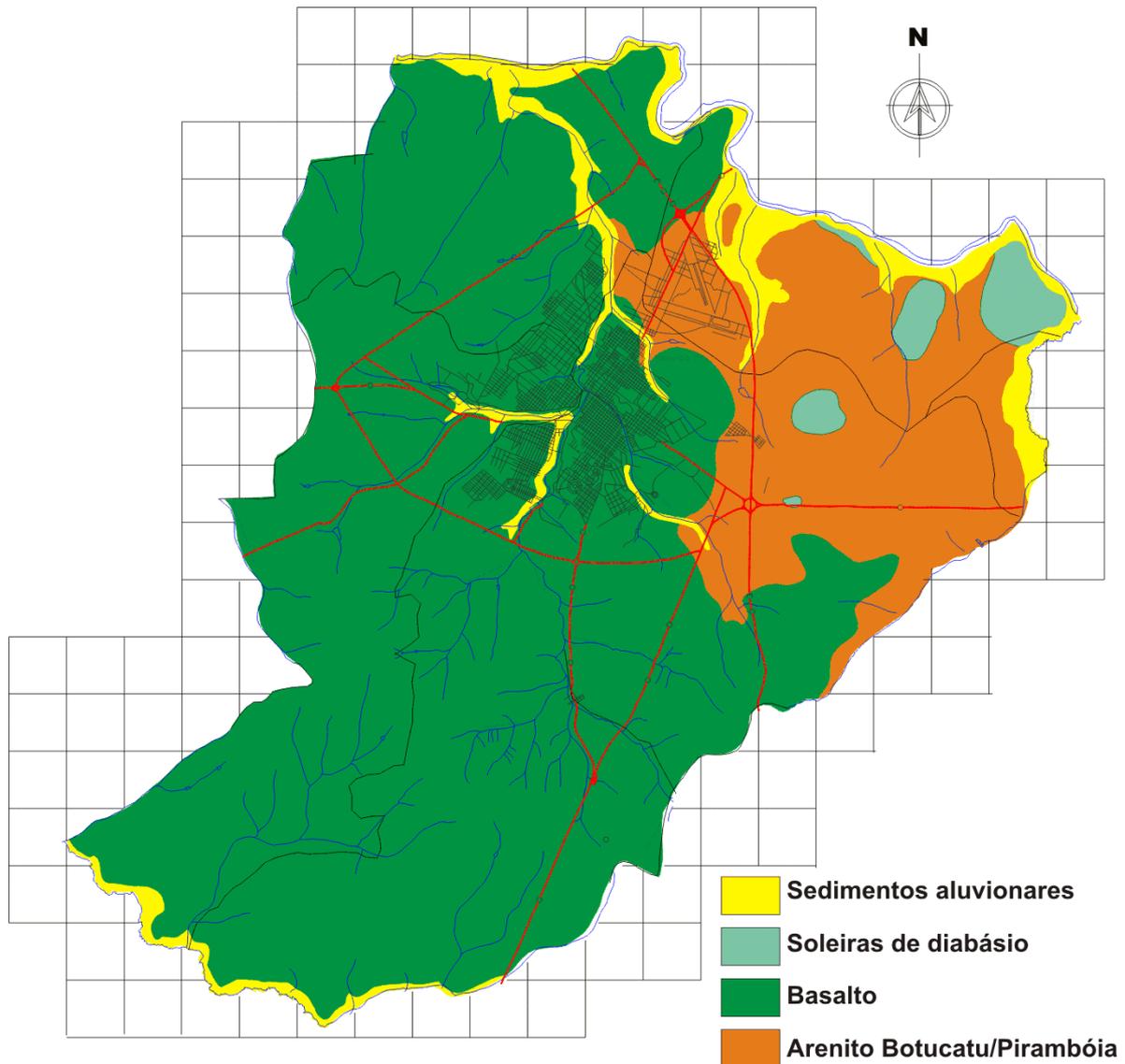
A Carta Geotécnica do Estado de São Paulo (IPT, 1994a), na escala 1:500.000 apresenta o município de Ribeirão Preto com área predominantemente de baixa suscetibilidade ao desenvolvimento dos diversos processos analisados, porém, os aluviões do Rio Pardo foram classificados como altamente suscetíveis a inundações, recalques, assoreamento e solapamento de suas margens e as áreas de aforamento dos "Arenitos Botucatu" possuindo alta suscetibilidade à erosão por sulcos, ravinas e boçorocas de grande porte, predominantemente induzida por concentração do escoamento superficial.

É comum a ocorrência de recalques nas fundações provocadas pelo rebaixamento da superfície freática, que acontece se a pressão efetiva no solo da fundação da estrutura sofrer um acréscimo, resultante da diminuição da pressão neutra mantida pelo nível de água, suficiente para ultrapassar a sua pressão pré-adensamento, sofrendo ainda recalques diferenciais mais acentuados se as fundações estiverem mais distantes desse “sistema de rebaixamento”, com menor efeito de variação da superfície potenciométrica (GAIOTO, 1997). Ainda não se tem registro em Ribeirão Preto desse tipo de recalque, mas é um problema potencial já que existe um rebaixamento do nível

potenciométrico.

## 6. Geologia Local

A geologia da área é, assim, basicamente formada por basaltos, com arenito aflorando na porção nordeste do município e alguns corpos de rochas básicas formando soleiras, além de sedimentos aluvionares recentes nas drenagens (Fig. 22).



**Fig. 22:** Esboço da geologia de Ribeirão Preto, SP (mod. RIBEIRÃO PRETO/SEPLAN, 1994)

Na região afloram 70% dos magmatitos da Formação Serra Geral, seguidos por 18% de arenitos da Formação Botucatu, 8% de arenitos e siltitos da Formação Pirambóia e 4% das intrusivas básicas associadas (IAC, 1987). Os arenitos da Formação Pirambóia são aflorantes somente onde o entalhe das drenagens é mais

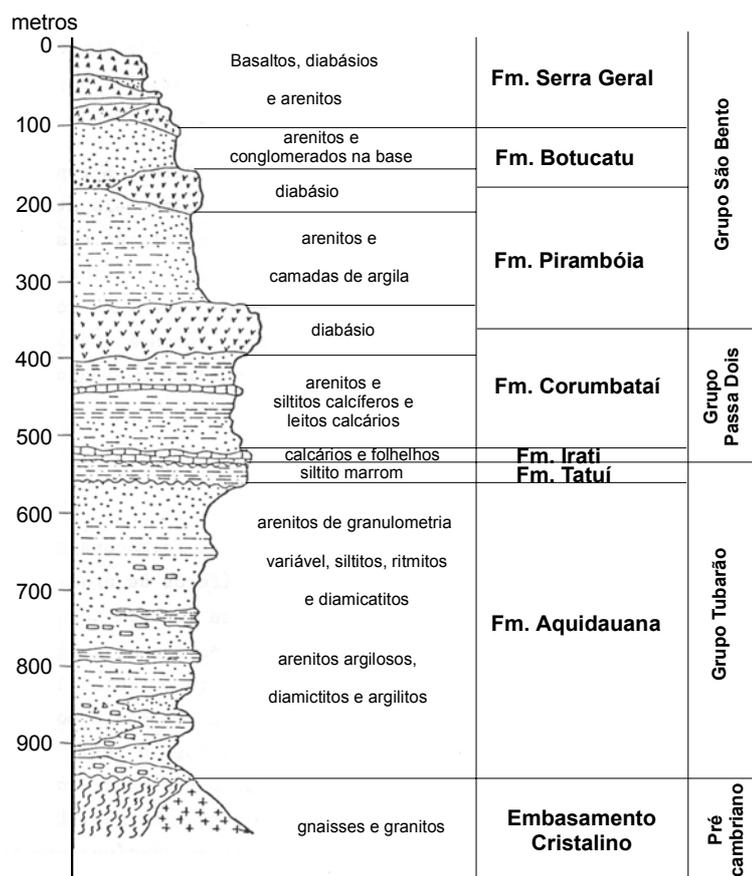
acentuado e se restringem às Quadrículas de Cravinhos e Serrana, no extremo leste do município de Ribeirão Preto (PENALVA et al., 1973).

Os basaltos toleíticos, do tipo Pitanga, perfazem a litologia predominante na área de estudo e sua decomposição (pedogênese) dá origem principalmente ao latossolo vermelho escuro (terra roxa), de grande relevância econômica para a região, com uso direto para a monocultura de cana-de-açúcar.

Na área ocorrem ainda, concordante aos arenitos da Formação Botucatu, soleiras (*sill*) de diabásio, principalmente na porção norte de nordeste do município. Soares (1973) relata que é difícil a determinação se os corpos são formados por extrusão de lavas ou intrusões, dificultando o entendimento das relações estratigráficas. Davino e outros (1982 apud STURARO, 1988) acreditam que, na região de Ribeirão Preto, encontram-se somente corpos intrusivos, dado o baixo nível topográfico da região em relação às áreas vizinhas, pois que os basaltos deveriam localizar-se acima de 900 m, sendo assim raros ou ausentes basaltos na região. A existência de soleiras de diabásio intrudidas no arenito compromete a produção do Aqüífero Guarani, como identificado por Sturaro (1988), bem como as relações de contato e estruturas tectônicas e/ou sedimentares.

Ocupando cerca de 70% em superfície da área de estudo e espessura média de 70 m (STURARO, 1988) os basaltos adelgaçam-se para leste. Sinelli (1970) verificou que o topo e a base do derrame na região geralmente apresenta vesículas e/ou amígdalas (preenchidas principalmente por zeólitas) e com textura compacta na porção mais central. Gomes e Rodrigues (1999) reconhecem a compartimentação entablamento-colunata dos basaltos de Ribeirão Preto, que chegam a atingir 60 metros de entablamento, permitindo conclusões paleoclimáticas e direcionando a exploração econômica desse material segundo critérios geológico-geotécnicos.

Com essa síntese das unidades mais importantes o desenvolvimento desse trabalho, pertencentes ao Grupo São Bento, pode-se compreender a porção superior da coluna estratigráfica da região apresentada na Figura 23.



**Fig. 23:** Coluna estratigráfica do município de Ribeirão Preto, litotipos e unidades estratigráficas (modificado de DAERP/USP, 1979 por CERVI, 1981 e adaptado neste)

Sinelli e Davino (1973), através de perfil magnetométricos e de eletrorresistividade ao sul da cidade de Ribeirão Preto, evidenciaram a existência de uma tectônica de tipo horst-gráben, com falhamentos escalonados e apresentando rejeitos da ordem de algumas dezenas de metros, sendo que a cidade de Ribeirão Preto corresponde a um baixo estrutural, tendo como centro praticamente a cidade de Ribeirão Preto (LANDIM; SINELLI; CASTRO, 1973).

Fontes e Souza (1997), fazendo uso de Sistema de Informação Geográfica, desenvolveu estudo de susceptibilidade à erosão, recuperação da vegetação natural e assoreamento crítico. O estudo de susceptibilidade à erosão (erroneamente denominada no trabalho de risco de erosão) foi baseado na declividade e tipo de solo, classificando as áreas em susceptibilidade baixa, média, alta e muito alta, para classes de declividade de 0-2,5%, 2,5-5%, 5-12%, 12-25%, >25% e classes de solo de latossolos roxo, vermelho escuro e vermelho amarelo e terra roxa estruturada, todos em uma só classe, uma classe de areia quartzosa e outra de solos litólicos. Fontes e Souza (1997) sugerem que as áreas a serem recuperadas e preservadas são somente mata ciliar da faixa marginal de proteção dos corpos d'água e as várzeas, perfazendo um total de 768,5 ha de

vegetação remanescente, contra um total de 5.560,0 ha de área de vegetação a ser recuperada, sendo esta discrepância resultante de uma cultura de agricultura monocultura extensiva cafeeira e canvieira. O geoprocessamento da informação levou Fontes e Souza (1997) a concluir que a maior probabilidade de assoreamento concentram-se próximas às nascentes de rios, apresentando as maiores declividades e localizando-se no divisor de águas dos rios Moji-Guaçu e Pardo, na porção centro sul do município de Ribeirão Preto.

Zuquette e outros (1994) identificaram grande número de unidades com limitações por inundação, erosão, problemas de fundação, poluição de aquífero e solos, áreas com solos de pequena profundidade, rebaixamento do nível d'água e problemas para a agricultura. A carta de zoneamento geotécnico, especificamente elaborada para a disposição de resíduos e rejeitos, no município de Ribeirão Preto permitiu verificar que não existem áreas caracterizadas geológico-geotecnicamente como totalmente favoráveis à instalação desse empreendimento (ZUQUETTE et al., 1995), porém existem algumas áreas com condições adequadas para instalação de aterros sanitários, tanques sépticos e fossas, bem como ocupações residenciais e industriais (ZUQUETTE et al. 1994).

Zuquette e outros (1991) apresentaram o mapa de risco da região de Ribeirão Preto, definindo 8 unidades com problemas de enchentes anuais e esporádicas, fundações, drenabilidade, saneamento, escoamento de águas superficiais, canalizações, traçado de ruas, escavações, aterros, cortes, obras enterradas e suas interligações, erosão, contaminação da água subterrânea, fertilidade do solo, blocos rolados e inflamabilidade (por turfeiras). A maior parte da região apresenta ao menos um tipo de limitação, mas a maioria é decorrente de limitações contornáveis do meio físico, porém não detectados antes da ocupação.

## **7. Recursos Hídricos em Ribeirão Preto**

### ***7.1. Águas Superficiais***

O município de Ribeirão Preto insere-se nas Bacias do Rio Pardo e Rio Moji-Guaçu, sendo gerido pelo Comitê da Bacia do Rio Pardo.

A região de Ribeirão Preto foi apontada pela Agência Nacional de Águas (ANA) como prioritária, dado o conflito entre demanda industrial (usinas de cana-de-açúcar e álcool) e humana na região do Baixo Pardo/Mogi, pertencente à Bacia Hidrográfica do Paraná (ANA, 2002).

Os principais instrumentos de gestão municipal de recursos hídricos serão: a Avaliação Anual de Recursos Hídricos; e o Plano Quadrienal de Recursos Hídricos (PLANÁGUA), conforme previsto no Projeto de Lei Complementar do Código do Meio Ambiente (RIBEIRÃO PRETO, 2003).

No que concerne às características hidrológicas e dos recursos hídricos superficiais, a região de Ribeirão Preto apresenta seus principais cursos de água correndo no sentido oeste e noroeste, acompanhando a inclinação das camadas, estruturalmente com leve inclinação para a direção da calha do Rio Paraná.

O município de Ribeirão Preto insere-se na 7ª Zona Hidrográfica do Estado de São Paulo, integrada pelas bacias hidrográficas dos rios Pardo, Sapucaí-Mirim e Moji-Guaçu (CETESB, 1990) (Fig. 24). O comportamento hidrológico dos rios da 7ª zona está em estreita relação com o regime pluviométrico, ou seja, as altas águas se concentram nos meses mais chuvosos, culminando no outono, sendo registrado as descargas mínimas no mês de setembro. A água armazenada durante o período chuvoso é escoada lentamente, alimentando as descargas durante o período de estiagem.

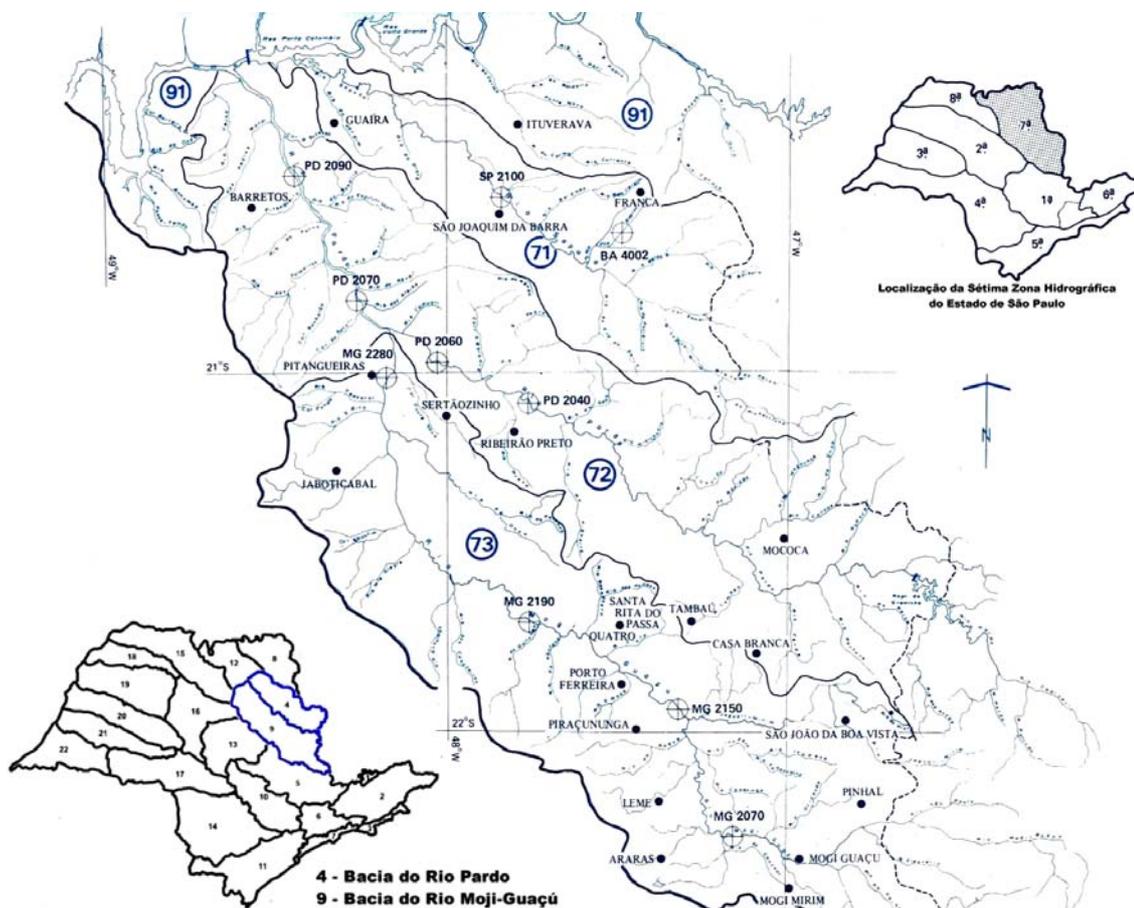


Fig. 24: Mapa da 7ª Zona Hidrográfica do Estado de São Paulo (modificado de CETESB, 1989)

O Rio Pardo nasce no Estado de Minas Gerais, próximo da fronteira com São Paulo, podendo ser considerado como o maior rio da região, sendo um dos grandes afluentes do Rio Grande, pela margem esquerda e tendo como principal afluente o Rio Moji-Guaçu. No Estado de São Paulo sua área de drenagem é de 8.818 km<sup>2</sup>, percorrendo 240 km desde a sua nascente até a foz do Rio Moji-Guaçu (CETESB, 1998b).

Santos apud Francisco (1996) observa que o Rio Moji-Guaçu banha uma área de 470 km<sup>2</sup>, nascendo no Estado de Minas Gerais, nas proximidades da cidade de Borda da Mata e percorrendo a parte central da região delimitando as regiões do baixo e médio Pardo. O Rio Sapucaí-Mirim drena uma área de 5.365 km<sup>2</sup>, tendo sua nascente no Estado de Minas Gerais nas proximidades de Monte Santo e percorrendo 299 km na área das Cuestas Basálticas, correndo no sentido sudeste-noroeste, sendo afluente do Rio Grande.

O município de Ribeirão Preto apresenta-se limitado ao sul pelo Córrego da Onça e ao norte pelo rio Pardo. O ribeirão Preto nasce no sul do município, corre no sentido sul-norte e atravessa a área urbanizada, desaguando no Rio Pardo. O Córrego da Onça, afluente do Rio Moji-Guaçu é o limite natural com o município de Guatapará. Os córregos: Monte Alegre, da Macaúba, do Retiro Saudoso, Santa Amélia, da Liberdade, além de uma lagoa principal no câmpus da Universidade de São Paulo (USP) também compõem a rede hidrográfica de Ribeirão Preto.

A região de Ribeirão Preto apesar de ser beneficiada pela riqueza das águas superficiais possui problemas de poluição decorrentes do lançamento de resíduos sólidos e efluentes domésticos e industriais, sendo que este último, no caso específico de Ribeirão Preto, está principalmente relacionado às usinas de açúcar e álcool (Fig. 25).

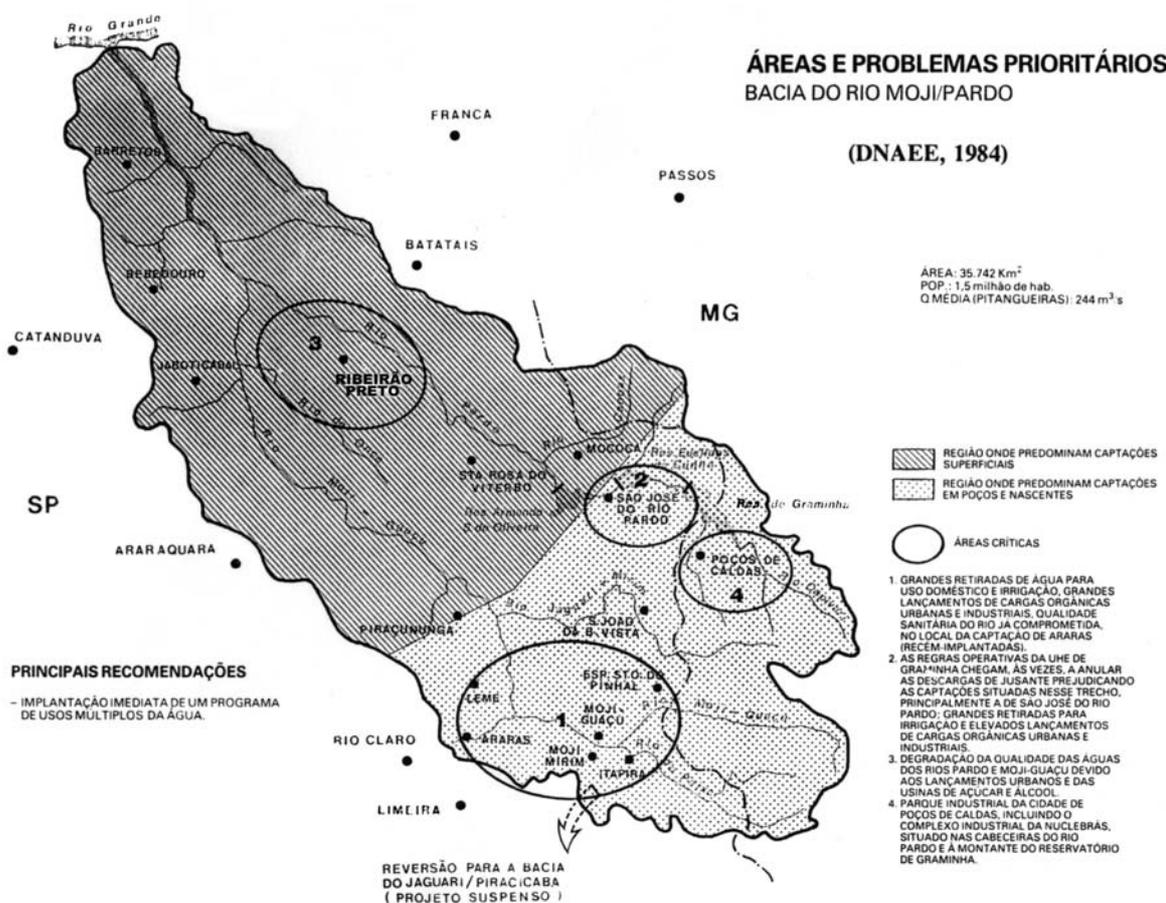
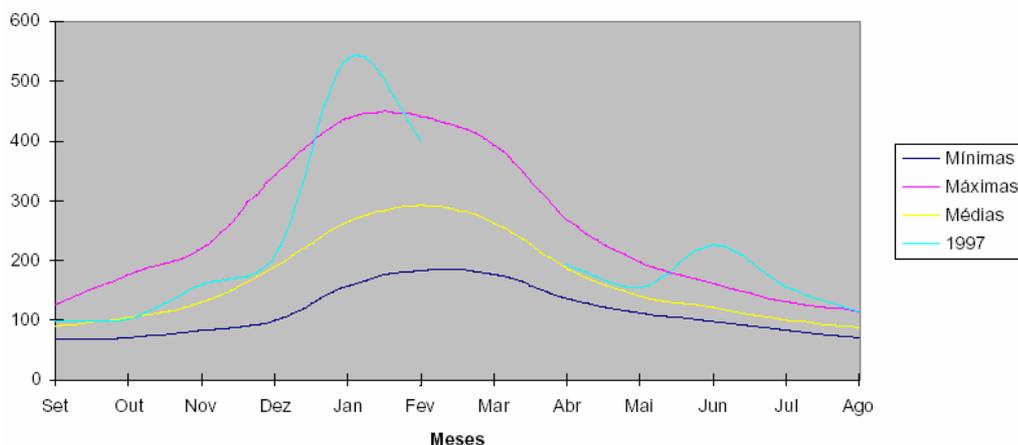


Fig. 25: Áreas e problemas prioritários da Bacia do Rio Moji/Pardo (DAEE, 1984)

Com a criação das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI's) pela Lei Estadual 9.034 (de 27 de dezembro de 1994) a região de Ribeirão Preto passou a pertencer à UGRHI 4 – Pardo. Atualmente estão sendo implementados diversos projetos de tratamento de esgoto e efluentes para melhorar a qualidade das águas na região.

A sub-bacia do Ribeirão da Prata/Ribeirão Tamanduá (Fig. 26), onde se insere o município de Ribeirão Preto, possui uma vazão média de 26,0 m<sup>3</sup>/s e uma vazão mínima de sete dias consecutivos com período de retorno de 10 anos (Q<sub>7,10</sub>) de 5,60 m<sup>3</sup>/s.

**Fluviograma com vazões médias mensais (de 1941 a 1997)**  
**Posto 4C-001 - Rio Pardo - Sub-bacia do Ribeirão**  
**da Prata/Tamanduá**



**Fig. 26:** Fluviograma da sub-bacia do Rib. da Prata/Tamanduá (CBH-PARDO, 2003)

### *Enchentes*

Segundo dados do Engenheiro Civil Paulo César Motta Barbosa (informação verbal em 2000) (SEPLAN - Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Ambiental de Ribeirão Preto) o município enfrenta problemas de enchentes que se agravam a cada ano, quando no período de chuvas o Ribeirão Preto e o Córrego Retiro Saudoso aumentam sua vazão e ocupam suas várzeas, atingindo diversas residências e estabelecimentos comerciais, principalmente na Vila Cristina (Avenida Álvaro de Lima) e no Centro (Avenida Jerônimo Gonçalves e Francisco Junqueira, importantes vias de acesso do município).

O DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) e o BID (Banco Interamericano de Desenvolvimento) têm um projeto orçado em 500 milhões USD (dólares norte-americanos). Prevê-se que Ribeirão Preto necessitaria de 27 milhões USD para obras contra as enchentes, tais como construção de barragens e readequação de canais (principalmente desassoreamento).

### **7.2. Águas Subterrâneas**

Ribeirão Preto (SP) obtém água diretamente dos arenitos da Formação Botucatu/Pirambóia, na Bacia Sedimentar do Paraná, compondo o Aquífero Guarani, fazendo-se necessário um entendimento mais pormenorizado desse reservatório. Neste trabalho é dada atenção ao Aquífero Guarani e não aos outros aquíferos da província, tampouco o aquífero fissural Serra Geral, de onde alguns poucos poços em Ribeirão Preto obtém água.

### *Abastecimento e Saneamento Ambiental*

Ribeirão Preto tem o abastecimento hídrico de certa forma assegurado pelas características geológicas e hidráulicas, pois em encontrando-se em borda de bacia, possui uma menor espessura de camadas, responsável pela pressão litostática, viabilizando a perfuração de poços, além de sua menor espessura garantir melhores condições hidrogeoquímicas para a água.

O primeiro poço perfurado em Ribeirão Preto data de 1920, locado no Mosteiro São Bento (informação oral do Prof. Osmar Sinelli).

Dos 164 poços tubulares operados pelo DAERP, 86 estão em funcionamento simultâneo, produzindo mais de 264 milhões de litros de água por dia (ou 11 mil m<sup>3</sup>/h). Para cerca de 400 poços que dispõe o município a produção total é de 80 mil m<sup>3</sup>/h (ZUQUETTE et al., 1994). A água distribuída pelo DAERP, clorada e fluoretada, é conduzida por tubulações até os 47 reservatórios que dispõe, que acumulam 57 milhões de litros de água, de onde é distribuída por 1.024 km de redes de abastecimento até os usuários finais.

Segundo dados do DAERP o município de Ribeirão Preto tem uma produção de 3,14 m<sup>3</sup>/s de água para abastecimento público, sendo totalmente de origem subterrânea, de qualidade excepcional para consumo, pelas próprias características do aquífero, para atender a toda população do município.

Além do uso para abastecimento público, o setor industrial também se utiliza desse recurso, incluindo indústrias de médio e pequeno porte (alimentícias, bebidas, têxteis), necessitando de água de boa qualidade para seus processos e produtos, bem como, uso para irrigação, cujo consumo não se enquadra na categoria de abastecimento público.

O saneamento ambiental em Ribeirão Preto seria exemplar, com 99,5% das residências abrangidas pelas ligações da rede de tratamento, 100% com ligação de água e coleta de lixo e 97,5% com ligação de esgoto, no perímetro urbano. Porém grande parte do esgoto ainda é lançada *in natura* nos cursos d'água.

O DAERP, após a sua criação em 1974, pela Lei nº 2.896 que desmembrou o antigo DAET (Depto. de Água, Esgotos e Telefonia) em CETERP (Centrais Telefônicas de Ribeirão Preto) e DAERP, determinou sua finalidade e passou a administrar exclusivamente os serviços de água e esgotos do município, atendendo hoje toda a população de mais de meio milhão de habitantes.

O município já tem determinada a construção de duas ETE (Estações de Tratamento de Esgoto), uma próxima à confluência do Ribeirão Preto com o Rio Pardo, onde será ligado o emissário de esgoto, e outro na juzante do Córrego das Palmeiras, que trataria 100% do esgoto (Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental, informação verbal).

### *Qualidade e Contaminação das Águas Subterrâneas*

As águas superficiais da UGRHI 4-Pardo são classificadas, segundo o Índice de Qualidade das Águas (IQA) (CETESB, 1998a), como boa (83%) a aceitável (17%), em classes de péssima, ruim, aceitável, boa e ótima, quando em todo o Estado de São Paulo temos: 13% - ótima, 51% - boa, 16% - aceitável, 13% - ruim e 7% - péssima. Nas análises dos três pontos (Tab. 08) de coletas da CETESB (1998a) no Rio Pardo (sendo PARD02500 e PARD02600 os mais próximos de Ribeirão Preto) são identificadas diversas não-conformidades com os padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA 20/86 e Decreto Estadual 8.468/97, nos parâmetros de: pH, fósforo total (PT), coliformes totais e fecais, fenóis, mercúrio (Hg) e manganês (Mn), indicando que o rio deve estar recebendo lançamentos de esgotos domésticos possivelmente sem nenhum tratamento, mas sem identificar toxicidade nas amostras analisadas.

**Tab. 08:** *Localização dos pontos de amostragem da CETESB*

PONTO DE AMOSTRAGEM	LOCALIZAÇÃO
PARD02100	Ponte na rodovia SP-340, no trecho que liga Casa Branca a Mococa
PARD02500	Margem esquerda, no Clube de regatas de Ribeirão Preto
PARD02600	Margem direita, a 50m da ponte na rodovia que liga Pontal a Cândia

A UGRHI 4 – Pardo possui uma área de drenagem de 8.818 km<sup>2</sup>, atendendo uma população de 883.984 habitantes (809.937 hab. na zona urbana e 74.047 hab. na zona rural), porém, a água não se apresenta dentro de padrões de potabilidade, não sendo indicada também para diversos outros usos, daí a necessidade de se buscar os recursos hídricos subterrâneos.

Segundo CETESB (1990), a Bacia do Pardo apresenta uma carga orgânica total remanescente de 99.870 kg DBO/dia, sendo 57% de carga industrial e 43% de doméstica, caracterizada pela ausência de tratamento de esgotos em 25 municípios que lançam essas cargas *in natura* no seu curso.

A atividade industrial nesta bacia está vinculada ao uso agrícola, tendo como principais produtos: café (16,9% da área), cana-de-açúcar (13,5%), milho (7,6%), soja (6,8%), cítricos (4,3%) e reflorestamento (4%). À exceção do milho, essas culturas demandam altas taxas de aplicação de defensivos agrícolas e fertilizantes, o que pode comprometer ainda mais a qualidade da água, tanto dos cursos d'água, como das áreas de recarga do aquífero Botucatu-Pirambóia (CETESB, 1990). Especula-se que pode haver alguma contaminação de origem agrícola causada pelo uso de pesticidas, fertilizantes e manejo das culturas de cana por fertirrigação com vinhaça.

CETESB (1998b) não aponta nenhum indício de contaminação por nitrato ou cromo nos poços tubulares de Ribeirão Preto, porém, segundo informação verbal do DAERP, o aquífero possui plumas de contaminação de Cloreto e Nitrato na porção central do município. Esta contaminação é resultante do lançamento de esgoto *in natura* que era feito no Ribeirão Preto, que infiltrava e contaminava o aquífero. O nível de poluição é pequeno (abaixo dos valores críticos estabelecidos pelos padrões de saúde), além de haver diluição desse esgoto. Acredita-se que seja um problema em parte solucionado, pois que o esgoto agora é lançado em um emissário que descarrega o seu conteúdo na jusante do ribeirão, porém ainda há a contaminação.

Ferreira (FERREIRA, J., 1996) aponta para o risco da contaminação de aquíferos rasos e corpos superficiais de água por hidrocarbonetos carregados em soluções pelas águas pluviais, tornando-se mais crítica nos períodos de seca, quando há o rebaixamento do nível d'água é maior. No caso de Ribeirão Preto deve-se ainda enfatizar esse problema, já que toda a cidade é abastecida por água subterrânea, havendo centenas de poços tubulares bombeando água simultaneamente, funcionando como um grande sistema de rebaixamento pela sobreexploração de água, gerando inúmeras e amplas interferências de cone de rebaixamento, sendo agravado nos períodos de seca, não somente pela menor recarga, dada pela sazonalidade climática, mas pela maior demanda de uso desse recurso. Saulo de Tarso Ferreira (FERREIRA, S., 1996) apresenta um estudo da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas em Ribeirão Preto, indicando a faixa de afloramento do arenito Botucatu/Pirambóia, zona de recarga do aquífero, como altamente vulnerável à contaminação.

Não relatado para a região de Ribeirão Preto, mas para outras regiões no aquífero, existe limitação do uso do aquífero para abastecimento de água potável pela contaminação por fluoretos, que deve ter causa natural por dissolução de apatita (do aquífero e intrusões básicas), água alcalina estagnada ou presença de zonas de fraturas

(cf. MENG; MAYNARD, 2001).

Na Carta de Risco Potencial de Poluição – Saneamento *in situ* (IPT, 1994b), na escala 1:2.000.000, a região de afloramento da Formação Botucatu apresenta-se com alto risco potencial, descrita como área onde o aquífero apresenta alta vulnerabilidade natural, sob elevada a moderada carga de saneamento *in situ*, ou média vulnerabilidade natural sob elevada carga de saneamento *in situ*. Nas áreas de solo/rocha de basalto não há informações disponíveis.

Por risco de contaminação das águas subterrâneas entende-se a associação e interação de vulnerabilidade natural do aquífero com a carga poluidora aplicada no solo ou em subsuperfície (HIRATA et al., 1997), i.e., o uso e ocupação do espaço. A vulnerabilidade do Aquífero Guarani na porção correspondente à Formação Botucatu é alta-alta para profundidades inferiores a 10 metros, alta-baixa para profundidades de 10 a 20 metros, média-alta para profundidades de 20 a 50 metros e média-baixa para profundidades maiores. Para a porção do aquífero correspondente à Formação Pirambóia a vulnerabilidade é alta-baixa para profundidades de até 20 metros e média-alta para profundidades maiores.

Hirata e outros (1997) ressalta ainda a importância de uma política de ocupação territorial clara na zona de recarga do Aquífero Guarani a partir de estudos de macrozoneamento ou proximidades de poços de abastecimento público.

Apesar de não ser dado destaque nesse trabalho à contaminação, alguns aspectos podem ser considerados. O maior operador dos poços em Ribeirão Preto é o DAERP, que não deve ser excessão, deve reconhecer problemas de perda na distribuição da água e vazamentos de esgoto. As perdas d'água na distribuição podem funcionar como recarga artificial do aquífero, mas representam prejuízos econômicos para a autarquia. Os vazamentos na coleta do esgoto podem ser fonte de poluição do aquífero, causando anomalias de nitrato, cloreto e coliformes. No entanto, fatores de risco potenciais devem ser as indústrias de Ribeirão Preto, algumas das quais trabalhando com metais pesados, que são neurotóxicos e extremamente perigosos mesmo em baixas dosagens, da ordem de parte por bilhão (ppb).

#### *“Lixão” de Serrana: um exemplo*

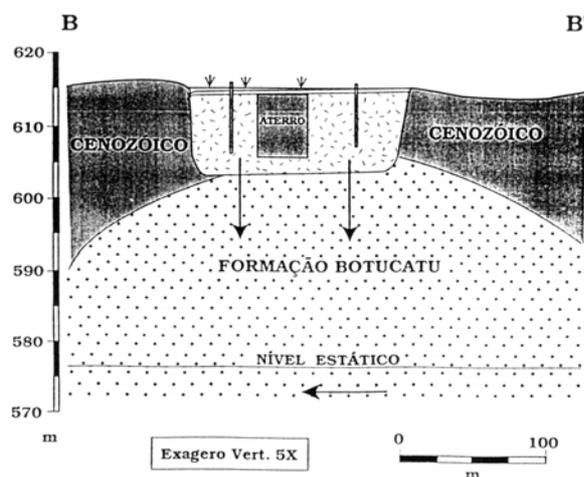
Num trabalho realizado pela PETROBRÁS (Petróleo Brasileiro S.A.) e UNAERP (Universidade de Ribeirão Preto), denominado “Lixão de Serrana: Caracterização do problema ambiental e proposição de soluções”, encomendado pela Prefeitura Municipal

de Ribeirão Preto no ano de 1995, são apresentados resultados da análise da influência desse "lixão" na contaminação dos recursos hídricos subterrâneas da região de Ribeirão Preto.

Desde 1978 a Prefeitura de Ribeirão Preto firmou um acordo com o proprietário do Sítio Santa Rita para a disposição de lixo em uma enorme cava existente na propriedade, resultante da exploração de areia e solo para construção civil. O nome Lixão de Serrana deve-se ao fato do mesmo localizar-se no quilômetro 1,5 da Rodovia Abraão Assed (SP-333) que liga as cidades de Ribeirão Preto e Serrana.

No período de 1978 a 1989, ano em que foi desativado o lixão, foram depositadas no local cerca de 110 toneladas diárias de lixo doméstico, hospitalar, industrial e de construção civil, além de animais, sem separação de locais. Para agravar o problema, o lixo doméstico não era inicialmente acondicionado em sacos plásticos, prática que foi implantada alguns anos depois. Em relação ao lixo industrial, esse era formado de pneus inservíveis, resíduos de borracha, resíduos de metálicos, lixo da indústria de bebidas etc.

Com o trabalho realizado em 1997 pela PETROBRÁS e UNAERP pode-se constatar que o Lixão de Serrana contaminou o aquífero Botucatu, através de uma "janela" pela qual o chorume infiltrou para os arenitos da Formação Botucatu, que localmente estava em contato direto com o fundo do lixão (Fig. 27).

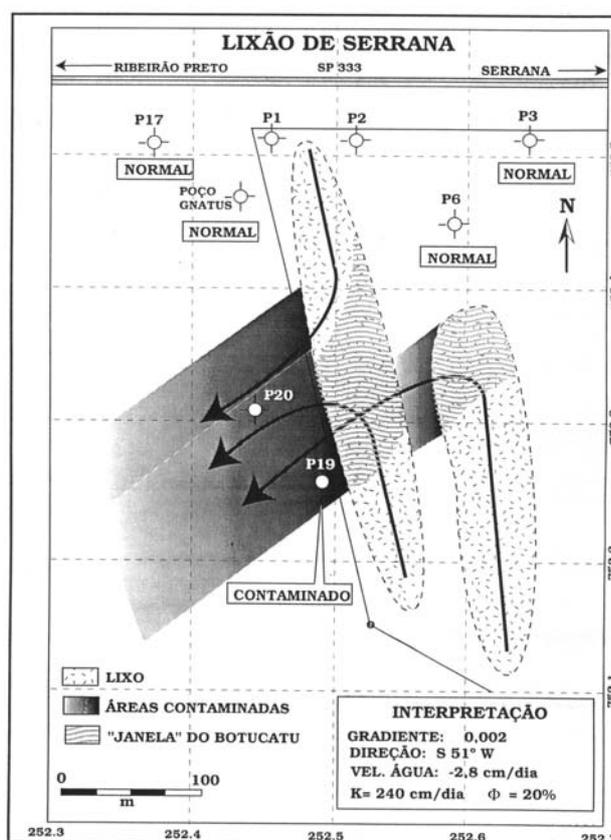


**Fig. 27:** Seção geológica/hidrológica BB' mostrando a "janela" do Botucatu (PETROBRÁS, 1997)

Porém, PETROBRÁS (1997) mostra que os poços de monitoramento próximos do lixão (50-100 metros) não apresentaram a água da Formação Botucatu afetada pelo chorume, com exceção ao poço situado a apenas 20 metros das cavas de lixo e na direção do fluxo da água.

Através dos referidos trabalhos pode-se constatar que o lixão de Serrana não

apresenta um perigo iminente para o abastecimento de água da cidade de Ribeirão Preto, isso devido ao fluxo da água subterrânea da Formação Botucatu não estar em direção à cidade e da velocidade do fluxo ser extremamente lento, incapaz de conduzir os possíveis poluentes até distância significativas (Fig. 28), não sendo esta, no entanto, a opinião de outros especialistas (Geól. Saulo de Tarso Ferreira – DAERP – informação verbal – ZUQUETTE; PEJON; ELIS, 1997 e ZUQUETTE; ELIS, 1998). Esses últimos autores verificaram que indícios de degradação distribuem-se em um halo de 150 m ao redor da área inicialmente utilizada para a disposição dos resíduos, além de questionar aspectos locais e construtivos dos poços de monitoramento.



**Fig. 28:** Área máxima afetada pelo chorume e direção da migração de poluentes originados no depósito de lixo (PETROBRÁS, 1997)

Além dessas conclusões o trabalho mostra que o teor de poluentes no chorume é modesto, atingindo a Formação Botucatu de forma bastante diluída pela precipitação de água meteórica (chuva). Dentro do aquífero a diluição continua reduzindo o teor de poluentes a níveis muito baixos, devido ao enorme volume de água disponível.

Paschoalato (2000) mostra, no entanto, que existe processo de contaminação do aquífero pelo "lixão" de Serrana em Ribeirão Preto.

### *Urbanização*

Os processos de explosão demográfica, que pode estar associada inclusive a migrações, e a industrialização faz com que a demanda por água seja crescente e cidades, como Ribeirão Preto, que dependem do recurso hídrico subterrâneo para abastecimento, podem apresentar uma constante e acelerada depleção do aquífero.

Estima-se que Ribeirão Preto, como um grande centro urbano não fique atrás, possuindo algumas centenas de poços que não são cadastrados, não havendo, portanto, um adequado gerenciamento da abstração da água subterrânea e podendo gerar graves problemas de interferências de poços e no abastecimento público de água.

Leite e Zuquette (1996) na elaboração da carta de suscetibilidade à contaminação e poluição das águas subterrâneas da área de Ribeirão Preto ressaltam a escassez de informações referentes à hidrogeologia, principalmente às flutuações e profundidades do nível estático, dificultando a classificação das áreas quanto à suscetibilidade.

Landim e outros (1973) em estudos da qualidade das águas de Ribeirão Preto destacam a suscetibilidade à contaminação na porção central da cidade, talvez resultante do grau de fraturamento dos basaltos na área, indicado por uma anomalia de resíduos secos mapeado pela análise de superfícies de tendência. Saulo de Tarso Ferreira (1996) indicou a porção nordeste do município, leste e nordeste da cidade, onde afloram os arenitos Botucatu/Pirambóia como área de vulnerabilidade alta, com destaque para a região do trevo de acesso a Serrana como extrema.

### *Quantidade e sobrexploração*

Nesse trabalho, no entanto, serão destacadas as flutuações do nível d'água que resultam em seu rebaixamento, principalmente advindas da exploração intensiva de aquíferos, dada a escassez de informação, como identificado por Leite e Zuquette (1996). A identificação dessas flutuações é imprescindível pois que quando a água atinge profundidades inferiores às estabelecidas no nível mínimo, pode diluir e transportar os compostos que se encontravam na zona não saturada, causando a contaminação do aquífero. Segundo Leite apud Leite e Zuquette (1996), para solos inferiores a 10 m de espessura e profundidade de nível d'água inferior a 40 m, é necessário que as flutuações do nível d'água não atinjam valores superiores a 5 m.

Para o caso de Ribeirão Preto somente é possível admitir a estratégia do tipo 1, não somente pelo aquífero ter condições de um aquífero poroso livre a semi-confinado, com alta permeabilidade, na região, mas pelas conseqüências advindas das estratégias

2 e 3, pois que promoveriam uma sensível mudança do nível de água e rebaixamento da superfície potenciométrica, causando alterações no fluxo das águas subterrâneas, acarretando degradação da qualidade da água do aquífero e exigindo tratamento mais caro dessa água antes da distribuição e perda de poço por um rebaixamento excessivo, principalmente em zonas de concentração de poços, com alto grau de interferência dos cones de depleção.

Se por um lado pode haver a perda de alguns poços, por outro, pela condutividade hidráulica do aquífero na região, uma maior exploração do aquífero provoca uma maior recarga induzida por que força um escoamento lateral das águas subterrâneas.

A definição de sobreexploração de um aquífero, como anteriormente dito, é resultado da percepção de grupos específicos, segundo seus interesses e pontos de vista (CUSTÓDIO, 2002). Segundo Custódio (2002), a sobreexploração pode ser reconhecida por alguns sinais considerados indesejados, tais como, rebaixamento contínuo do nível d'água, diminuição da vazão de fontes e progressiva deterioração da qualidade da água, de forma mais abrangente e podendo ter outras causas, mas de forma mais determinante a diminuição da vazão de um rio, redução de área alagada, migração de água subterrânea de baixa qualidade e subsidência de terreno, todas mudanças que exigem um programa de monitoramento adequado que não existe em muitos casos, do qual Ribeirão Preto não é exceção, ainda mais quando se consideram as dimensões do Sistema Aquífero Guarani como um todo. Mas de forma alguma é assumida uma sobreexploração nesse trabalho, dada as implicações legais decorrentes dessa afirmação.

A única proposta adequada para definir um aquífero como sobreexplorado é o conhecimento profundo de seu funcionamento nos mais diversos aspectos, com um modelo conceitual realístico, embasado em banco de dados de monitoramento espaço-temporal suficientemente grande, suportado por cálculos de fluxo e transporte de massa e modelagem numérica (CUSTÓDIO, 2002), acrescentando-se ainda toda a demanda, usos e destino dessas águas, bem como os aspectos econômicos, legais e sócio-culturais envolvidos, principalmente educacionais e comportamentais.

Este trabalho fornece subsídios para o reconhecimento de apenas alguns dos aspectos da gestão dos recursos hídricos subterrâneos e a identificação de um processo de exploração intensiva, a modelagem espaço-temporal da superfície potenciométrica de uma pequena porção do Sistema Aquífero Guarani sob a cidade de Ribeirão Preto e a caracterização da sociedade e cultura relacionados.

### *Legislação Municipal para Recursos Hídricos*

No caso de Ribeirão Preto existem algumas evidências de exploração intensiva local do aquífero. Até que ponto deve-se buscar atender à demanda? Será que o aquífero tem um limite de exploração? No parágrafo 2º do Artigo 225 da Constituição Federal é declarado obrigatório a recuperação do meio ambiente degradado pela exploração dos recursos minerais. Será que é possível sanear esses problemas? E a contaminação pelo “Lixão” de Serrana? São problemas invisíveis se não considerarmos uma rígida campanha de investigação dos possíveis danos causados em águas subterrâneas, posto que a água é o recurso por excelência, pois que não somente é *essencial à sadia qualidade de vida* (como expressa a Constituição), mas também é responsável para a manutenção da própria vida. A Lei Estadual no 9.034, de 27 de dezembro de 1994 (Plano Estadual de Recursos Hídricos) prevê a cooperação com os municípios para a exploração, conservação e proteção das águas subterrâneas pela avaliação hidrogeológica, projeto e perfuração de poços tubulares profundos; operação, controle e manutenção de sistemas de extração de águas subterrâneas; convênios de cooperação entre estado e municípios para gestão dos aquíferos de interesse local, especialmente os situados em áreas urbanas.

Ribeirão Preto requereu toda a área do município para exploração mineral e possui o Decreto Municipal nº 264, de 11 de Outubro de 1988, que define que, ressalvados os casos de competência da União e do Estado, as águas públicas de domínio do Município de Ribeirão Preto, somente poderão ser derivadas<sup>4</sup> após OUTORGA da concessão, permissão ou autorização do DAERP (Departamento de Água e Esgotos de Ribeirão Preto) e da S.M.M.A. (Secretaria Municipal do Meio Ambiente).

Com Lei Complementar nº 204, de 24 de Dezembro de 1992 para a perfuração e exploração de poços fica determinada a obrigatoriedade do cadastramento de toda empresa e técnicos que atuem com águas subterrâneas em Ribeirão Preto junto à Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMMA), assim como a solicitação das licenças de perfuração e exploração de poços tubulares (cf. <http://www.coderp.com.br/SMA/>

---

<sup>4</sup> Derivação refere-se a qualquer utilização ou obras em recursos hídricos, incluindo-se aqui os casos de captação ou lançamentos insignificantes realizados por proprietários ribeirinhos ou mesmo para uso em terraplanagem, bem como os lançamentos de efluentes líquidos em cursos d'água.

I22SERVICOS.HTM). Desta forma passou a se ter um cadastro e controle mais rígidos da exploração de água no município.

A *Solicitação de Licença de Perfuração* exige o requerimento próprio, a cópia da ART (Anotação de Responsabilidade Técnica) recolhida, perfil geológico provável, projeto do poço, especificações de materiais de revestimentos e filtros, vazão de projeto e demandas diária e mensal prováveis, níveis estático e dinâmico prováveis, especificações do método de perfuração, descrição do ensaio de vazão e do desenvolvimento, usos da água a ser extraída, croquis de localização do poço em cópia do levantamento aerofotogramétrico da cidade de Ribeirão Preto na escala 1:5.000 e coordenadas UTM do levantamento IBGE na escala 1:50.000. A *Solicitação da Licença de Exploração* exige o requerimento, o perfil do poço (geológico, revestimento e filtros), relatório sobre o ensaio de vazão e análise físico-química da água. Esta lei da Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto permitiu uma melhor fiscalização do perfil do aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos do município, que até então eram feitos, em sua grande maioria, de forma inadequada. Alguns poços já contam com perfis geofísicos, o que permite um melhor reconhecimento da geologia pontual, permitindo uma maior compreensão local, dada a continuidade do aquífero e das litologias da região.

O Projeto de Lei Complementar do Código do Meio Ambiente, que subsidia o Plano Diretor do Município de Ribeirão Preto (Lei Complementar 501, de 31 de outubro de 1995), em seu artigo 44, alínea “e”, define que todo poço tubular profundo e demais formas de exploração de recursos hídricos, não especificando se superficiais ou subterrâneos, nesse caso incluindo também as cacimbas e outras formas, sujeita essas atividades ao Licenciamento Ambiental Municipal. No Capítulo II (Dos Recursos Hídricos), Seção III (Das Águas Subterrâneas) é declarada obrigatória a obtenção da licença ambiental para a operação dos poços, sendo atendidas as diretrizes do plano quadrienal (PLANÁGUA) para concessão das licenças de perfuração e operação (vide Art. 118), exigindo-se a construção de instalações hidrométricas em todos os poços (públicos e privados) (Art. 117, inciso IV), sendo todos os poços cadastrados pelo Departamento de Gestão Ambiental (Art. 119), podendo o poder público fazer o controle dos aspectos quantitativos e qualitativos de poços, inclusive poços privados no aspecto quantitativo (Art. 121, inciso II), restringindo e disciplinando “o uso das águas subterrâneas em locais considerados críticos ou com indícios de exaustão, e que possam interferir no serviço público de abastecimento” (Art. 121, inciso IV). O código ainda prevê o adequado tamponamento de poços abandonados, temporária ou definitivamente (Art. 124).

Desta forma, pode-se considerar que a conservação dos recursos hídricos do município está legalmente bem amparada, mas quão efetiva é essa legislação? Ainda faltam precedentes para delinear qual a condição real da eficácia dessas normas.

### **7.3. O Aqüífero Guarani em Ribeirão Preto**

Sinelli (1970 e 1971a) detectou artesianismo na região de Ribeirão Preto, chegando a atingir até 120 m<sup>3</sup>/h na Usina da Pedra (informação oral – Prof. Osmar Sinelli), que não parece estar presente atualmente na região, provavelmente pela depleção do aqüífero. Toda a extensão da parte confinada está saturada em água. A direção de fluxo global dá-se principalmente para norte e noroeste e para os basaltos sobrejacentes, localmente condicionada por estruturas predominantes, porém a maior parte do escoamento subterrâneo é drenada para rios como escoamento básico, ainda na área de recarga (CETESB, 1978). As áreas com maior densidade de estruturas desse basalto (falhas e fraturas) apresentam as maiores vazões dos poços e são mais indicadas para a locação de poços tubulares (Sinelli, 1971a).

Os primeiros estudos hidrogeoquímicos na região de Ribeirão Preto foram feitos por Sinelli (1970; 1971a) e Gallo e Sinelli (1980), concluindo que as águas dos poços que exploram o arenito apresentam baixa mineralização, com teor de sílica praticamente correspondendo à solubilidade do quartzo e uma maior mineralização das águas é devido aos basaltos, resultante da hidrólise ácida dos minerais do basalto. Para Gallo e Sinelli (1980) o aqüífero apresenta comportamento de não confinamento na cidade de Ribeirão Preto, com características advindas da sua zona não saturada, como confirma posteriormente Meng e Maynard (2001). Pelos estudos de SiO<sub>2</sub> e resíduo seco, com análise de superfície de tendência, Landim, Sinelli e Castro (1973) identificaram um elevado fluxo na região central da cidade de Ribeirão Preto, indicando a rápida recarga do aqüífero (baixo teor em sais e alto teor em CO<sub>2</sub> livre), verificando que a região é altamente vulnerável à contaminação. Para Sinelli (1970; 1971a) e Gallo e Sinelli (1980) estudos geoquímicos (resíduo seco e condutividade elétrica) estimam que a recarga do Aqüífero Guarani na região de Ribeirão Preto dando-se essencialmente pela precipitação de água meteórica na área de afloramento do aqüífero e através de estruturas do basalto e a partir do Rio Pardo e região limítrofe, como indicam dados de isótopos estáveis de oxigênio-18 e deutério, sendo águas recentes, sem a identificação de trítio artificial. A maior descarga do aqüífero é a sudoeste do Rio Paraná (ARAÚJO et al. apud MENG; MAYNARD,2001).

A UGRHI Pardo possui aflorante a seguinte porcentagem de área aflorante de seus sistemas aquíferos (Tab. 09):

**Tab. 09:** Área aflorante dos Sistemas Aquíferos da UGRHI Pardo

SISTEMA AQUÍFERO	ÁREA AFLORANTE NA UGRHI 4
Coberturas Cenozóicas	6%
Serra Geral	24%
Botucatu/Pirambóia	23%
Tubarão	11%
Cristalino	32%
Passa Dois	4%

fonte: CETESB (1998b)

Segundo CETESB apud CETESB (1998b) o município de Ribeirão Preto possui uma área estimada de afloramento do Aquífero Botucatu/Pirambóia de cerca 14% da área do município. Afora isso, o aquífero encontra-se confinado a semi-confinado.

O DAERP (Departamento de Água e Esgoto de Ribeirão Preto) opera 164 poços tubulares em Ribeirão Preto. Segundo DAEE (1974) foram localizados e cadastrados outros 129 poços no município de Ribeirão Preto. Hoje já ultrapassam 400 poços no município (informação verbal – Geól. Laerte, DAERP). Na região há poços perfurados desde 1936, com profundidade variando de 65 a 242 m. A vazão varia de 5 a 90 m<sup>3</sup>/h e o uso da água refere-se a consumo industrial, abastecimento próprio e público, irrigação e recreação. A questão que se nos apresenta é se existe e se podemos caracterizar um fenômeno de sobreexploração do aquífero na região.

Rebouças (1999) já alertava sobre a existência de milhares de poços irregulares e clandestinos, principalmente em regiões metropolitanas, e o problema decorrente na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Ribeirão Preto não é uma exceção. A questão é como gerir os recursos hídricos sem ter uma noção ao menos aproximada do quanto se água se abstrai do aquífero, da densidade de poços ou da interferência entre eles.

## IV. METODOLOGIA

O estudo da variabilidade espacial e/ou temporal dos parâmetros do aquífero são essenciais para a compreensão do seu funcionamento hidráulico e hidrodinâmico e esse estudo dá-se basicamente por modelos. Os modelos têm a função da representação de algumas ou todas as propriedades de um sistema ou objeto com o propósito de deduzir efeitos ou melhor entender os processos subjacentes responsáveis por certas observações (OLEA, 1991). Um modelo pode ser classificado em: 1. conceitual; 2. empírico ou experimental; ou 3. matemático. O modelo *conceitual* esboça relações entre elementos considerados importantes para o entendimento de um determinado fenômeno ou processo, define o objetivo de aplicação desse modelo, assume simplificações e hipóteses, define condições iniciais, de fronteira e de contorno; o modelo *empírico/experimental* é derivado de ajuste de funções matemáticas a dados experimentais (e.g, Lei de Darcy). O modelo *matemático* pode ter abordagem *determinística*, baseada em leis físicas e de modelagem numérica, este tendo como principais tipos os modelos por Método de Diferenças Finitas ou Método de Elementos Finitos, como MODFLOW e suas versões comerciais (USGS, 1997) ou abordagem *probabilística/estocástica*, que é baseada em leis da estatística, probabilidade e funções aleatórias, permitindo identificar heterogeneidades e acessar incertezas das estimativas das propriedades dos aquíferos.

A modelagem determinística parte do modelo conceitual e incorpora os dados para sua calibração e simulação de diversos cenários. Existe ainda a possibilidade de se incorporar um erro aleatório (casual) a um modelo determinístico.

A abordagem estocástica, como a Geoestatística clássica, tem por base os conceitos da Teoria da Probabilidade e das Funções Aleatórias (cf. REMACRE, 1999a; 1999b) e tem como principais referências na aplicação em hidrogeologia “Introduction to Geostatistics: applications in hydrogeology” (KITANIDIS, 1999) e “Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea” (SAMPER-CALVETE & CARRERA-RAMÍREZ, 1996). A modelagem estocástica é um fim em si mesma, mas também serve de subsídio importante para definição de parâmetros de entrada modelos numéricos determinísticos, tal como, a condutividade hidráulica ou a superfície potenciométrica.

Yevjevich (1993) destaca a importância e benefícios da abordagem conjunta (determinística e estocástica), além de espaço-temporal, para o gerenciamento dos recursos hídricos e proteção ambiental, basicamente por fornecer informações mais

acuradas das variáveis e dos processos hidrológicos.

Novas propostas começam aparecer, como a Máxima Entropia Bayesiana (BME), que faz parte da moderna Geoestatística espaço-temporal (ou Sistema de Informação Geográfica e Temporal) por Christakos (2000; 2002), que incorpora leis físicas (abordagem determinística) (SERRE, 1999; KOLOVOS, 2001), modelos (co)variográficos (abordagem estocástica) e empíricas como Conhecimento Geral ( $\mathcal{G}$ ) e dados da área como Conhecimento Específico ( $\mathcal{S}$ ), do tipo *hard* e *soft*, além de trabalhar no espaço e no tempo.

O Aqüífero Guarani sob a cidade Ribeirão Preto (SP) já foi estudado por modelos matemáticos determinísticos (MONTENEGRO; RIGHETTO; SINELLI, 1988; MONTENEGRO; RIGHETTO, 1990) e estocástico (STURARO, 1988; STURARO; LANDIM, 1988; MONTEIRO; LANDIM, 2002). Em todos os casos é possível notar a falta de um programa de monitoramento dos parâmetros do aqüífero e mesmo problemas que dificilmente serão evitados como existência de poços clandestinos que não são previstos nos modelos, interferência do cone de depleção de poços entre outros. A vantagem da abordagem estocástica é a de utilizar os dados para a modelagem, enquanto a abordagem determinística o utiliza somente para a calibração do modelo. No entanto, a modelagem determinística permite simular o comportamento (ou resposta) do aqüífero à mudança de variáveis, variações nas taxas de bombeamento, instalação ou abandono de poços, variações climáticas etc..

A metodologia de Máxima Entropia Bayesiana vem de encontro a esses problemas quando permite a combinação das abordagens determinísticas e estocásticas. Nesse trabalho, porém, a única diferença com a abordagem estocástica anteriormente implementada é a incorporação dos dados do tipo *soft* e a modelagem no domínio espaço-temporal, não considerando ainda as leis físicas de fluxo da água subterrânea como conhecimento Geral ( $\mathcal{G}$ ) (abordagem determinística).

O trabalho foi desenvolvido em praticamente duas etapas: a abordagem clássica da Geoestatística, pelo uso das técnicas de krigagem e a abordagem da Geoestatística Espaço-Temporal, aplicando-se a Máxima Entropia Bayesiana. A seguir é apresentado um fluxograma que sintetiza os passos que seriam adotados para a análise dos dados por geoestatística (Fig. 29).

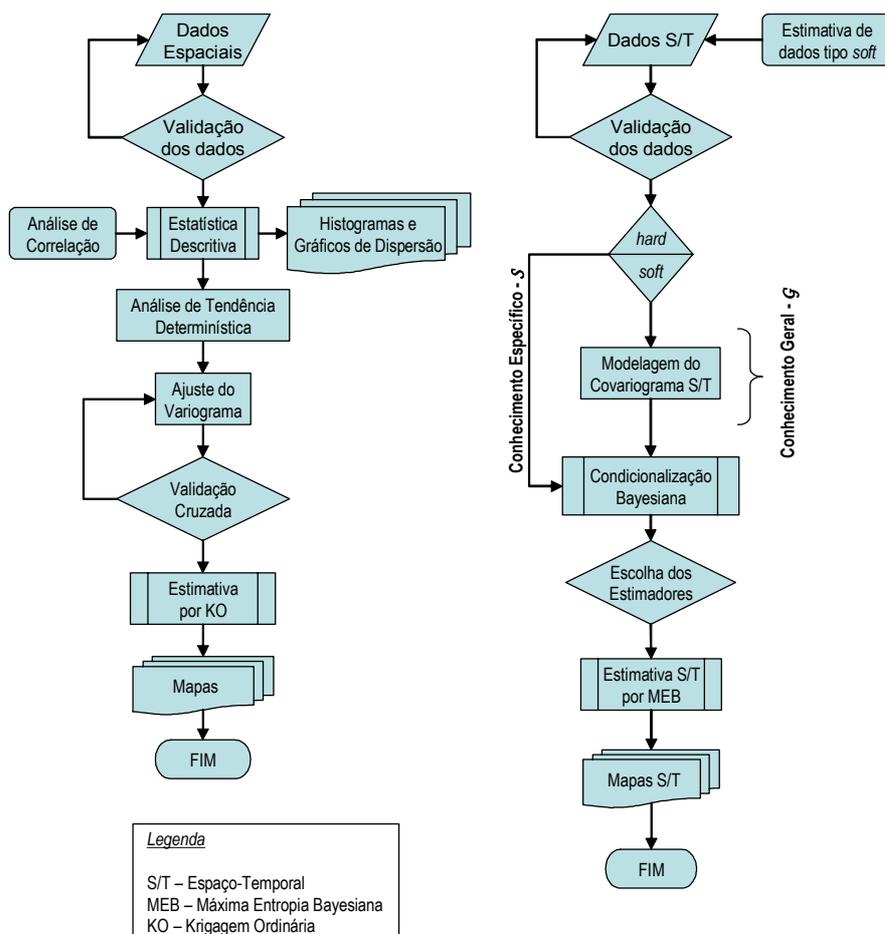


Fig. 29: Fluxograma da análise dos dados

## 1. Cartografia Hidrogeológica e Mapeamento Potenciométrico

A água subterrânea encontra-se nos poros dos grãos do material que define o aquífero (e.g., os grãos de areia da Formação Pirambóia/Botucatu no caso), fraturas de rochas (e.g., Formação Serra Geral) e cavidades comuns em terrenos cársticos. A água pode, então, preencher todo o espaço, definindo um meio saturado. Em cada ponto do meio saturado, desde que o fluido esteja em equilíbrio, a água exerce uma pressão, de modo que um piezômetro, equipamento tubular que penetra o aquífero, instalado em qualquer ponto do meio, registra a posição do nível de água.

A água se movimenta somente com um potencial hidráulico diferencial ( $\Delta h$ ), no sentido do maior para o menor. Esse diferencial de potencial hidráulico é também chamado de perda de carga e representa a dissipação de energia pela resistência do meio à passagem do fluido.

O potencial hidráulico assume um valor em cada ponto da superfície potenciométrica, representada pelo limite entre a zona saturada e não-saturada em água. **Superfície potenciométrica** é o lugar geométrico dos pontos que marcam as

alturas potenciométricas, ou de energia mecânica da água, de um aquífero, referenciadas a uma dada profundidade (*datum* vertical). Se as superfícies equipotenciais são verticais, o potencial ou carga hidráulica é o mesmo em qualquer ponto. Seu conhecimento é indispensável para qualquer estudo da situação e dinâmica das águas subterrâneas.

Optou-se pela designação de superfície potenciométrica pois este termo é uma generalização, mais descompromissada com as condições de confinamento do aquífero. Se um aquífero é livre, i.e., desprovidos de condição de confinamento ou elementos que exerçam uma pressão sobre ele, pode-se chamar a superfície definida pela altura do nível d'água de superfície freática. Para aquíferos confinados, por exemplo, com um pacote de rochas sobrepostas a esse aquífero, pode-se adotar o nome de superfície piezométrica.

O termo *nível* potenciométrico (freático ou piezométrico) é geralmente utilizado para definir a altura do nível da água em um perfil, enquanto *superfície* define um plano horizontal (em planta).

Quando um poço tubular é instalado e uma bomba hidráulica retira água desse poço, o nível d'água baixa e define uma superfície cônica ao redor do poço, chamada cone de depleção. A diferença entre o nível d'água antes do bombeamento do poço e durante a abstração de água, geralmente dada em metros, define o rebaixamento.

Outros conceitos não tão relevantes para esse trabalho, tais como zona de influência, contribuição e transporte, usados para definição de áreas ou perímetros de proteção de poços podem ser encontrados na Portaria nº 231, de 31 de julho de 1998 do DNPM, publicada no DOU de 07-Ago-1998 e no item IX. Glossário.

### **1.1. Dados Hidrogeológicos**

Os dados hidrogeológicos têm algumas características que são ressaltadas por Rouhani e Myers (1990):

1. *Agrupamentos*: os pontos amostrais encontram-se pouco dispersos, com longas séries temporais em cada ponto (quando existe um programa de monitoramento adequado), dado o alto custo de instalação de uma nova estação de monitoramento (poço de observação, piezômetro, estação metereológica etc.) guiando para uma amostragem mais freqüente nos pontos já instalados;

2. *Periodicidade e não-estacionaridade temporal*: a periodicidade no tempo se reflete geralmente na média e pode ser modelada por funções que incluam ciclos diários

ou sazonais com períodos relativamente estáveis, mas variando em amplitude e fases. Ciclos climáticos representam uma segunda deriva temporal quase-periódica, nos períodos, amplitudes e fases. Um terceiro tipo de tendência reflete mudanças climáticas de longo-termo ou causadas pelo homem, como o uso intensivo do aquífero.

3. *Heterogeneidade espacial*: condicionantes geográficas e topográficas geralmente promovem uma não-homogeneidade na variável geohidrológica. Nem sempre a não homogeneidade está limitada ao primeiro momento estatístico (média dos valores da variável em questão), mesmo quando se pode assumir uma homogeneidade local para a média, grandes diferenças nas variâncias podem ser observadas. Em porções do aquífero próximas a um contato hidráulico, freqüentemente se encontra uma ampla variação em relação a zonas confinadas.

Segundo Yevjevich (1993) a qualidade dos dados hidrológicos, bem como análise de aleatoriedade na amostragem, erros sistemáticos e amostrais, não-homogeneidade e não-estacionariedade nos dados, têm sido deixada às margens, dificultando o uso desses dados para modelagens.

### **1.2. Cartografia Hidrogeológica**

A cartografia hidrogeológica é formada por um conjunto de técnicas de amostragem e representação de dados hidrogeológicos. Tem grande importância como ferramenta de síntese da informação hidrogeológica. Seus principais objetivos podem ser sintetizados em:

- ✓ amostragem e interpretação de dados;
- ✓ elaboração do modelo conceitual;
- ✓ base de estudos integrados de gestão; e
- ✓ planejamento de projetos em geral (engenharia, ambiental, sócio-econômico, ...).

Suas principais características são: conteúdo, apresentação, escala, formato e preparação técnica. Tem expressão como mapas, seções verticais e blocos diagramas.

Mente (1997) apresenta uma matriz para a classificação dos mapas hidrogeológicos e a tabela seguinte (Tab. 10) apresenta essa síntese com algumas modificações:

**Tab. 10: Classificação de mapas hidrogeológicos**

<b>Nível de Informação Possível Uso</b>	<b>Baixo</b> (dados escassos e heterogêneos de diversas fontes)	<b>Avançado</b> (+ programas de investigação sistemática, dados mais confiáveis)	<b>Alto</b> (+ análise de sistemas hidrogeológico e modelos matemáticos)
<b>Reconhecimento e Exploração</b>	Mapas hidrogeológicos gerais (mapas de aquíferos)	Mapas hidrogeológicos paramétricos (conjunto de mapas, atlas)	Mapas de sistemas de águas regionais (representações de modelos conceituais)
<b>Planejamento e Desenvolvimento</b>	Mapas do potencial de recursos de água subterrânea	Mapas hidrogeológicos especiais (mapas de planejamento)	Derivação de SIG's (mapas seções, diagramas em perspectivas, cenários)
<b>Gerenciamento e Proteção</b>	Mapas de vulnerabilidade de sistemas aquíferos	Mapas de risco de contaminação dos aquíferos	Mapas de fluxo de água e transporte de poluentes
<b>Parâmetros de Apresentação</b>	estática baixa baixo grande pequena	<b>dependência do tempo</b> <b>confiabilidade</b> <b>custo por unidade real</b> <b>área representada</b> <b>escala</b>	dinâmica alta alto pequena grande

fonte: modificado de *Mente (1997)*

Nas ciências naturais, em geral, é comum a observação *discreta* do fenômeno estudado. Daí é necessário a definição de uma malha de amostragem (regulares ou irregulares, com ou sem agrupamento e duplicação de amostras) que passará por um processo de interpolação, e por vezes também de extrapolação, para a geração de uma imagem *contínua* da variável. No caso da hidrogeologia, temos normalmente a medida de dados em poços (discreta) e queremos estudar o comportamento em mapa, por exemplo, a superfície potenciométrica (contínua) do aquífero. Em alguns casos pode-se contar com o apoio de uma outra variável contínua, como a geofísica, que pode auxiliar no mapeamento da nossa variável.

O reconhecimento de alguns pontos da superfície potenciométrica pode permitir a representação dessa superfície por uma imagem, no formato matricial (*raster*), que são *pixels* onde uma escala de cor pode indicar os valores assumidos pela variável no ponto, ou por linhas equipotenciais, no formato vetorial (*vector*), que são linhas de mesmo potencial hidráulico (isopotenciais), permitindo o traçado de linhas de fluxo de água e divisores de águas subterrâneas.

Os mapas potenciométricos permitem ainda a determinação provável de áreas de recarga (máximo potencial hidráulico) e descarga (menor potencial hidráulico). Diversos estudos hidrogeológicos fazem uso do mapa da superfície potenciométrica para identificar o fluxo da água subterrânea, mas muitas vezes sem utilizar critérios adequados na elaboração desses mapas, levando à geração de imprecisões e artefatos que podem ser decisivos no desenvolvimento de um projeto.

Que métodos e técnicas utilizar para a confecção de mapas? Naturalmente a

resposta não é tão simples, dependem da natureza da variável, da malha de amostragem (ou pontos), da precisão, acurácia e tempo de elaboração exigidos na confecção desse mapa. Mais adiante serão discutidas algumas técnicas de mapeamento.

Existem algumas propriedades que facilitam a estimativa da superfície potenciométrica, como a alta correlação entre a superfície potenciométrica e a superfície topográfica (STURARO, 1988). A flutuação da superfície potenciométrica pode ser dada por diversos fatores, tais como a exploração de água do aquífero, a vazão de rios com os quais o aquífero esteja conectado, uso e ocupação do espaço em áreas de recarga (principalmente pela agricultura e seu manejo, mais especificamente irrigação e drenagem), a precipitação pluviométrica (inclusive relacionada com a flutuação da temperatura da superfície oceânica - TANCO; KRUSE, 2001), além de outros fatores. Esses e outros dados podem tornar-se informações a serem utilizadas como variáveis auxiliares (ou secundárias) para estimar a variável de interesse (ou primária). Mas isso será discutido mais adiante.

## **2. Superfícies de Tendência**

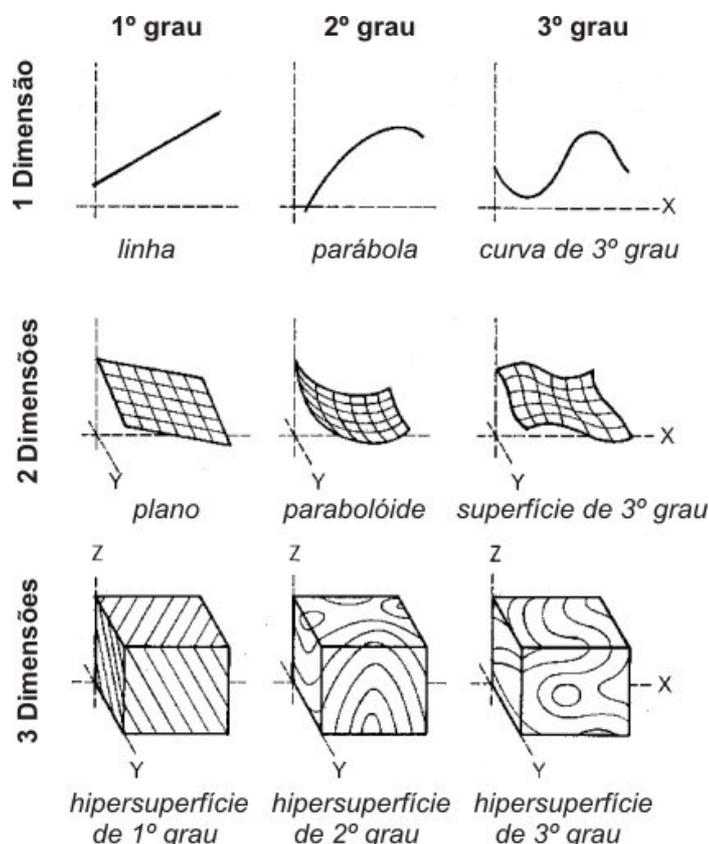
A análise de superfícies de tendência é uma técnica amplamente utilizada nas geociências, principalmente em hidrogeologia e petrologia (DAVIS, 1986). Sua aplicação principal é para estudos espaciais de delimitação de corpos mineralizados, distribuição de teores de minérios, mapeamento de contorno estrutural de camadas e profundidade de níveis potenciométricos.

Esta metodologia permite o reconhecimento do comportamento espacial de uma variável, expressando a tendência geral e ressaltando flutuações locais ou valores anômalos em torno da tendência média, sendo estes, aparentemente, não-ordenados e impondo-se aos padrões gerados por grandes e sistemáticas mudanças existentes nesta área.

A Análise de Superfícies de Tendência (*Trend Surface Analysis*) é uma técnica matemática que procura fornecer uma superfície que melhor se adapte a um dado conjunto de observações, aos quais deseja-se correlacionar a distribuição de uma variável dependente “ $z_i$ ” em função das coordenadas “ $x_i$ ”, de sentido leste-oeste, e “ $y_j$ ”, de sentido norte-sul, no caso tridimensional, pelo modelo linear geral, semelhantemente ao modelo linear simples (bidimensional), que visa o encaixe da melhor curva aos pares ( $x_i$  e  $y_j$ ) de valores observados. A aplicação desta técnica permite a separação dos

dados mapeáveis em duas componentes: uma de caráter regional, representado pela própria superfície (de característica determinística); e outra que revela as flutuações locais, representadas pelos valores residuais (de caráter probabilístico ou estocástico) (LANDIM, 1998; LANDIM; CORSI, 2001).

Para a aplicação desta análise é aconselhável uma coleta de dados sobre uma malha regular, utilizando-se, portanto, polinômios ortogonais e possibilitando o uso do modelo da análise das séries de Fourier. Porém, geralmente não é possível a coleta de dados orientada em geociências e ciências ambientais, imprimindo-se uma malha (rede) irregular de amostragem e fazendo-se então mister a utilização de polinômios não-ortogonais, procurando-se encaixar uma superfície linear aos dados, em seguida uma quadrática e assim por diante (Fig. 30), sendo usual o emprego da regressão pelos mínimos quadrados como método para o ajuste da superfícies aos dados. O cálculo da superfície por polinômios não-ortogonais numa malha regular pode gerar artefatos que não refletem a realidade, principalmente em efeito de bordas dado pela ausência de dados.



**Fig. 30:** Comportamento espacial de uma variável independente condicionada por uma variável independente (curvas), duas variáveis independentes (superfícies) e três variáveis independentes (hipersuperfícies) (mod. de LANDIM, 1998)

Segundo Landim (1998), após o cálculo das superfícies e os respectivos desvios, estas são examinadas para que se verifiquem as suas implicações geológicas. Em alguns casos, como em problemas de suavização, o interesse é pelo melhor ajuste aos dados e assim procura-se pelas superfícies de mais alto grau possível. Em outros, como na detecção de anomalias e deste trabalho, o que interessa são os resíduos e, para tanto, calcula-se as superfícies de baixo grau, com os respectivos mapas de resíduos, positivos e negativos.

O modelo para a superfície de tendência geral é (KRUMBEIN; GRAYBILL, 1965 apud SUTTERLIN; HASTINGS, 1986):

$$z_0(x_i, y_j) = z_t(x_i, y_j) + e_{ij}$$

onde,  $z_0(x_i, y_j)$  é o valor observado da variável mapeada

$z_t(x_i, y_j)$  é o valor de tendência da variável mapeada e

$e_{ij}$  é o resíduo

O modelo para a representação da superfície pelo método dos polinômios não ortogonais é:

$$z_t(x_i, y_j) = (a_0 + a_1.x_i + a_2.y_j + a_3.x_i^2 + a_4.x_i.y_j + a_5.y_j^2 + \dots) + e_{ij}$$

onde  $z_t(x_i, y_j)$  é a variável mapeada em função das coordenadas  $x_i$  e  $y_j$  e  $e_{ij}$  representa os resíduos, ou seja, a fonte não sistemática de variação.

Assim, a representação de uma superfície linear é dada por:

$$z_t(x_i, y_j) = (a_0 + a_1.x_i + a_2.y_j) + e_{ij}$$

A superfície quadrática é representada por:

$$z_t(x_i, y_j) = (b_0 + b_1.x_i + b_2.y_j + b_3.x_i^2 + b_4.x_i.y_j + b_5.y_j^2) + e_{ij}$$

e assim por diante seguem-se as superfícies de grau superior, no mesmo processo de desenvolvimento polinomial.

Esta análise já foi aplicada em diversas áreas de conhecimento, chamando aqui a atenção para a sua aplicação em hidrogeologia. Sturaro e Landim (1988) já se utilizaram da análise de superfície de tendência em estudos espaciais sobre o nível piezométrico do aquífero Botucatu em Ribeirão Preto. Bellenzani-Júnior, Landim e Sturaro (1990) aplicaram essa metodologia em dados hidrogeológicos de poços profundos de água subterrânea no município de Araraquara.

É usual calcular as equações polinomiais de graus sucessivamente maiores para verificar seu ajuste aos dados. Davis apud Landim (1998) sugere um teste estatístico para verificar qual a contribuição dos sucessivos coeficientes parciais de regressão e fornecer uma medida do ajustamento aos dados devido a cada um dos incrementos da equação polinomial, pela análise de variância:

<b>Fontes de Variação</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MQ</b>	<b>F calculado</b>
<i>Regressão de grau p</i>	SQP	k	MSP	MSP/MSR <sup>(1)</sup>
<i>Resíduos referentes à p</i>	SQR	n - k - 1	MSR	
<i>Regressão de grau p+1</i>	SQP1	m	MSP1	MSP1/MSR1 <sup>(2)</sup>
<i>Resíduos referentes à p+1</i>	SQR1	n - m - 1	MSR1	
<i>Regressão devido ao incremento de p para p+1 grau</i>	SQI=SQP1 - SQP	m - k	MSI	MSI/MSR1 <sup>(3)</sup>
<i>T o t a l</i>	SQT	n - 1		

<sup>(1)</sup> teste de significância relativo à superfície de tendência de grau p; <sup>(2)</sup> teste de significância relativo à superfície de tendência de grau p+1; e <sup>(3)</sup> teste de significância relativo à melhoria de ajuste da superfície p+1 em comparação com a superfície p

sendo, variação total:  $SQT = \sum y_i^2 - [(\sum y_i)^2 / n]$

variação devido à superfície calculada:  $SQP = \sum y_i^{*2} - [(\sum y_i^*)^2 / n]$

variação devido aos resíduos ou desvios:  $SQR = SQT - SQP$

porcentagem de ajuste da superfície:  $R^2 = (SQP / SQT) \cdot 100 \%$

n: número de observações

grau p: k coeficientes, não contando a constante a<sub>0</sub>

grau p+1: m coeficientes, não contando a constante b<sub>0</sub>

y e y\*: valor da variável observado e estimado pela regressão polinomial, respectivamente

A hipótese nula (H<sub>0</sub>) é a de que a contribuição do incremento polinomial para o ajuste aos dados é nula e a hipótese alternativa (H<sub>1</sub>) é que a contribuição do incremento polinomial para o ajuste aos dados é significativa.

Assim, se o valor de F<sub>calculado</sub> for menor que F<sub>(α;v1,v2)</sub> crítico (tabelado), aceita-se a hipótese nula H<sub>0</sub>, que é insignificante a diferença entre a variância das superfícies de tendência, dessa forma, adotando a superfície de grau p (mais baixo) como suficiente. Caso contrário, rejeita-se a hipótese nula H<sub>0</sub> e se aceita a hipótese alternativa H<sub>1</sub>, que diz que a contribuição do incremento polinomial para o ajuste dos dados é significativa, sugerindo que se calcule a superfície para um grau polinomial maior e se verifique novamente a significância do incremento.

### **2.1. Comparação Quantitativa de Superfícies de Tendência**

Muitas aplicações procuram ajustar superfícies de tendência a variáveis simples em uma determinada área, mas a outras interessa o ajuste a múltiplas variáveis, ou

variáveis simples medidas em diferentes áreas, sendo possível, nestas situações, a determinação quantitativa das similaridades entre as superfícies ajustadas.

Goodman (1983) propõe uma metodologia de comparação de distribuições espaciais mapeadas que pode ser estabelecida com base nas propriedades dessas superfícies, sendo dada especial atenção, no artigo citado, aos seguintes grupos:

- ✓ Coeficientes de correlação produto-momento e estrutural entre valores reais e valores previstos para a superfície  $z_i^*$ ;
- ✓ Distorções entre valores  $z_i^*$  padronizados;
- ✓ Correlação e distância taxonômica entre os coeficientes das superfícies e coeficientes da superfície ponderados pela contribuição percentual da soma de resíduos quadrado;
- ✓ Comparação entre direções e mergulhos das superfícies de 1º grau; e
- ✓ Correlação entre mergulhos de superfícies de 2º e 3º grau.

Aqui se pretende aplicar a análise de superfície de tendência aos valores calculados ( $z_i$ ) e os resíduos ( $e_i$ ) mapeados para prever valores a serem interpolados. Depois de determinados os coeficientes da superfície que melhor se adapte ao conjunto de dados ( $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$  observado) sob estudo, obtém-se um determinado valor ( $z_i$  previsto), pela aplicação das coordenadas ortogonais (posição) desejadas e os coeficientes calculados, onde não se possui o valor  $z_i$  observado. A esse valor calculado pela superfície de tendência é acrescentado o resíduo, lido nesse mesmo ponto e extraído a partir do mapa de resíduos correspondente.

Esta técnica resulta num melhor preditor do que aquele que seria obtido a partir de um mapa de isovalores observados, por que a distribuição absoluta dos valores residuais ( $e_i$ ) e o seu desvio padrão são usualmente menores que os valores observados.

Uma aplicação é a extensão desta técnica numa situação onde se conhece melhor a configuração de uma superfície e não tão bem de uma outra, mas pretende-se compará-las entre si. Isso acontece quando se quer, e.g., determinar o volume de uma unidade estratigráfica a partir de vários poços que não chegaram a atravessá-la na totalidade, assim dispõe-se de mais informações sobre o topo da unidade do que de sua base, mas se que conhecer ambas com o mesmo grau de certeza. Nessa situação os valores residuais da superfície superior podem ser usados para prever se valores a serem estimados na superfície inferior estarão acima ou abaixo do que os valores computados, se:

- 1) As superfícies de tendência das porções superior e inferior tiverem

configurações semelhantes; e

2) Os resíduos mapeados dessas duas superfícies apresentarem alguma correspondência.

Quando ambas situações ocorrem, uma suposição pode ser feita de que os “desvios” que ocorrem na superfície inferior devem ser reflexo dos resíduos positivos ou negativos da superfície superior.

A comparação entre os desvios residuais em pontos onde dados são disponíveis para ambas as superfícies fornecerão uma medida da probabilidade dos resíduos da superfície superior servir como preditor para a unidade inferior.

Esse trabalho tinha como uma das propostas iniciais aplicar tal metodologia, em um estudo de caráter hidrogeológico, com dados obtidos da área urbana do município de Ribeirão Preto (SP), constituindo-se de valores topográficos e valores da superfície potenciométrica/piezométrica. Dispondo-se de um número bem maior com referências aos dados topográficos (cerca de 14 mil pontos) a intenção era determinar a configuração do nível da superfície potenciométrica com maior acurácia.

Landim, Sturaro e Monteiro (1995) demonstraram a importância dos coeficientes de correlação entre os valores observados de ambas as superfícies como ferramenta que deve ser melhor explorada para a aplicação da cokrigagem, procedimento geoestatístico de maior complexidade, já que a medida que os coeficientes de correlação espacial entre as variáveis diminui, o erro associado à estimativa da variável que se estuda aumenta. Esses autores aplicaram a comparação de superfícies de tendência (GOODMAN, 1983) associada a geoestatística entre as superfícies topográfica e piezométrica de Bauru (SP), para o emprego da cokrigagem.

Para o presente estudo não foi possível o emprego dessa metodologia associada à cokrigagem (cf. LANDIM; STURARO; MONTEIRO, 1995), porque o rebaixamento da superfície potenciométrica já seria da ordem de 10 a 25 metros no final da década de 1980 (MONTENEGRO; RIGHETTO; SINELLI, 1988) e atualmente o coeficiente de correlação linear entre a superfície topográfica e da superfície potenciométrica é de 25,9%, considerada muito baixa, fornecendo variogramas cruzados sem sentido.

### **3. Geoestatística Clássica – Krigagem e Simulação Estocástica**

Daniel G. Krige (KRIGE, 1951), estudando a concentração de ouro verificou que não haveria sentido em estudar a variância desses teores sem considerar a distância entre as amostras. Georges Matheron, aproveitando os estudos de Krige, desenvolve a

Teoria das Variáveis Regionalizadas (MATHERON, 1963; MATHERON, 1971), definindo a Geoestatística como “a aplicação do formalismo matemático de funções aleatórias ao reconhecimento e predição de fenômenos naturais”. Para Uzunaki (1994) o fenômeno natural é caracterizado pela distribuição espacial de uma ou mais variáveis, denominada de variável regionalizada. Neste trabalho assumiremos que fenômeno natural é aquele que ocorre no mundo real e é caracterizado pela distribuição *espaço-temporal* de uma ou mais variáveis.

Uma amostra reflete o valor assumido por uma variável aleatória num ponto em um certo momento (cf. REMACRE, 1999a; CHRISTAKOS, 1992). Essa variável aleatória obedece à função aleatória que é descrita por uma função de densidade de probabilidade. Para o desenvolvimento da metodologia geoestatística assume-se algumas hipóteses relativas à estacionaridade da variável, seja de sua média (1<sup>o</sup> momento) ou de sua variância (2<sup>o</sup> momento). O comportamento de uma variável pode ser estacionário para todo o fenômeno ou ocorrer somente numa zona de vizinhança bastante restrita, com os valores esperados variando de maneira regular. A medida do grau de dependência espacial entre amostras, num suporte específico, pode ser obtida usando os valores obtidos quando se assume uma ergodicidade nos incrementos (LANDIM, 1998).

Nas geociências e ciências ambientais diversas obras já tratam da geoestatística, com muitos exemplos e detalhando a teoria e o formalismo matemático, tais como, Journel e Huijbregts (1978), Davis (1986) e Isaaks e Srivastava (1989), além de outras mais recentes como Deutsch e Journel (1997), Goovaerts (1997), Armstrong (1998), Olea (1999), Chilès e Delfiner (1999), Emery (2000) e Clark e Harper (2000). Em língua portuguesa, tratando do tema Geoestatística, destacam-se Guerra (1988), Valente (1989), Landim (1998), Soares (2000) e Yamamoto (2001). Existem ainda revistas especializadas como *Mathematical Geology*, *Computers & Geosciences* e a lista de discussão e site AI-GEOSTATS. Outras obras mais antigas e artigos não são citados aqui, mas muitos merecem atenção de um leitor interessado em Geoestatística.

### 3.1. Conceitos Básicos

O objetivo dos estudos em Geoestatística é a modelagem<sup>5</sup> de um fenômeno real usando alguns pontos de dado experimentais no espaço de estudo, i.e., estudar o comportamento espacial de uma variável (ou mais, no caso multivariado), contínua ou discreta, utilizando dados discretos (amostras – dados medidos, indicados ou inferidos). Um problema comum em ciências naturais é a necessidade do mapeamento (interpolação, extrapolação, filtragem e deconvolução) das variáveis estudadas por essas ciências.

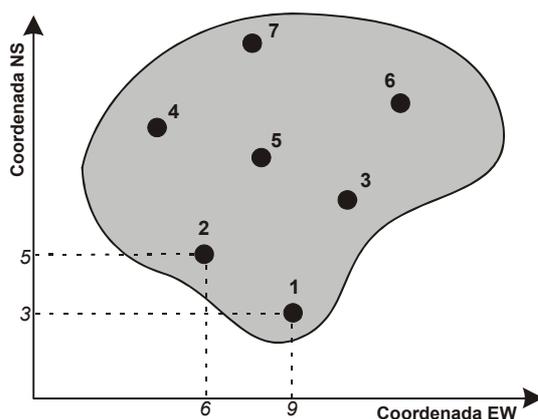
A Análise Espacial é um ramo das ciências que utiliza diversas metodologias e técnicas para o estudo do comportamento espacial de variáveis. O primeiro passo de qualquer estudo espacial é a definição do delineamento experimental, que envolve, entre outros procedimentos, a escolha da técnica de coleta de amostras e a determinação da malha de amostragem. As malhas de amostragem podem ser do tipo: 1. *aleatória*, quando a distribuição das amostras é casual; 2. *agregada* ou *agrupada*, quando ocorrem grupos de amostras mais próximas; e 3. *regular* ou *homogênea*, quando as amostras estão regularmente espaçadas. O arranjo espacial mais comum é o agrupado, seguido pelo aleatório e por fim regular, para amostras naturais. É comum o delineamento experimental em malha regular, porém, por motivos diversos, é difícil a coleta de dados respeitando-se esse arranjo.

Aqui não serão discutidas as diversas técnicas de amostragem, que podem variar para cada área do conhecimento, objeto e objetivo de estudo, escala de trabalho entre outros fatores, mas ressalta-se a necessidade de se conhecer a posição das amostras no espaço.

Na figura seguinte (Fig. 31) observa-se uma área hachurada em cinza, representando um espaço amostral qualquer. Os pontos em preto representam pontos de amostragem, podendo ser um ponto (adimensional), um bloco (área) ou o centróide de um arranjo amostral (e.g., amostragem por PCQ - *point quarter center* - ou parcelas).

---

<sup>5</sup> O termo mais adequado seria modelação, que é a aplicação de um método escolhido pelo modelador à solução de determinado problema; diferindo de modelagem, que é a solução de um problema por um método julgado adequado. Porém, para efeitos de simplificação é empregado aqui o termo modelagem, como corrente na literatura.



**Fig. 31:** Mapas de pontos amostrais

O número sobre cada ponto é a identificação do ponto amostral e os números nos eixos das ordenadas e abscissas são as coordenadas dos pontos no espaço.

Nesses pontos são medidas as variáveis em estudo, tais como: teor de concentração de um elemento químico específico, cota altimétrica de uma superfície (e.g., topográfica ou potenciométrica) ou qualquer outra variável a ser estudada.

Desta forma, apresentam-se os dados em uma tabela (Tab. 11), por exemplo:

**Tab. 11:** Tabela de dados hipotéticos

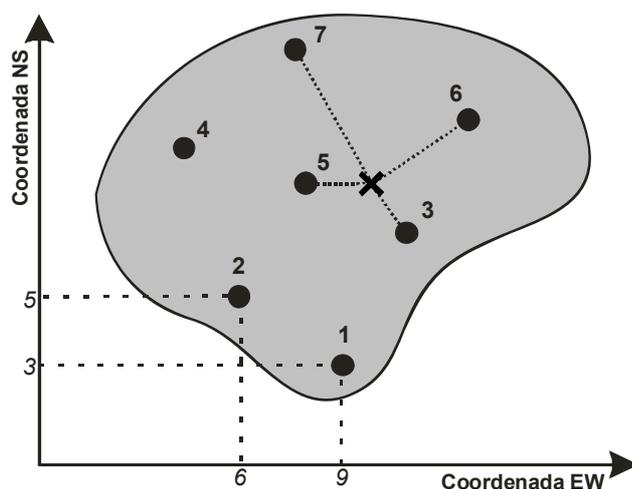
Ponto	Coord. EW	Coord. NS	Teor (Arsênio)	Cota altimétrica (topografia)	Cota altimétrica (potenciométrica)
1	9	3	15 ppb	652 m	640 m
2	6	5	4 ppb	577 m	565 m
3	11	7	33 ppb	735 m	715 m
...	...	...	...	...	...

A partir das coordenadas do ponto e dos valores assumidos pela variável nesses pontos, pode-se obter um mapa da distribuição espacial para cada variável, utilizando-se um algoritmo de interpolação.

As coordenadas para cada ponto devem ser obtidas num mesmo sistema de referência. Normalmente utilizam-se mapas com projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), em metros ou quilômetros, utilizando-se o mesmo datum do mapa base, por exemplo, Córrego Alegre (MG), SAD-69/Brasil ou WGS-84 para datum horizontal e Imbituba (SC) para datum vertical. É sugerido que essas medidas sejam obtidas com equipamentos de GPS (posicionamento global por satélite) geodésico ou mapas de escala grande (1:1.000 ou 1:2.000) para minimizar os erros associados, principalmente em áreas que não se tenham referências como estradas, edificações, linhas de transmissão, acidentes geográficos (rios, córregos, morros etc.).

### 3.1.1. Interpolação de Variáveis

Interpolar é prever<sup>6</sup> o valor da variável em estudo num ponto que não foi amostrado numa posição em que existem pontos circunvizinhos já conhecidos. Na figura a seguir (Fig. 32) a cruz representa o ponto que se pretende prever o valor.



**Fig. 32:** Interpolação de um ponto (X) utilizando pontos amostrais

A base de muitos métodos de interpolação é a mesma. Usando-se métodos lineares de interpolação, o valor de um ponto a ser predito ( $Z^*$ ) é a somatória do produto entre o valor da variável de um ponto conhecido ( $Z_i$ ) por um peso calculado ( $\lambda_i$ ) para os pontos  $i$ , variando de 1 até  $N$ , onde  $N$  representa o número total de pontos considerados.

$$Z^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i$$

Para isso, podem-se utilizar os pontos já conhecidos, no caso da figura anterior, pontos 3, 5, 6 e 7. Um primeiro valor seria a média aritmética dos pontos mais próximos, assim os pesos dos pontos seriam iguais. Para 4 pontos utilizados ( $N=4$ ), na forma geral, tem-se:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1}{4}$$

Então, o cálculo do valor da variável no ponto a ser predito, pela média aritmética,

<sup>6</sup> Neste trabalho não se faz distinção entre PREDIÇÃO e ESTIMATIVA, sendo usados como sinônimos. No entanto, matematicamente, *predição* é o cálculo do valor assumido pela variável num ponto desconhecido (e.g., krigagem) e *estimativa* é o ajuste de parâmetros a um dado (e.g., modelagem variográfica)

é:

$$Z^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2 + \lambda_3 Z_3 + \lambda_4 Z_4 = \frac{1}{4} Z_1 + \frac{1}{4} Z_2 + \frac{1}{4} Z_3 + \frac{1}{4} Z_4$$

Supondo que os valores da variável em estudo ( $Z$ ) nos pontos 3, 5, 6 e 7 sejam  $Z_3=300$ ,  $Z_5=100$ ,  $Z_6=200$  e  $Z_7=500$ , o valor de  $Z$  no ponto predito ( $Z^*$ ) será:

$$Z^* = \sum_{i=3,5,6,7} \lambda_i Z_i = \frac{1}{4} Z_3 + \frac{1}{4} Z_5 + \frac{1}{4} Z_6 + \frac{1}{4} Z_7 = \frac{1}{4} 300 + \frac{1}{4} 100 + \frac{1}{4} 200 + \frac{1}{4} 500 = 300$$

Na verdade, é até intuitivo que, quando trabalhando no espaço, pontos conhecidos mais próximos aos pontos a serem preditos devam ter um peso maior, pois sua influência é maior. Assim, poderíamos utilizar um outro algoritmo para calcular os pesos, baseado no Inverso da Distância (quanto menor é a distância entre o ponto conhecido e o predito, maior é o peso):

$$Z^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i = \lambda_1 Z_1 + \lambda_2 Z_2 + \lambda_3 Z_3 + \lambda_4 Z_4 = \frac{1}{d_1} Z_1 + \frac{1}{d_2} Z_2 + \frac{1}{d_3} Z_3 + \frac{1}{d_4} Z_4$$

Supondo que essa distância seja  $d_3=2$ ,  $d_5=2$ ,  $d_6=4$  e  $d_7=5$ , teremos:

$$Z^* = \sum_{i=3,5,6,7} \lambda_i Z_i = \frac{1}{d_3} Z_3 + \frac{1}{d_5} Z_5 + \frac{1}{d_6} Z_6 + \frac{1}{d_7} Z_7 = \frac{1}{2} 300 + \frac{1}{2} 100 + \frac{1}{4} 200 + \frac{1}{5} 500 = 350$$

Dessa forma, pode-se ver que o valor predito depende diretamente do método de interpolação escolhido. No exemplo, para a Média Aritmética o valor obtido é  $Z^*=300$  e para o Inverso da Distância é  $Z^*=350$ .

Existem outros métodos para se calcular o peso das amostras, como o Inverso da Distância à Potência, sendo mais comum o uso de uma potência 2 (IQD – Inverso do Quadrado da Distância), mas sem ser justificado o uso do quadrado como potência. Pelo IQD temos os pesos como:

$$\lambda_\alpha = \frac{1}{d_{\alpha 0}^\beta}$$

onde  $\lambda_\alpha$  é o peso da amostra  $\alpha$ ,  $d$  é a distância entre a amostra  $\alpha$  e o ponto de predição  $0$ , elevados à potência  $\beta$ . Mas  $\beta$  poderia ser 1; 2; 3; 1,74; 2,31, ..., sendo 2 a potência normalmente utilizada, fazendo com que uma amostra tenha o peso sobre o ponto de predição diminuindo com o quadrado da sua distância.

Qual o valor REAL do ponto? O único jeito de saber é medindo a variável no ponto que foi predito, sabendo ainda que pode ainda haver um erro associado à medida, dado pela calibração do equipamento utilizado, da técnica de medida e outros erros decorrentes disso. Mas, qual é o valor mais PRÓXIMO AO REAL? Bem, neste caso a resposta é bem mais difícil. Existem diversos métodos de interpolação que podem

fornecer resultados diferentes, mas cada um vai ter uma resposta para cada variável de estudo.

Os métodos mais comuns de interpolação são: Vizinho mais Próximo, Vizinho Natural, Triangulação Linear, Triangulação de Delaunay, Polígonos de Voronoi, Inverso da Potência da Distância (sendo o IQD, Inverso do Quadrado da Distância o mais utilizado), Mínima Curvatura (*Spline*), Regressão Polinomial, Krigagem (com mais de 30 técnicas distintas) e Máxima Entropia Bayesiana.

Landim (2000) apresenta a comparação entre alguns desses métodos e dicas práticas das vantagens e desvantagens de cada um e quando usar ou não (Tab. 12).

**Tab. 12:** Comparação entre métodos de interpolação

<b>Algoritmo</b>	<b>Fidelidade aos dados originais</b>	<b>Suavidade das curvas</b>	<b>Velocidade de computação</b>	<b>Precisão geral</b>
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da Distância	3	4	2	4
Superfície/ Tendência	5	1	3	2
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigagem	2	3	5	1

1 = melhor 5 = pior

### 3.1.3. Geoestatística como Método de Interpolação

A base da análise Geoestatística, que possui mais de 30 técnicas de interpolação, é levar em conta a dependência ou a (auto-)correlação espacial dos dados para a atribuição de pesos aos pontos circunvizinhos a serem utilizados na interpolação. Assim, Geoestatística é a teoria e prática da estatística aplicada ao estudo de dados distribuídos no espaço e permite ainda quantificar a incerteza associada a cada ponto interpolado, seja pela distribuição espacial dos pontos pela variância da krigagem, levando-se em conta seus valores pela variância da interpolação (YAMAMOTO, 2000), pela geração de cenários por simulação geoestatística (CHILÈS; DELFINER, 1999) ou pela função de densidade de probabilidade a posteriori (CHRISTAKOS, 2000) pelo processamento de informação e conhecimento disponível sobre o fenômeno, conforme será discutido adiante.

### 3.1.4. Funções Aleatórias

A Geoestatística baseia-se na Teoria de Variáveis Regionalizadas (MATHERON, 1971) ou Funções Aleatórias, nesse item é feita uma revisão de seus conceitos básicos (cf. REMACRE, 1999a; 1999b; CHRISTAKOS, 1992).

Seja uma função aleatória  $X(p)$ , um processo estocástico, e  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$  pontos de apoio. A função aleatória é uma coleção de variáveis aleatórias (v.a.), sendo  $x(p_1), x(p_2), x(p_3), \dots, x(p_k)$ , onde cada elemento em si é uma v.a. no ponto  $p$ . Assim, temos a seguinte representação:

$$X : R^n \times T \rightarrow L_2(\Omega, \tau, P)$$

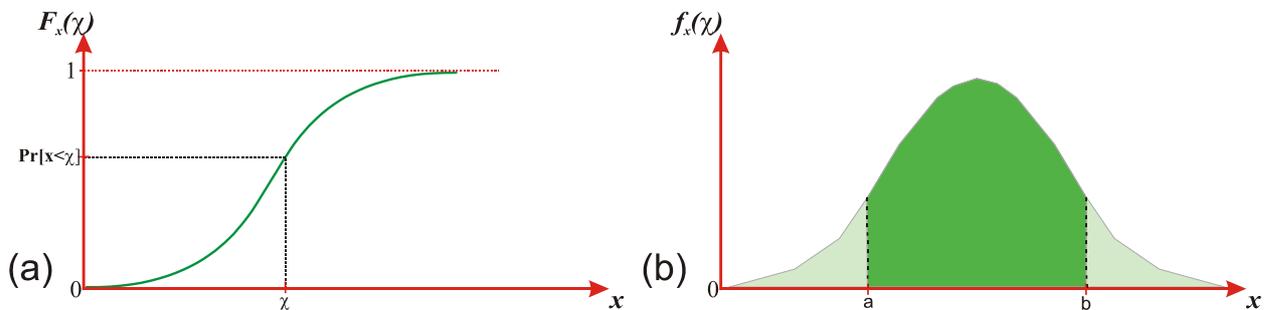
onde  $X$  é uma função aleatória, mapeando o espaço-tempo  $R^n \times T$  (onde  $n$  é a dimensão espacial), definida pelo momento estatístico de segunda ordem  $L_2(\cdot)$  para o conjunto de todos os eventos possíveis  $\Omega$  e conjunto de dados  $\tau$ , com  $P$  probabilidade de ocorrência.

Assim, a probabilidade da v.a.  $x$  assumir um valor menor ou igual a  $\chi$  é dada por:

$$\Pr[x \leq \chi] = F_x(\chi)$$

definindo uma função de densidade acumulada (ou *cdf*, do inglês, *cumulative density function*) (Fig. 33a). Sua derivada, em função de dado valor  $\chi$ , é denominada função de densidade de probabilidade (ou *pdf*, do inglês, *probability density function*), como (Fig. 33b):

$$f_x(\chi) = \frac{\partial}{\partial \chi} F_x(\chi)$$

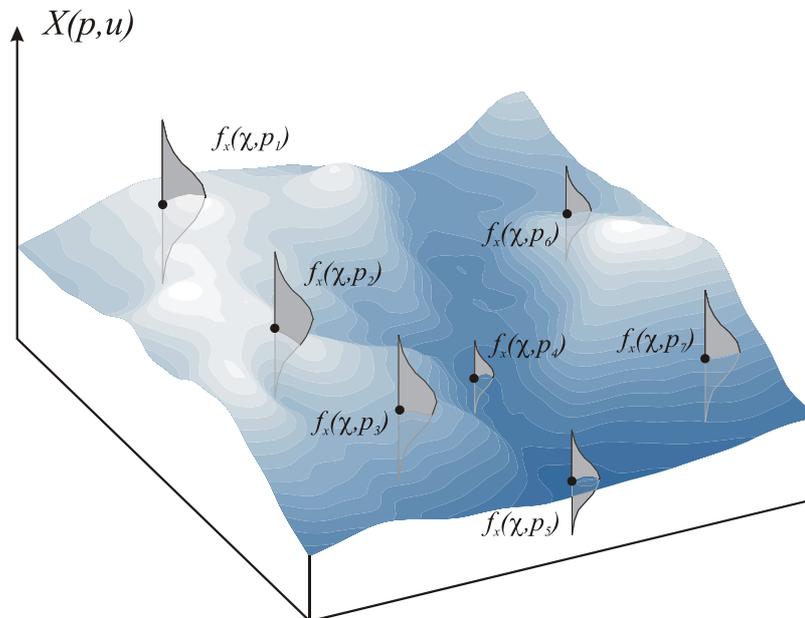


**Fig. 33:** Exemplo de uma *cdf* (a) e uma *pdf* (b)

Dessa forma, a *cdf* e a *pdf* definem a probabilidade de ocorrência dos valores assumidos pela função aleatória  $X(p)$  para cada ponto  $p$  (Fig. 34). Essa probabilidade é definida, por convenção no intervalo 0 e 1, representando algo entre 0% e 100% de ocorrência de cada valor. Algumas de suas propriedades são:

- ✓ se  $a \leq b$ , então  $\Pr[x < a] \leq \Pr[x < b]$
- ✓  $F(-\infty) = 0$  e  $F(+\infty) = 1$
- ✓  $\Pr[a \leq x \leq b] = F(b) - F(a)$
- ✓ desde que  $F_x(\chi)$  seja crescente,  $f_x(\chi) \geq 0$  (positiva ou nula)

- ✓  $\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a) = \Pr[a \leq x \leq b]$
- ✓  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$
- ✓  $f(-\infty) = 0$  e  $f(+\infty) = 0$



**Fig. 34:** Realizações de função aleatória  $X$  nos pontos  $p$  (mod. CHRISTAKOS, 2000)

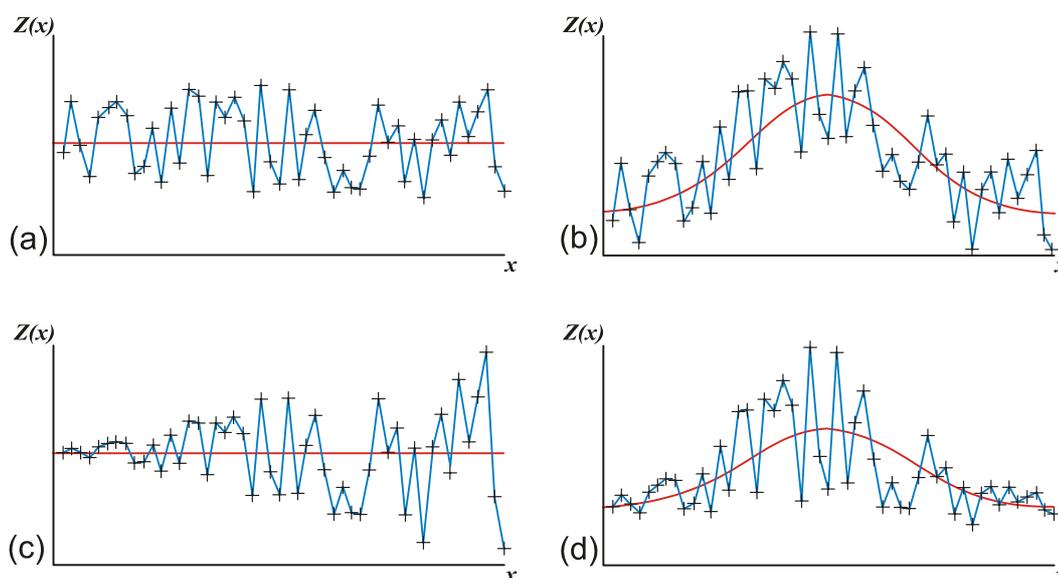
Na prática é difícil e rara a necessidade de se conhecer completamente esta lei de distribuição para a Geoestatística Clássica, muitos dos problemas são geralmente resolvidos com os dois primeiros momentos estatísticos (média e variância).

Uma função aleatória espaço-temporal (*spatiotemporal random field*) pode ser classificado, segundo algumas propriedades, em (CHRISTAKOS; SERRE, 2001):

- ✓ *Grau de continuidade:* discreta ou contínua;
- ✓ *Número de variáveis:* escalar (univariada) ou vetorial (multivariada);
- ✓ *Forma das leis de probabilidades:* gaussiana ou não-gaussiana;
- ✓ *Graus de variabilidade espaço-temporal:* homogênea/estacionária (ergódica ou não-ergódica), heterogênea/não-estacionária e graus intermediários de variabilidade; e
- ✓ *Memória:* markoviana ou não-markoviana.

Um maior destaque será dado ao grau de variabilidade espaço-temporal. Assim, homogeneidade é uma propriedade definida para a dimensão espacial e estacionaridade definida para a dimensão temporal. É importante lembrar que uma variável pode ter estacionariedade tanto no momento estatístico de 1ª ordem (média) quanto de 2ª ordem

((co)variância) (Fig. 35).



**Fig. 35:** Perfis hipotéticos de dados ilustrando relações comuns entre a média local (vermelho) e a variabilidade local (azul). (a) média e variabilidade constantes; (b) média local com tendência e variabilidade constante; (c) média constante e variabilidade local com constante; e (d) média e variabilidade locais com tendência (mod. ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989)

### 3.1.5. Estatística Espacial

Na estatística clássica as observações são realizações independentes de uma mesma função aleatória. Para a Geoestatística as funções aleatórias em diferentes locais do espaço não são mais independentes, mas são espacialmente correlacionadas, com um grau de correlação dependente da distância entre os dados considerados.

Um dos requisitos da Geoestatística é o uso de variáveis aditivas na sua aplicação. As variáveis são ditas aditivas quando a média de observações individuais é igual ao valor médio do conjunto de que são tomados.

Um exemplo de variáveis não aditivas é a mistura de 10 litros de tinta branca com 20 litros de tinta azul, produzindo 30 litros de tinta azul escuro (e não azul claro), pois a quantidade de pigmentos azuis é maior que a quantidade de pigmentos brancos. Se forem tomados os mesmos volumes de tinta branca e azul, supomos 10 litros, teremos 20 litros de azul claro. Assim, a quantidade de pigmentos é aditiva, porém a concentração de pigmentos somente será aditiva se o volume de tinta for o mesmo (GEOVARIANCES, 1996).

Da mesma forma em Geologia, tomando-se a acumulação de determinada variável regionalizada, como a quantidade de metal, produzimos uma nova variável

regionalizada que é aditiva, entretanto nem todas as variáveis regionalizadas são aditivas, e.g., permeabilidade. É comum o uso de altura porosa, que é o produto da porosidade pela espessura da camada, em Geologia do Petróleo, ao invés de porosidade, que não é uma variável aditiva.

A propriedade aditiva é uma condição necessária para que uma variável regionalizada seja estimada pela Krigagem de Blocos (OLEA, 1991).

### **3.2. Análise Estrutural**

#### *3.2.1. Análise Exploratória*

O primeiro passo da análise geoestatística é a análise exploratória, que tem por objetivo a identificação de possíveis valores extremos (*outliers*) e tendências, detecção da existência de diferentes populações ou a transformação dos dados para uma distribuição normal (anamorfose), se necessário.

Esta análise faz uso das ferramentas da estatística descritiva para o estudo das amostras, tais como: *histograma* – para estudo da distribuição da população, plotando-se as classes de valores assumidos pelas observações pela frequência observada; *testes de normalidade* – para verificar se os dados possuem uma distribuição gaussiana (normal), podendo ser testada graficamente ou por testes estatísticos específicos; *transformação gaussiana* (anamorfose) – buscando transformar dados de uma distribuição qualquer em gaussiana; *gráficos de dispersão* – usados para verificar a correlação de variáveis, no caso bi ou multivariado ou na tentativa de verificar a presença de tendências; além das medidas dos momentos estatísticos e outras medidas da estatística descritiva necessárias à compreensão da(s) variável(eis) em estudo (média, mediana, moda, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose, máximo, mínimo, amplitude, percentis e alcance interquartil). No caso multivariado pode-se ainda julgar necessária a utilização de técnicas como análise de agrupamentos (*cluster analysis*), de componentes ou coordenadas principais, correspondência, canônica etc.

#### *3.2.2. Correlação Espacial – Semivariograma*

A Geoestatística assume algumas hipóteses de estacionariedade, a depender da técnica de krigagem utilizada e por isso serão revisados alguns conceitos básicos:

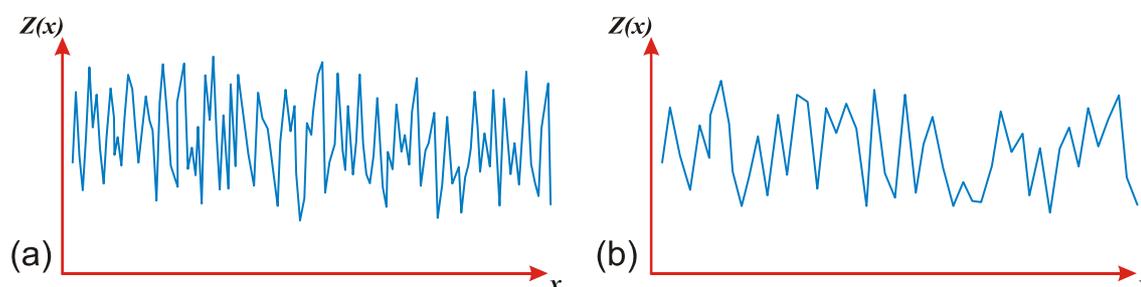
*Estacionariedade Estrita*: o comportamento da variável é o mesmo em qualquer posição em que o dado é considerado, i.e., a distribuição é invariante por translação.

**Estacionaridade de 2ª Ordem:** i) existe uma esperança  $E[Z(x)] = m$ ,  $\forall x$  e não depende de  $x$  (posição); e ii) para cada par  $\{Z(x), Z(x+h)\}$  existe covariância e depende somente da distância  $h$ .

**Hipótese Intrínseca:** i) existe uma esperança  $E[Z(x)] = m$ ,  $\forall x$  e não depende de  $x$  (posição); e ii) para  $\forall h$  o incremento  $[Z(x) - Z(x+h)]$  tem variância finita e não depende da posição  $x$ .

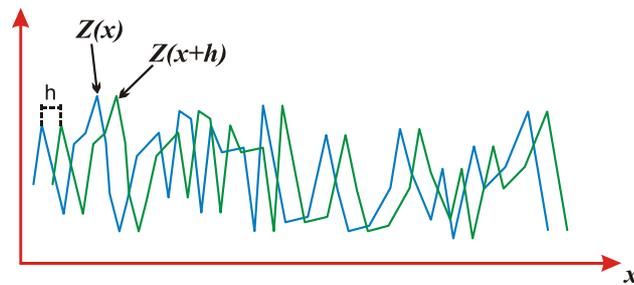
Dito de outra forma, a estacionaridade de 2ª ordem admite que se conheça a média dos dados e essa média seja a mesma em qualquer parte do espaço estudado. Um exemplo de sua aplicação é a Krigagem Simples (para quando se conhece previamente essa média) e a Krigagem Ordinária (para quando não se conhece essa média a priori). A hipótese intrínseca é o caso em que a análise dos dados que vai requerer a aplicação de técnicas como a Krigagem Universal, que vai decompor a tendência e resíduos em duas componentes, uma determinística (chamada deriva ou tendência) e uma estocástica (resíduos), que dá origem a uma nova variável.

Uma variável pode ser errática, com alta variabilidade, ou não, no tempo e/ou espaço. Abaixo estão representadas uma variável com alta variabilidade (Fig. 36a) e outra com mais baixa variabilidade (Fig. 36b).

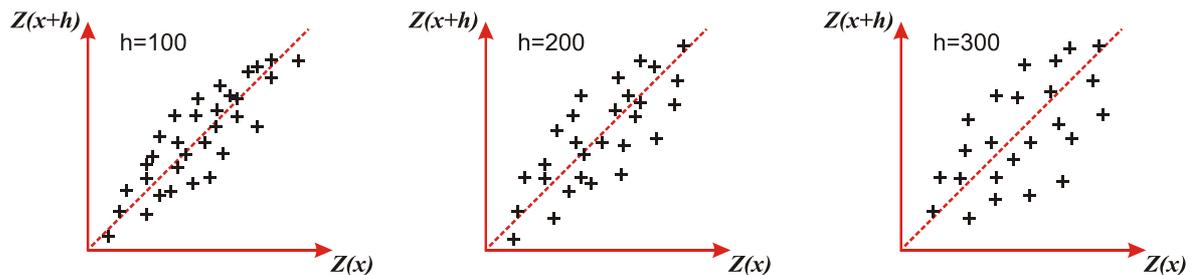


**Fig. 36:** Variável com (a) alta variabilidade e (b) baixa variabilidade

O estudo da variabilidade pode ser feito de uma variável original com relação a ela mesma transladada de  $h$  (Fig. 37), também chamado de passo, plotando-se o diagrama de dispersão entre as variáveis, para diversos valores de  $h$  (Fig. 38) (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).



**Fig. 37:** Variável original e transladada de  $h$

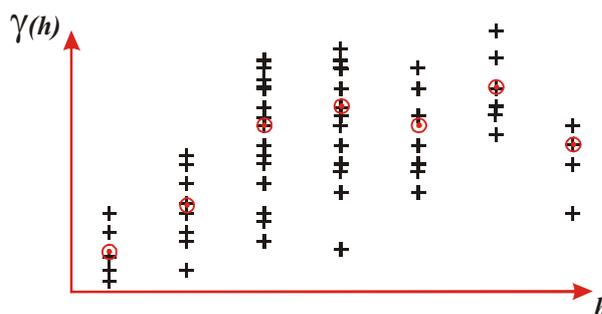


**Fig. 38:** Gráfico de dispersão entre as variáveis original e transladada para diferentes  $h$ 's ( $h=100$ ,  $h=200$ ,  $h=300$ ) (mod. ISAACS; SRIVASTAVA, 1989)

Com a análise estrutural, que é a caracterização e modelagem da dependência espacial, é possível estimar a dispersão das variáveis  $Z(x)$  e  $Z(x+h)$  em torno da 1ª bisetriz, para cada passo  $h$ . Assim, a distância entre o par e a 1ª bisetriz ( $Z(x)=Z(x+h)$ ) pode ser medida por  $d = (Z(x+h) - Z(x)) \cdot \cos 45^\circ$  e a dispersão dos pares em relação à 1ª bisetriz é  $d^2 = (Z(x+h) - Z(x))^2 \cdot \frac{1}{2}$ , sendo  $\frac{1}{2N} \cdot \sum_{i=1}^N (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2$  o momento de inércia para cada passo  $h$ . O gráfico do momento de inércia para os vários passos é chamado de semivariograma ( $\gamma(h)$ ), ou simplesmente variograma.

Para o caso 2-D e 3-D dá-se o mesmo procedimento, quando a variável aleatória  $Z(x)$  é correlacionada com  $Z(x+h)$ , i.e., a variável aleatória original plotada com a variável aleatória transladada pelo vetor  $\vec{h}$ , podendo-se também obter uma nova variável  $Z(x) - Z(x+h)$ .

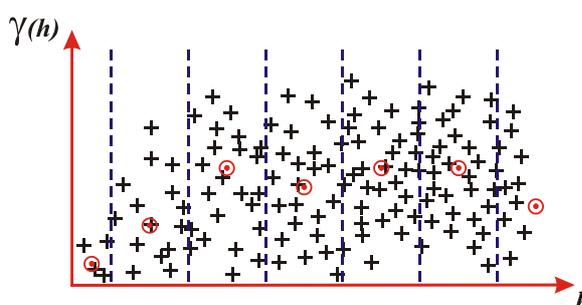
Plotando-se a metade do quadrado da distância para cada par de pontos obtém-se a nuvem de variogramas (Fig. 39), útil para a identificação de valores extremos, podendo-se decidir na manutenção ou exclusão de certos pontos que causam maior variabilidade no variograma para distâncias reduzidas.



**Fig. 39:** Nuvem de variogramas de amostragem em malha regular

Há certo consenso tradicional de se utilizar vetores  $h$  progressivamente maiores e regulares (múltiplos de um certo passo inicial  $h$ , e.g.,  $1h, 2h, 3h, \dots$ ), porém, isso não é uma condição restritiva para a análise variográfica, mas é necessário que o usuário tenha razões para assumir alguma irregularidade, devido à malha de amostragem, estruturação, agrupamento do fenômeno etc..

Como geralmente nos fenômenos naturais é difícil manter uma malha de amostragem regular, opta-se por trabalhar com classes de passos, plotando-se o valor médio da semivariância (no eixo das ordenadas) com o valor central da classe (eixo das abcissas), por convenção (Fig. 40). O usuário pode ainda optar por plotar o ponto com a média, mediana ou moda dos valores assumidos por  $h$  ou pela semivariância de cada classe. O pacote GS-LIB plota na média de  $h$ 's o valor  $h$  (DEUTSCH; JOURNEL, 1997).



**Fig. 40:** Nuvem de variogramas de amostragem em malha irregular e pontos do variograma experimental para cada passo  $h$

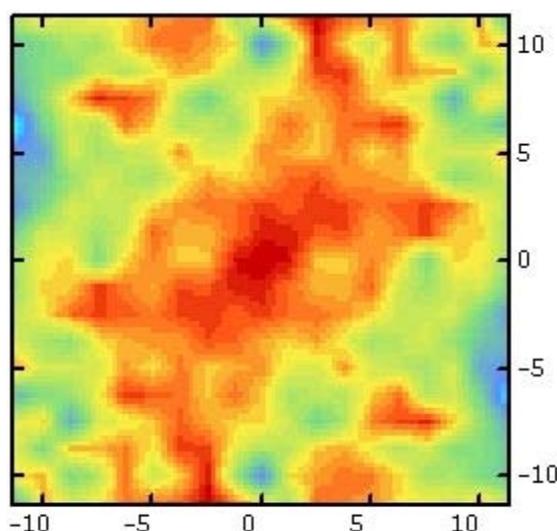
O tamanho da classe desse passo (*lag*) é definido pela tolerância do passo (*lag tolerance*), obtendo-se então um passo  $h$ , digamos 100 metros, com uma tolerância de 50 metros. Assim, temos as classes de 0 a 50 metros, de 50 a 150 metros, de 150 a 200 metros e assim por diante. Pode-se observar que para a primeira classe temos um passo de 50 metros, i.e.,  $h/2$ , pois o vetor  $h$  pode ser definido em  $360^\circ$ , obtendo-se  $h=100$  metros quando considerados os valores em todas as direções. O gráfico com as

classes de passos e os pontos centrais dos pares é chamado de variograma experimental.

### 3.2.3. Anisotropia

Os processos estudados pela Geoestatística podem ter um comportamento distinto para diferentes direções, este fenômeno é denominado anisotropia. Assim podemos definir variogramas direcionais, identificando uma maior correlação dos pares de pontos na direção leste-oeste que na direção norte-sul, por exemplo.

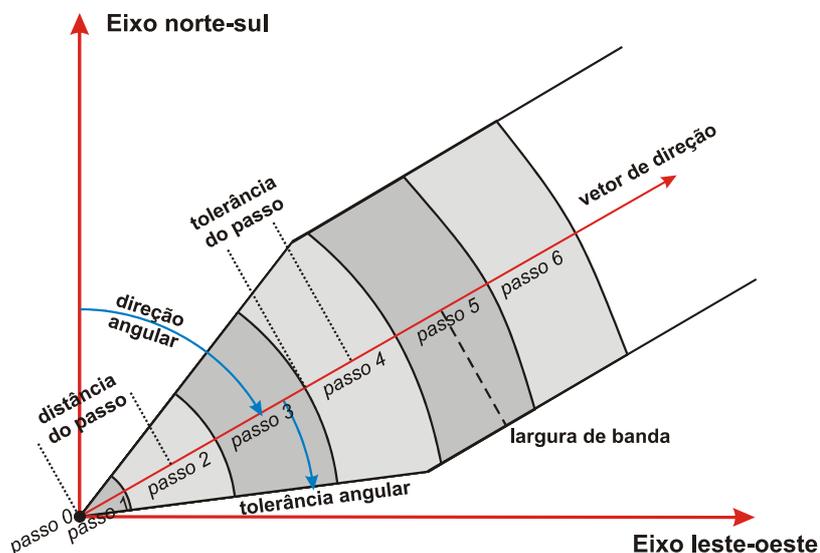
Para facilitar a observação de anisotropia é possível, primeiramente, elaborar o mapa de variogramas. O mapa de variogramas expressa o comportamento da variável, através de um gráfico de distância dos passos e a medida da média da semivariância dos pares. O ponto central do mapa de variograma indica a distância zero. Conforme se observam os valores de semivariância pela direção escolhida, do centro do mapa a um dos seus lados, considerando o ângulo formado entre o eixo vertical (norte) e a direção observada, digamos do centro para nordeste (o canto superior direito do mapa, direção N45E), tem-se uma idéia da variabilidade da variável estudada. No exemplo da figura abaixo (Fig. 41) é possível verificar que a variável possui uma maior continuidade na direção N45E que na direção N135E, pois os valores de semivariância (expresso pela paleta de cores) variam mais continuamente do centro para N45E em relação à direção N135E.



**Fig. 41:** Mapa de variogramas hipotético

Para se obter um variograma direcional é necessário a definição de alguns

parâmetros: direção do variograma<sup>7</sup>, tolerância angular, tamanho do passo (*lag distance*), tolerância do passo e largura da banda (Fig. 42).



**Fig. 42:** Parâmetros para variograma direcional (mod. DEUTSCH; JOURNAL, 1997)

Direção do variograma diz respeito à direção em que são tomados os pares de pontos para o cálculo do variograma. Numa malha irregular, principalmente, há que se admitir uma tolerância angular, pois os pares podem ter um desvio em termos de seus ângulos.

O tamanho do passo é a distância entre os pontos para definição dos pares que terão a semivariância calculada. Nesse caso também é necessária uma tolerância para que não se percam pontos. A largura de banda é uma distância que servirá para restringir o número de pontos a serem pareados.

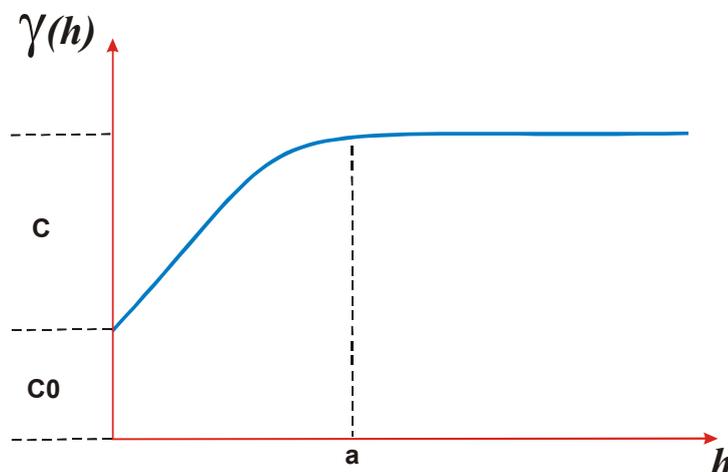
#### 3.2.4. Modelagem do semivariograma

A partir do variograma experimental calculado serão ajustados modelos de variograma. O ajuste é dado pela estimativa dos parâmetros do variograma ao variograma experimental.

Primeiramente é necessário que se conheçam os parâmetros de um variograma. Na figura seguinte (Fig. 43) o valor *a* denomina-se alcance ou amplitude (*range*) e corresponde à distância de influência de uma amostra sobre outra. A partir dessa

<sup>7</sup> Notar que se pode adotar a *convenção matemática*, com o ângulo de 0° no eixo leste-oeste positivo e aumentando progressivamente no sentido anti-horário, ou a *convenção geográfica*, com início no eixo norte-sul positivo e sentido horário.

distância  $a$  não há mais influência de um ponto observado sobre o ponto a ser predito, marcando o início de uma zona de aleatoriedade, para casos em que não há tendência (deriva, ou *drift*, do inglês) e é possível definir uma variabilidade máxima para os pares de pontos.



**Fig. 43:** Parâmetros de um variograma

A distância  $h \leq a$  define o fenômeno de transição, caracterizado por um variograma que atinge um máximo, denominado patamar (soleira, ou *sill*, do inglês). Geralmente esse patamar corresponde à variância estatística dos dados, chamada de variância à priori.

O valor  $C_0$  corresponde a um erro intrínseco à medida da variável, seja dada pela imprecisão de um equipamento, erro de medida ou uma aleatoriedade inerente à variável, sendo o testemunho de microrregionalizações que ocorrem em escalas inferiores à escala usada na amostragem, de dados que não foram coletados em intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente ao fenômeno em estudo (LANDIM, 1998). É chamado de efeito pepita e é causado por uma alta variabilidade para distâncias muito reduzidas. Tentativamente pode-se adensar uma malha de amostragem de dados para identificar um comportamento mais contínuo, eliminar pontos de amostragem extremos (*outliers*) ou mesmo obter uma duplicata do ponto, mas muitas vezes essa variabilidade é uma característica do processo estudado.

A contribuição  $C$  é denominada de variância de dispersão e representa as diferenças espaciais entre os valores de uma variável tomada em dois pontos separados por distâncias sucessivamente maiores.

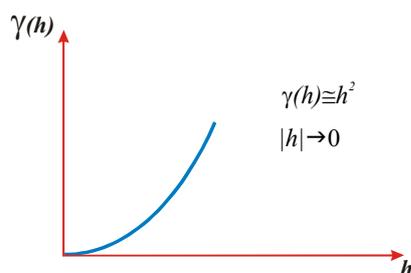
A componente aleatória ou efeito pepita relativo  $\varepsilon$ , um parâmetro calculado pela relação entre a contribuição e o efeito pepita ( $\varepsilon = C_0/C$ ), é o indicativo da aleatoriedade associada ao modelo e expressa a relativa aleatoriedade da regionalização (GUERRA,

1988). Royle (1979) criou classes de variação dessa componente na tentativa de quantificar essa aleatoriedade:  $0 < \varepsilon < 0,15$  – componente aleatória pequena;  $0,15 < \varepsilon < 0,30$  – componente aleatória significativa; e  $\varepsilon > 0,30$  – componente aleatória muito significativa.

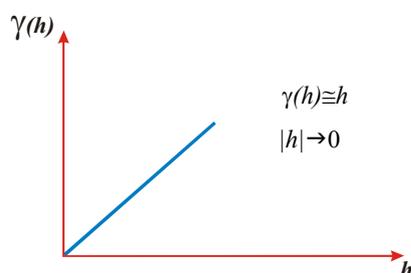
O extremo dessa situação, quando  $\varepsilon = 1$ , ou próximo a isso, define o modelo de efeito pepita puro, quando a covariância entre os pontos é nula. Nesse caso, a análise variográfica não se aplica (LANDIM, 1998) e a Geoestatística não fornece vantagens em relações aos outros métodos de interpolação como Inverso da Potência da Distância, Mínima Curvatura ou outro qualquer.

### Comportamento na Origem

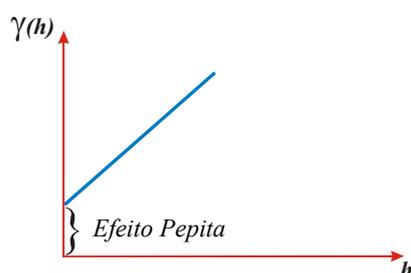
O comportamento do variograma na origem reflete o grau de continuidade da variável:



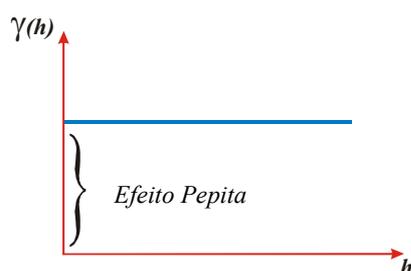
O comportamento parabólico na origem indica uma variável diferenciável, com grande continuidade.



O comportamento linear é indicativo de uma variável contínua.



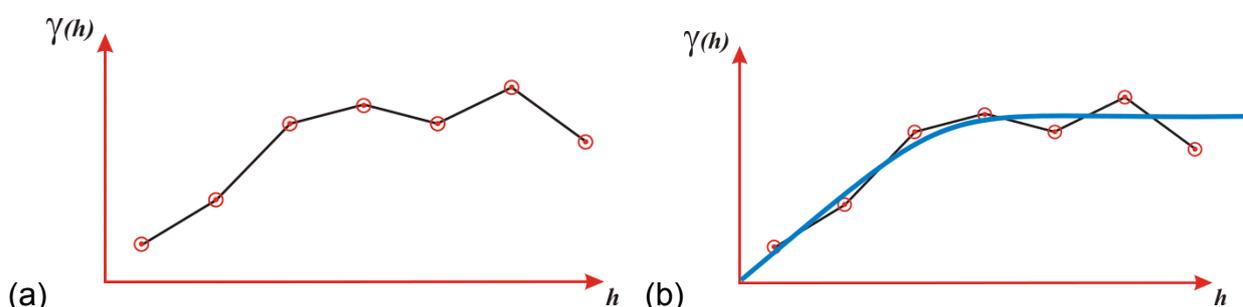
O efeito pepita parcial representa uma variável descontínua na origem, porém exibe ainda uma certa estruturação espacial, no caso da figura ao lado, um comportamento linear.



O Efeito Pepita Puro representa uma variável aleatória pura, com  $\gamma(0)=0$  e  $\gamma(h)=\sigma^2$  (variância a priori) para  $h \neq 0$ .

### Modelos de Variogramas

Existem basicamente três tipos de variogramas (GUERRA, 1988): 1. *variograma real*, que representa toda a população estudada e é desconhecido; 2. *variograma experimental* (ou observado), que é aquele calculado da amostragem realizada, portanto o único conhecido, mas lembrando-se sempre dos artifícios que o definem (direção e tolerância angular, número de passos e tolerância de passos, largura de banda e medida estatística de posição adotada - média) (Fig. 44a); e 3. *variograma teórico*, ou modelo variográfico, que é um modelo teórico (ou conjunto de modelos) ajustado ao variograma experimental pela variação dos parâmetros (Fig. 44b).



**Fig. 44:** Variograma experimental (a) e modelo ajustado (b)

O objetivo da análise variográfica (estudo estrutural) é o de ajustar um variograma teórico ao variograma experimental, de modo que com este modelo teórico possam ser feitas inferências em relação ao variograma real (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), para prosseguir com o cálculo dos pesos de cada amostra no processo de predição de um ponto desconhecido.

Os modelos de variograma podem ser divididos em dois grandes grupos: com e sem patamar. Os modelos sem patamar indicam que os dados apresentam uma variância teórica infinita, não existindo uma função de covariância, expressando um fenômeno não estacionário. Nesse caso a hipótese intrínseca é a única adequada, assumindo-se que o modelo dessa variável é a somatória de uma tendência e uma outra variável aleatória estacionária.

É grande o número de modelos de variogramas teóricos testados. Os mais conhecidos e usados de cada grupo são apresentados a seguir.

#### Modelos com patamar (ou de transição)

##### *Modelo Esférico ou de Matheron*

O modelo esférico (Fig. 45) é o mais comumente usado e é definido como:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \frac{3h}{a} - \frac{h^3}{a^3} \right) & \text{para } h \leq a \\ 1 & \text{para } h > a \end{cases}$$

Para distâncias  $h$  superiores ao alcance  $a$  ( $h > a$ ), não há correlação entre os pares  $Z(x)$  e  $Z(x+h)$  e  $\gamma(h)$  atinge o patamar. O alcance prático (*practical range*), que é a distância em que o variograma atinge o patamar, nesse modelo é igual a  $a$ . O alcance teórico (*theoretical range*) é a distância em que uma linha tangente à origem corta o patamar, sendo, no modelo esférico em que o comportamento na origem é linear, igual a  $2/3a$ .

#### *Modelo Exponencial ou de Formery*

O modelo exponencial (Fig. 45) é o mais comumente usado e é definido como:

$$\gamma(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)}$$

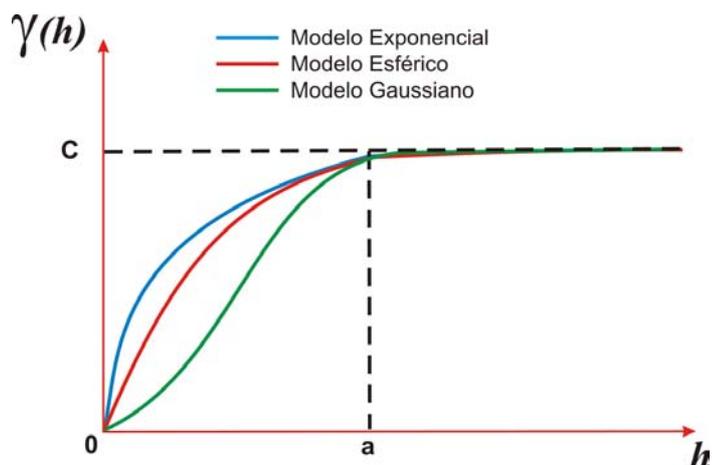
O modelo exponencial é um modelo com patamar onde o alcance prático é assumido como 3 vezes o alcance teórico ( $3a$ ), apesar de que o patamar será alcançado somente para  $h = \infty$  (VALENTE, 1989). Nota-se que o patamar é uma assíntota do variograma exponencial.

#### *Modelo Gaussiano ou de Gauß*

O modelo gaussiano (Fig. 45) tem comportamento parabólico na origem e patamar (fenômeno de transição) e é definido como:

$$\gamma(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)}$$

É freqüentemente adequado para fenômenos suaves, pois tem pequena variabilidade para curtas distâncias, indicada por uma tangente horizontal na origem. Tem um alcance prático de  $a\sqrt{3}$ . A existência de um efeito pepita nesse modelo só é admitida pela presença de erros de amostragem, uma vez que os fenômenos que seguem a esse modelo são extremamente regulares.



**Fig. 45:** Modelos de variograma com patamar

### Modelos sem patamar

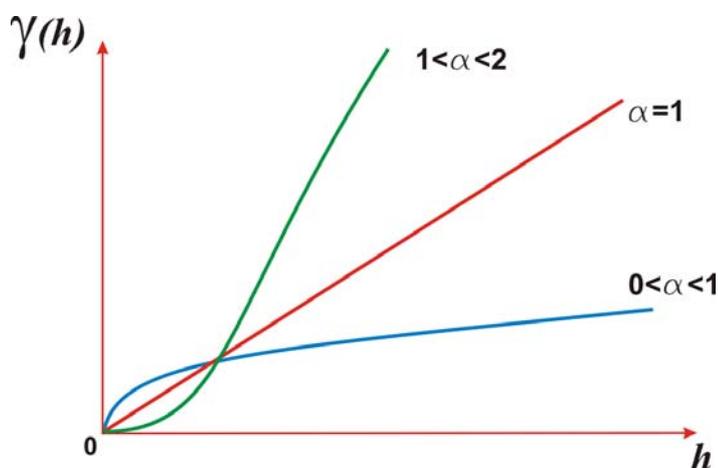
#### *Modelo Potencial*

São todos aqueles modelos que se traduzem por equações da forma:

$$\gamma(h) = p.h^\alpha$$

onde  $p$  é um coeficiente positivo ( $p > 0$ ) e  $\alpha$  um expoente entre 0 e 2 ( $0 < \alpha < 2$ ) (Fig. 46). Os modelos potenciais têm maior aplicação para modelagem de fenômenos fractais.

Um caso particular do modelo potencial é o Modelo Linear, com expoente  $\alpha = 1$ . O coeficiente  $p$  é então determinado para  $\gamma(1)$ , i.e., com  $h = 1$  (KITANIDIS, 1997) e é formado pela reta que une a origem ( $h = 0$ ) ao ponto experimental obtido por  $h = 1$ . é um variograma com crescimento monotônico, refletindo uma evidente tendência (deriva) dada por um fenômeno não-estacionário.



**Fig. 46:** Modelos de variograma com patamar

### *Modelo Logarítmico ou de De Wijs*

O modelo logarítmico é mais comumente encontrado em aplicações da indústria mineral (VALENTE, 1989) e é definido como:

$$\gamma(h) = 3A \ln(h)$$

onde  $A$  é uma constante denominada de dispersão absoluta. O modelo torna-se linear caso se utilize o logaritmo da distância  $h$ . Sua maior aplicação é no estudo de teores de minérios de ouro e urânio, onde os valores são expressos em ppm (partes por milhão, ou gramas por tonelada).

### *Modelagem Variográfica*

É talvez a parte mais importante da Geoestatística Clássica, que pressupõe que os dados falem por si mesmos e se mostrem, representando a realidade (numa amostragem adequada e representativa), sendo o modelo variográfico ajustado assumido como representativo do variograma real.

Para Armstrong (1984) existem alguns problemas que podem ser observados na construção do variograma experimental e no ajuste do modelo variográfico e devem ser evitados:

- ✓ Escolha de classes de passo inadequadas, resultando em discrepâncias entre o número de pares de uma classe para outra;
- ✓ Mescla de populações distintas;
- ✓ Presença de valores irreais ou que resultem em alta assimetria na distribuição dos dados; e
- ✓ Erros de processamento e cálculo matemático no tratamento dos dados.

Ainda há que se chamar a atenção da adoção de modelos que não sejam autorizados (CHRISTAKOS; SERRE, 2001).

#### *3.2.5. Estruturas imbricadas (ou aninhadas)*

No caso de uma análise variográfica real, o modelo final pode se expressar como uma somatória de diversos modelos, principalmente com um efeito pepita.

### **3.3. Predição por Krigagem**

A krigagem é uma metodologia que possui um conjunto de técnicas de geração de uma malha de pontos para interpolação ou predição de pontos alvos (com valor desconhecido) a partir de dados experimentais e um modelo teórico de comportamento

espacial da variável. Como um interpolador linear, a krigagem perfaz técnicas de predição de pontos calculados como a média ponderada dos valores de dados e dependente da configuração geométrica do dado e do variograma.

### 3.3.1. Propriedades da Krigagem

É importante reconhecer que técnicas diferentes resultam em mapas diferentes, portanto, quando se faz uso dessas técnicas é importante identificar que técnica foi utilizada.

Uma vez fixado o variograma que será usado de modelo, para o mesmo conjunto de dados, a predição por krigagem é única e os pesos são assinalados de forma a minimizar a variância do erro da predição. Usando um variograma de efeito pepita puro, os pesos são igualmente distribuídos, sendo que, nesse caso, a geoestatística não oferece vantagens em relação a outros métodos de interpolação.

Conforme o alcance diminui o peso torna-se mais uniformemente distribuída para pontos com distância além do alcance.

A krigagem pode gerar o que é conhecido por *screen effect*, que é a sombra dada por pontos muito próximos ao ponto a ser predito sobre pontos que estão mais afastados. Esse efeito pode gerar pesos negativos, que não são proibidos, sendo comum quando existe uma forte correlação espacial, um longo alcance ou variogramas lineares ou gaussianos (GEOVARIANCES, 1996). A adição de um efeito pepita ao modelo variográfico, por mínimo que seja, é suficiente para criar somente pesos positivos, removendo o *screen effect*.

Outra propriedade importante é a gerada pelo efeito de desagregação dos dados (*declustering*). O peso total atribuído a dois pontos de dado muito próximos não é muito maior que o valor de um dado simples. Esse dado extra, num ponto próximo a outro já existente, não melhora a variância da krigagem.

Por vezes podem-se obter ponderadores e preditores negativos no processo de krigagem. Para se evitar esses problemas existem algumas alternativas:

- ✓ Restringir a vizinhança, o que altera os pesos das amostras;
- ✓ Adicionar um efeito pepita ao variograma, o que é um procedimento paliativo e pode não ser real;
- ✓ Tomar uma amostra por setor (quadrante ou octante) no elipsóide de procura; ou
- ✓ Promover uma “declusterização” dos pontos.

### 3.3.2. Aspectos práticos - Vizinhança

Para a predição de um ponto, a krigagem não faz uso de todos os pontos, é necessária a definição de uma vizinhança. A necessidade da definição de uma vizinhança é dada porque o modelo variográfico, ajustado corretamente, somente é válido até certa distância; o sistema de krigagem é instável numericamente para grandes bancos de dados; e o tempo de processamento do computador torna-se muito alto para um melhoramento negligenciável da precisão da predição, devendo-se ter consciência que a variância de krigagem não reduz proporcionalmente ao aumento da quantidade de dados utilizados para a interpolação.

Alguns parâmetros comumente definidos para a vizinhança são:

- ✓ *Raio de procura*: a máxima distância do ponto a ser predito aos pontos de dado;
- ✓ Número de pontos a serem retidos; e
- ✓ Número de setores angulares a serem usados para se ter uma distribuição uniforme dos pontos de dados (e.g., único, quadrantes, octantes etc.).

Dicas práticas para a vizinhança são: a) limitar a distância máxima da vizinhança à máxima distância válida do modelo variográfico; b) estender a distância máxima da vizinhança para além do alcance do variograma, a não ser que o dado seja regularmente espaçado e muito denso, lembrando que os dados além do alcance recebem algum peso, especialmente quando há um efeito pepita no modelo; c) escolher uma vizinhança elíptica se o variograma e/ou o dado tiverem uma configuração anisotrópica; d) preferir um setor angular para dados irregularmente distribuídos; e d) testar diferentes pontos a serem preditos e aceitar quando a variância de krigagem se estabilizar (GEOVARIANCES, 1996).

### 3.3.3. Recursos da Krigagem

A krigagem permite uma validação cruzada do modelo variográfico. Esse procedimento é dado pela remoção de um ponto observado/medido e a predição desse ponto, para cada ponto, e a verificação dos erros associados entre o ponto calculado e o valor real (medido). Um bom modelo variográfico vai fornecer uma média zero e uma variância próxima à variância teórica (ou 1 se for padronizado). com os valores reais  $Z(x)$  e estimados  $Z^*(x)$  é recomendado a plotagem de um diagrama de dispersão de  $Z(x)$  por  $Z^*(x)$ , onde se espera encontrar um bom ajuste à 1ª bissetriz, com um alto coeficiente de

correlação e  $R^2$ , para considerar um bom resultado e, portanto, um bom modelo variográfico para os dados, e um histograma da diferença  $Z(x) - Z^*(x)$ , que representaria o erro da estimativa e pode-se ter uma idéia pela sua dispersão, por exemplo, pela medida do desvio padrão e quanto da distribuição está além do valor da média e duas vezes o desvio padrão ( $\bar{x} \pm 2\sigma$ ).

Pode-se incorporar ao processo de krigagem falhas e outras descontinuidades, o que funciona como uma barreira na tomada de pontos para interpolação pelo elipsóide de procura.

Algumas técnicas de krigagem permitem ainda a incorporação de dados *soft*, porém, nesse caso, recomendam-se outras metodologias como a Máxima Entropia Bayesiana.

#### 3.3.4. Técnicas de Krigagem

Existem diversas técnicas de krigagem, como dito anteriormente. Já de uso comum são: Krigagem Simples (fenômeno estacionário e com média conhecida), Krigagem Ordinária (estacionário ou quase-estacionário e média desconhecida), Krigagem Universal (caso de hipótese intrínseca, não estacionariedade) e Krigagem Indicativa (para dados binários ou com cortes, ou *cut-off*, do inglês).

Outras técnicas permitem a integração de diferentes tipos de dados: Cokrigagem (para dados com mesma acurácia), Krigagem com Deriva Externa (para incorporação de dados com menor acurácia) e Cokrigagem Co-alocada (caso particular quando a variável secundária não está na malha de interpolação).

A Krigagem Disjuntiva pode ser descrita como uma cokrigagem de múltiplas indicatrizes, assim, uma estimativa ótima pode ser alcançada quando cada perfil de indicatriz é consistente com o outro, uma condição que não é necessariamente verdade quando se faz uma Krigagem Intrínseca. Há diferentes circunstâncias onde a Krigagem Disjuntiva pode ser simplificada em Cokrigagem Simples pela identificação de fatores ortogonais. Para esta técnica assume-se uma distribuição gaussiana (com anamorfose gaussiana, se necessário) porque este é um modelo isofatorial e a Krigagem Disjuntiva é obtida pela krigagem desses fatores separadamente (RIVOIRARD, 1994). A desvantagem desta técnica é a exigência em se assumir uma estacionariedade estrita, perder variabilidade pelo uso de indicatrizes, ser um interpolador exato e não considerar incertezas do fenômeno (KRIVORUCHKO, 2001) e, segundo Aldworth (1998 apud KRIVORUCHKO, 2001), é um estimador enviesado do processo de interesse.

A Krigagem Intrínseca baseia-se na teoria das funções aleatórias intrínsecas e minimiza a variância do erro da estimativa dentre todos os estimadores lineares (CHILÈS; DELFINER, 1999). Na Krigagem Ordinária os resíduos são obtidos pela diferença entre as observações e a melhor estimativa da média não enviesada do dado observado localmente. Na Krigagem Intrínseca os resíduos são formados pela comparação das observações a uma estimativa mais geral da média, tal como um polinômio de mais baixa ordem. Segundo Schultz e outros (1998) o real poder desta técnica está em se usar um modelo subjacente a priori adequado como uma estimativa da média local.

### *3.3.5. Cokrigagem Ordinária*

A cokrigagem é um conjunto de técnicas geoestatísticas pelo qual diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas conjuntamente com base na correlação espacial entre si. É, portanto, uma extensão multivariada do método da krigagem, pelo critério único da minimização da variância.

Uma das mais freqüentes aplicações da cokrigagem ocorre quando a amostragem de uma variável é insuficiente, isto é, quando uma ou mais variáveis não são coletadas em todos os pontos de amostragem e dois dos seus objetivos é melhorar a estimativa das variáveis subamostradas utilizando a correlação, por ventura, existente com variáveis mais densamente amostradas e promover a extrapolação de uma variável para áreas não amostradas.

Trata-se de uma poderosa ferramenta geoestatística e que vem sendo cada vez mais utilizada em diversas situações de estimação ou de modelagem, existindo diversos programas disponíveis (CARR; MYERS; GLASS, 1985; YATES; YATES, 1990; MARCOTTE, 1991 e DEUTSCH; JOURNAL, 1997, entre outros).

Landim, Sturaro e Monteiro (1995) preocuparam-se com a verificação em que situações pode ser utilizada a cokrigagem, ou seja, qual o nível de correlação necessário para que as estimativas sejam consistentes.

Este trabalho previa a aplicação dessa técnica, considerando-se a comparação das superfícies de tendência, para a melhor estimativa da superfície potenciométrica (variável primária) considerando-se a cota topográfica, que define a superfície topográfica, exaustivamente amostrada e obtida da digitalização das folhas topográficas do IBGE (1:50.000), e a extrapolação para as áreas mais afastadas do centro urbano, onde não existem dados de poços do DAERP.

Como discutido no item III.2 Superfícies de Tendência, dado o baixo coeficiente de correlação linear entre as variáveis da cota topográfica e da cota altimétrica do nível d'água ( $r=0,259$ ) não foi possível o emprego dessa técnica.

### 3.3.6. Algumas considerações

A Geoestatística Clássica é, em síntese, um processo para se atribuir pesos às amostras a serem utilizadas num processo de predição do valor assumido por uma variável aleatória, para dado ponto alvo de interpolação, segundo um certo modelo espacial (semivariograma) e critério de minimização da variância. Em Análise Geoestatística não se dispensa informação adicional, sendo que esta metodologia não faz interpretação dos dados, servindo-se somente como auxiliar na modelagem do fenômeno.

### 3.4. Simulação Geoestatística

A simulação estocástica permite a incorporação e minimização de incertezas locais, subsidiando representações realísticas. Os métodos de estimativa, como a krigagem, diferem da simulação estocástica por ser o objetivo daquela fornecer uma única estimativa local, no entanto, sem respeitar a estatística espacial de todas as estimativas tomadas em seu conjunto. Assim sendo, o semivariograma do mapa estimado difere daquele utilizado do processo de estimativa. Na simulação estocástica condicional a reprodução das características globais e estatísticas (histograma e covariância) são priorizadas em relação à acurácia local na obtenção de vários conjuntos alternativos de representações.

A krigagem, como método de estimativa mais comum, apresenta caracteres de suavização e será menos acentuada quanto mais contínuo for o fenômeno modelado, o que pode tornar inviável o emprego da krigagem em fenômenos muito erráticos.

Existem diversos algoritmos de simulação estocástica, existindo várias revisões de métodos de simulação estocástica disponíveis na literatura, citando-se Dubrule (1989), Alabert e Modot (1992), Dowd (1992), Damsleth e Holden (1994), Galli e Beucher (1997) dentre outros.

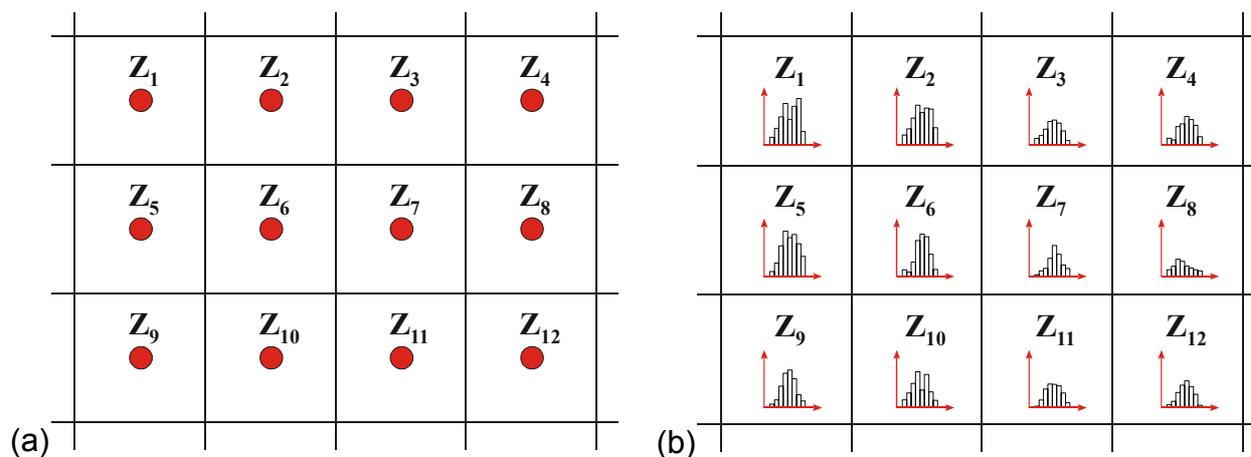
Alguns algoritmos mais comuns de simulação estocástica são, segundo Deutsch e Journel (1997): métodos gaussianos (método matricial LU, seqüencial, truncado), métodos indicadores (seqüencial, cosimulação e Markov-Bayes), simulação booleana de elipses, *annealing* simulado, simulação de campo-probabilidade, simulação fractal, média

móvel, espectral, bandas rotativas entre outros.

### 3.4.1. Comentários introdutórios sobre simulação geoestatística

A simulação estocástica produz cenários realísticos de uma variável de interesse, i.e., imagens que visam reproduzir a estrutura espacial e aparência da realidade, podendo ser acessada pelo variograma e histograma das imagens, onde cada imagem representa uma possível realização de uma função aleatória.

Não é possível comparar krigagem com simulação, pois os objetivos são diferentes. Na krigagem a finalidade é a *segurança* na predição, pois se obtém por ela o valor mais provável (lembrando-se que na distribuição gaussiana média = mediana = moda) da variável no ponto, pela atenuação da realidade, resultado do seu critério de minimização da variância ( $\sigma^2$  krigagem <  $\sigma^2$  dados) (Fig. 47a). Na simulação o compromisso é com o *realismo*, representando um possível cenário da variável, sujeito a toda variabilidade do fenômeno, o que é predita é a função de densidade de probabilidade desse fenômeno (Fig. 47b).



**Fig. 47:** (a) Predição - pontual, valor médio, mais provável, num bloco; (b) Simulação - histograma para um ponto ou área, pela estimativa de uma f.d.p.

Os principais objetivos da simulação são:

- ✓ representar a complexidade de um objeto de estudo;
- ✓ avaliar incertezas;
- ✓ honrar as heterogeneidades do objeto de estudo; e
- ✓ suportar cálculos não lineares.

A variância de krigagem não é um parâmetro adequado para quantificar incertezas, por não prover um intervalo de confiança seguro por dependerem somente da localização do dado e não de seus valores (YAMAMOTO, 2000). A simulação

geoestatística gera um espectro de possíveis realizações da função aleatória, reproduzindo a variabilidade real e podendo representar cenários otimistas e pessimistas (ou mapas de quantis) da variável, como um caminho alternativo para modelar a realidade. As flutuações entre as realizações representam as incertezas associadas ao fenômeno. Esses cenários são equiprováveis e consistentes com os dados. A krigagem tende a ser conservadora e não provê valores extremos porque a sua probabilidade de ocorrência é muito reduzida.

A krigagem não é apropriada para cálculos não lineares como cálculos de volumes, perímetros e análise de risco. A simulação geoestatística fornece bases muito mais confiáveis para esses cálculos.

Porém, serve lembrar que as simulações baseiam-se numa predição  $Z^*(x)$ , para então derivar um valor aleatório (ou ruído), sendo importante ter em mente que os métodos de predição ainda são fundamentais para a simulação.

#### *3.4.2. Visão geral de técnicas de simulação geoestatística*

As técnicas de simulação geoestatística podem ser não condicionais ou condicionais.

A *simulação não condicional* reproduz o variograma, o variograma cruzado e a distribuição da variável (e.g., média e variância). Pode ser útil na fase inicial de um projeto, mas exige boa experiência do usuário na área de conhecimento.

A *simulação condicional*, além de ter as mesmas propriedades anteriores, condicionaliza essa simulação aos dados, fazendo com que nos pontos onde existem dados o valor simulado seja igual ao valor real, i.e., honrando os dados e intervalos (quando se dispõe de informação *soft*), considerando aspectos locais dos dados que não foram modelados, tal como derivas locais. É útil nas diversas fases de um projeto e exige não somente uma boa experiência do usuário, mas também uma boa representatividade dos dados.

A simulação geoestatística pode modelar variáveis contínuas ou discretas e as técnicas de simulação são diferentes para cada caso.

Por variáveis contínuas entendem-se aquelas que variam continuamente no espaço, tais como propriedades de rocha (e.g., teores, porosidade, permeabilidade), superfície altimétrica, potenciométrica, precipitação etc. Variáveis discretas são aquelas categóricas, com limites ou classes que as definem, tais como modelos de fácies sedimentares, fragmentos florestais, níveis de contaminação etc., como discutido

anteriormente.

Para variáveis contínuas assume-se um arcabouço multigaussiano, indicando-se técnicas de Simulação Gaussiana Seqüencial ou Bandas Rotativas (ou *turning bands*, do inglês). As variáveis discretas são simuladas com enfoque em modelagem orientada a objetos, com técnicas de simulação booleana, ou matricial (*raster* ou *pixel by pixel*), com técnicas como Simulação Indicativa Seqüencial ou Gaussiana Truncada (ou *truncate gaussian simulation*, do inglês).

### 3.4.3. Técnicas de Simulação Estocástica em Geoestatística

#### **Simulação de Variáveis Contínuas**

O objetivo desse método de simulação é utilizar as técnicas de simulação estocástica para obter realizações de uma função aleatória num ponto alvo localizado numa malha regular.

Seja  $Y(x)$  uma função aleatória gaussiana, tal que  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N \approx \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} Y_{\alpha}$

$\{Y(x), x \in D\}$  será multigaussiano se:

- ✓ toda combinação linear da função aleatória  $Y(x)$  é gaussiana;
- ✓ toda distribuição condicional de  $\forall$  subconjunto da função aleatória  $Y(x)$  é gaussiana;
- ✓ todos os subconjuntos da função aleatória  $Y(x)$  são multigaussianos; e
- ✓ covariância nula implica em independência.

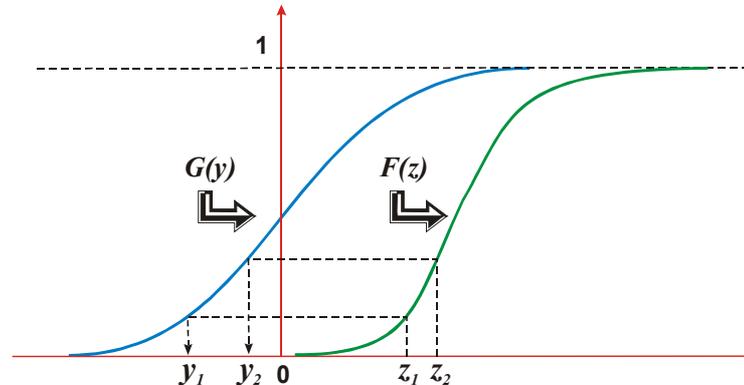
Na verdade, a covariância nula indica que a relação é desconhecida e não linear, mas implica independência se for gaussiana.

Espera-se uma distribuição gaussiana freqüentemente porque nos eventos estudados em laboratório possuem controle da independência das medidas ou, no caso de variáveis naturais, uma variável é, geralmente, resultado da soma de muitas outras variáveis. Casos de estudo de concentração de contaminantes, teores de minério e outras variáveis naturais resultantes do produto de outras variáveis, tendem a ter uma distribuição log-normal.

O primeiro passo para o uso dessas simulações é a transformação de uma variável de interesse com uma distribuição qualquer para uma variável de distribuição gaussiana. Esse procedimento é chamado de transformação gaussiana (ou anamorfose).

De um modo gráfico, plota-se as funções de densidade acumuladas da

distribuição bruta dos dados ( $F(z)$ ) e a distribuição gaussiana com média zero e variância 1  $G(y) \rightarrow N(0, I^2)$ . Depois, traça-se uma linha de cada valor  $z_i$  de  $F(z)$  até a cdf dos dados brutos e daí para a curva normal, rebatendo, então, o valor para o eixo das abscissas e obtendo o novo valor  $y_i$ , seguindo a distribuição de  $G(y)$  (Fig. 48).



**Fig. 48:** Anamorfose gráfica ou experimental –  $F(z)$  é uma distribuição qualquer e  $G(y)$  é uma distribuição normal com média zero e variância 1

Desta forma,  $\Pr[Z \leq z_i] = F(z_i) = G(y_i)$  ou  $y = G^{-1}(F(z_i))$ .

Outras formas de se fazer a anamorfose é por uma interpolação polinomial (e.g. polinômios de hermita) ou interpolação linear/potencial, armazenando-se os coeficientes para a transformação reversa (ou retro-transformação).

Essa transformação reversa é um importante passo, pois se não for feita cuidadosamente pode trazer problemas para as simulações.

Problemas outros ocorrem quando:

- ✓ existem dados idênticos ou com valores muito próximos - quando existe alta frequência nas primeiras ou últimas classes;
- ✓ ocorre distribuição híbrida de variável categórica e contínua - quando existem medidas abaixo do limite de detecção do equipamento ou ocorrem valores extremos; e
- ✓ os dados encontram-se agrupados, exigindo um processo de “declusterização” dos dados.

A simulação de variáveis contínuas segue então os seguintes passos:

- ✓ Anamorfose gaussiana;
- ✓ Variografia da variável gaussiana equivalente aos dados;
- ✓ Simulação condicional (usando SGS ou TB); e
- ✓ Transformação reserva (*back-transformation*) à distribuição original.

### *Simulação Seqüencial Gaussiana*

A Simulação Gaussiana Seqüencial (ou *Sequential Gaussian Simulation*, do inglês) seria um dos melhores algoritmos para gerar realizações de campos Gaussianos Multivariados, onde cada variável é simulada seqüencialmente de acordo com a função de distribuição cumulativa condicionada. Esse dado condicionante consiste dos dados originais e valores anteriormente simulados na vizinhança de cada ponto a ser simulado.

Em outros termos, os pontos da malha são aleatoriamente simulados. O valor gerado para qualquer ponto dessa malha é influenciado pela vizinhança, valores dos dados originais (obtidos pela amostragem – *hard data*) e pontos vizinhos já simulados. Os valores simulados são os valores krigados somados de um componente aleatório. O processo de simulação é atrelado à função de distribuição que descreve os valores dos dados originais, de forma que cada simulação (cada realização de toda a malha) obedecerá a função de distribuição original (i.e., os histogramas dos dados originais e do campo simulado serão muito semelhantes). Esta técnica assume que a função de distribuição original imparcial e representativa de todo o campo será modelada/simulada. Pelo fato de considerar a função de distribuição acumulada/função de densidade de probabilidade sobre todas os pontos não amostrados e a influência dos valores vizinhos simulados, a simulação final incorpora padrões de continuidade espacial inferidos dos dados originais.

A consequência da distribuição gaussiana é a máxima entropia, desordem além do variograma, o máximo desligamento de valores extremos, a alta continuidade de valores medianos e a simétrica descontinuidade dos valores extremos altos e baixos (Deutsch, 1998). Entre as maiores vantagens da SGS estão (Remacre; Carvalho, 1998): fácil condicionamento das variáveis, manuseio automático das anisotropias e aplicabilidade para qualquer função covariância. O que inviabiliza o uso da SGS e das técnicas gaussianas em geral são casos onde seja crucial o comportamento gerado pela simulação que resulta em pequena continuidade dos valores extremos como, por exemplo, medidas de permeabilidade (Journel; Deutsch, 1993).

Esta técnica é dita seqüencial porque repete o processo de simulação seqüencialmente para cada nó da malha de interpolação. Seu processo pode ser assim descrito:

- ✓ Seleciona aleatoriamente um nó da malha de interpolação –  $x$
- ✓ Kriga o nó, usando dados e nós previamente simulados –  $Z(x)$
- ✓ Obtém um valor aleatório de uma nova distribuição gaussiana –  $N(0, \sigma_K^2)$

$$Z_S(x) = Z^*(x) + \varepsilon(x) \text{ e } \varepsilon(x) = \sigma_K \times N(0,1)$$

- ✓ Inclui o novo ponto simulado ao conjunto de dados

O uso de vizinhança para a predição por krigagem permite que se faça uso de maior número de nós na SGS, por reduzir o tempo de CPU no processamento da simulação.

### *Simulação por Bandas Rotativas*

A simulação por bandas rotativas realiza uma simulação unidimensional (1-D) num grande número de linhas distribuídas no espaço tridimensional (3-D). É uma técnica sensível ao número de linhas a serem simuladas e pode gerar artefatos

Pode ser usada para casos multivariados usando cokrigagem, cokrigagem colocada ou mesmo krigagem com deriva externa.

Não serão discutidos pormenores neste trabalho.

### *Simulação de Variáveis Discretas*

É utilizada quando se conhecem os objetos (codificados por números inteiros) e a localização dos dados, não sendo uma alternativa consistente atribuir valores gaussianos a valores inteiros. A escolha entre técnicas de SIS ou TB é daquela que melhor refletir o fenômeno, mas, na prática, o SIS é utilizado quando não pode ser predito a conectividade e sucessão de objetos e o TGS quando é esperada uma sucessão lógica desses objetos.

### *Krigagem Indicativa*

São utilizadas indicatrizes (ou uma nova variável, denominada indicadora ou indicativa  $I_A(x)$ ), de tal forma que terá, por exemplo, valor 1 se o ponto pertence ao objeto  $A$  e valor 0 (zero), caso contrário:

$$I_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } x \in A \\ 0 & \text{para } x \notin A \end{cases}$$

assim, a esperança de que  $x \in A$  é:

$$E[I_A(x) | x \in A] = p(x)$$

$$I_A^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i I(x_i) = E^*[I(x)] | I(x_N) = p^*(x)$$

com N objetos (  $A_1, A_2, \dots, A_N$  ) de tal forma que  $I_k(x)=1$  se  $x \in A$  e  $I_k(x)=0$  caso contrário.

$$\sum_{k=1}^N I_k(x) = 1$$

na krigagem  $p_k^*(x)$ , para  $k=1, \dots, N$

$p_k^*(x)$  fornece uma partição do intervalo  $[0, 1]$

### *Simulação Indicativa Seqüencial - SIS*

A Simulação Indicativa Seqüencial (ou *Sequential Indicator Simulation*, do inglês) difere da SGS por não requerer uma distribuição normal dos dados, não assumindo nenhuma distribuição *a priori*, além de utilizar a função de densidade de probabilidade dos dados originais, permitindo a incorporação de dados tipo *soft*. O método seqüencial usa o Teorema de Bayes de probabilidade condicional para que o valor simulado seja condicionado aos valores simulados anteriormente.

Sua aplicação se dá do seguinte modo:

- ✓ Selecciona aleatoriamente um nó da malha de interpolação –  $x$
- ✓ Kriga o indicador N na posição  $x$  –  $p_k^*(x)$
- ✓ Obtém um valor aleatório de uma distribuição uniforme –  $p$

$$p \in [p_1^* + p_2^* + \dots + p_{k-1}^*, p_1^* + p_2^* + \dots + p_k^*]$$

- ✓ Inclui o novo ponto simulado ao conjunto de dados

### *Simulação Gaussiana Truncada*

É utilizada geralmente para quando se trabalha com proporção entre objetos, definindo-se uma função de truncamento, expressa por uma curva de proporção, vertical e/ou horizontal. Após esta definição segue-se com a aplicação de técnicas de variável contínua usando covariância das indicatrizes.

#### *3.4.4. Prática da Simulação*

Para a análise por simulações é recomendado que sejam geradas um número suficiente de cenários, de tal forma que a média dos valores simulados seja o mais próximo dos valores krigados e da variância de interpolação.

É sugerido que se faça uso de tanta informação quanto disponível, incorporando variáveis auxiliares para a modelagem da variável de interesse.

Existem outras técnicas de krigagem para outros casos, mas não serão discutidos aqui. Referências adicionais estão em Chilès e Delfiner (1999).

Assim, pelas características e propriedades da simulação geoestatística, pode-se verificar que sua grande vantagem é acessar incertezas, sendo muito útil em análise de risco ou na cubagem de jazidas de minérios, por exemplo. Como o objetivo desse trabalho é o mapeamento do valor assumido pelo nível potenciométrico, as técnicas de simulação geoestatística não foram utilizadas, mesmo porque a abordagem da metodologia de Máxima Entropia Bayesiana tenta obter uma função de densidade de probabilidade para cada ponto sem fazer uso da simulação de Monte Carlo ou qualquer outro gerador de números aleatórios, como será discutido a seguir.

#### **4. Geoestatística Espaço-Temporal – Máxima Entropia Bayesiana**

Medidas e predições de variáveis naturais (espaciais e/ou temporais) estão sujeitas a consideráveis erros e, desse modo, qualquer decisão baseada nessas observações e predições estará também sujeita a incertezas. Ao mesmo tempo, porém, deve ser ressaltado que a modelagem de características estatísticas de variáveis naturais e a correspondente avaliação quantitativa de erros, relativa a essas estimativas, são de fundamental importância em diversas aplicações concernentes ao monitoramento e controle de poluição, ao estudo de parâmetros hidrológicos/hidrogeológicos e climáticos, à caracterização de fluxo de fluidos em domínios porosos, ao gerenciamento de recursos naturais etc. (SCHNOOR, 1984; BILONICK, 1985; POLYAK, NORTH; VALDES, 1994; HAAS, 1995; BOGAERT; CHRISTAKOS, 1997).

Métodos tradicionais de análise espacial e mapeamento, como a geoestatística clássica e ajuste de superfícies ou funções, usam somente as observações disponíveis, algumas vezes denominadas de dados fiáveis (*hard data*, cf. OLEA, 1991) (JOURNEL, 1989; JAIN, 1989; DAVIS; LIN, 1996). Algumas utilizam dados secundários, alguns expressando tendências correlacionadas com a variável de interesse. Muitos desses métodos, no entanto, têm um caráter puramente experimental desconsiderando os conteúdos físicos e epistemológicos. Como resultado eles não contam com importantes fontes de conhecimento prévio e dados com ausência de precisão, conhecidos por dados soft (*soft data*, cf. OLEA, 1991), tais como observações dentro de intervalos, momentos de alta ordem, dados probabilísticos, leis físicas, experiência prévia etc.. Métodos “soft” de estimativa, como a Krigagem da Indicatriz (ou Indicativa), de acordo

com JOURNAL (1986), são procedimentos de interpolação onde os dados trabalhados, expressos como distribuições prévias, são interpolados linearmente pelo método dos mínimos quadrados para obter estimativas da distribuição de probabilidades *a posteriori* na região de interesse. Com base nessas distribuições são derivadas estimativas de variáveis naturais junto a intervalos de confiança associados. São limitações dessa aproximação: a ausência de uma regra definida para classificar informações prévias, a inferência altamente estatística envolvida e a significativa quantidade de informações que podem ser perdidas devido a essas aproximações (DOWD, 1992). Além disso a krigagem “soft” assume uma distribuição de probabilidade gaussiana e, como a maioria dessas técnicas, foi planejada para dados essencialmente espaciais.

O método da Máxima Entropia Bayesiana (MEB, do inglês, BME - *Bayesian Maximum Entropy*), estabelecido por CHRISTAKOS (1990 a,b; 1992; 2000), fornece uma abordagem mais sistemática e rigorosa para incorporar, nas análises e mapeamentos de variáveis naturais, dados *soft* e outras fontes de informação, mas não representa nenhuma nova metodologia em si nem deve ser encarada como panacéia na modelagem espacial.

Essa metodologia permite um mapeamento espaço-temporal da variável em estudo e sua extrapolação temporal. A MEB baseia-se no processamento de diferentes fontes e tipos de conhecimento sobre o tema. Um outro destaque dessa metodologia é a incorporação sistemática de dados *soft*, dados que são incertos, expressos por intervalos ou curvas de probabilidade. O processamento do conhecimento geral, a maximização dessa informação, sua condicionalização ao conhecimento específico e a integração e formalização matemática do conhecimento físico configuram o arcabouço dessa metodologia. A MEB também não necessita assumir nenhuma distribuição *a priori*, como é necessário assumir uma distribuição gaussiana para diversas técnicas de krigagem, podendo incorporar momentos multivariados não-gaussianos de diversas formas (CHRISTOPULOS; CHRISTAKOS, 2001).

Essa metodologia vem sendo desenvolvida pelo Prof. Dr. George Christakos e seus colaboradores desde a década de 1980 (CHRISTAKOS, 2000), sendo chamada de Moderna Geoestatística Espaço-Temporal. É implementada computacionalmente pelo pacote BMELib (CHRISTAKOS et al., 2002), mas apresenta ainda problemas operacionais a serem considerados em breve.

#### 4.1. Conceitos Básicos

O método de Máxima Entropia Bayesiana (MEB) baseia-se na síntese do conhecimento, dada pela integração e processamento da base de conhecimento físico de várias formas, relevantes ao problema ambiental, com os propósitos de:

- ✓ obter um cenário realístico da variação espaço-temporal do processo natural em estudo;
- ✓ análise de risco e avaliação de incertezas; e
- ✓ tomada de decisão baseada em critérios científicos.

A sua novidade em relação aos métodos clássicos é a combinação de três estágios interrelacionados:

(i) *Estágio Preliminar*: maximização da informação prévia obtida do Conhecimento Geral ( $\mathcal{G}$ ), reconhecido pela estatística clássica. A medida da informação disponível, com a forma semelhante à “função de entropia”, é maximizada, para que sua consistência com o conhecimento estatístico existente sobre a probabilidade prévia seja mantida;

(ii) *Estágio Pré-posterior*: os dados fiáveis (*hard*) e *soft* são incorporados à análise, tidos como o conhecimento específico; e

(iii) *Estágio Posterior*: as probabilidades e as informações equivalentes são expressas segundo regras de processamento de informação bayesiana. A maximização das probabilidades posteriores, equivalente à minimização das informações posteriores, resulta numa estimativa espacial desejada das variáveis naturais.

O poder de resolução de problemas pelo método MEB está baseado principalmente na forma como se adquire o conhecimento e não apenas no formalismo matemático e nos esquemas de inferência de que faz uso. Tal metodologia incorpora dados *soft* e resulta, geralmente, em estimadores não-lineares. Não são exigidas assunções<sup>8</sup> específicas que considerem a forma da distribuição de probabilidade envolvida, e expressa uma generalização das técnicas geoestatísticas comumente usadas. Além disso, o método pode ser expresso na forma de vetores, os quais podem ser usados para o estudo de mais de uma variável natural e com isso oferecer uma solução simples para problemas de estimativa de um conjunto de variáveis.

Segundo Christakos e Li (1998) o método MEB, ao fazer a análise espacial, fornece regras para incorporar informações prévias além de dados fiáveis e *soft* no

---

<sup>8</sup> ato ou efeito de assumir; proposição que, uma vez formulada e aceita, dá origem a uma série de inferências irrefutáveis e necessárias; ação de formular ou escolher uma proposição que funcione como premissa de um raciocínio (HOUAISS, 2001)

processo de mapeamento, significando que pode suportar argumentação plausível e necessária quando sob condições de incertezas. Apoiando-se em várias fontes de informação e dados, a metodologia introduz uma estrutura epistemológica que produz mapas preditivos que são mais precisos e, em muitos casos, computacionalmente mais eficientes que aqueles derivados de técnicas tradicionais (CHRISTAKOS; SERRE, 1998 e SERRE, BOGAERT; CHRISTAKOS, 1998). De fato, técnicas de krigagem podem ser derivadas de casos especiais da MEB, sob suposições restritivas considerando a informação prévia e os dados disponíveis, sendo mais rigorosa que a Krigagem da Indicatriz (ou Indicativa) para incorporar dados *soft*. A formulação MEB, de fato, aplica-se ao domínio espacial e/ou temporal e a sua extensão para o caso de blocos e campos aleatórios de vetores é uma consequência.

Desse modo o método MEB pode ser empregado em situações práticas nas quais informações prévias podem ser usadas para compensar a limitada quantidade de medidas disponíveis (e.g., níveis de estudo preliminares ou de viabilidade) ou quando dados *soft* são disponíveis e podem ser combinados com dados fiáveis para melhorar significativamente o mapeamento. O método pode ser visto, então, como um esforço para o desenvolvimento de uma estrutura mais geral de análise espacial/temporal e mapeamento, que inclui a geoestatística tradicional como um caso particular, e que também provê meios de se obter resultados que não podem ser por ela obtidos. Mas é necessário lembrar que “há uma grande diferença entre simplesmente ter acesso à informação e ter a habilidade necessária de raciocinar criticamente para interpretá-la de maneira adequada” (CHRISTAKOS et al., 2002, p. 51).

O método de MEB permite maior acurácia e precisão nos seus mapas, primeiramente por considerar variações temporais pelos dados *soft* e, subordinadamente, pelo formalismo matemático e maximização das suas funções, mas não substitui o conhecimento técnico-científico especializado sobre o problema em questão.

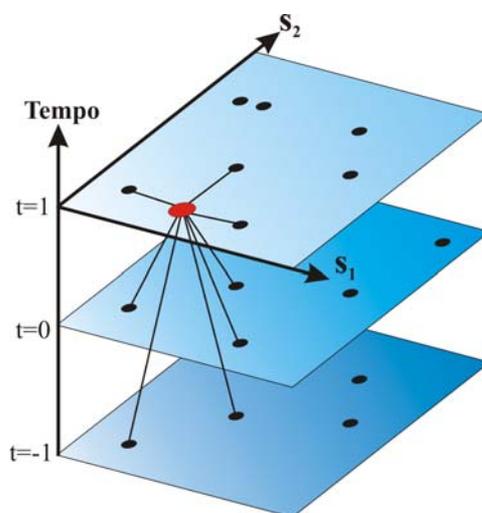
### *Métrica Espaço-Temporal*

Para o desenvolvimento desse trabalho foi assumida uma estrutura métrica separada para espaço e tempo, com a distância espaço-temporal entre pontos  $dp$  considerada separadamente como  $|ds|$  e  $dt$ , como proposto por Christakos (2000), diferentemente da proposta de De Iaco, Myers e Posa (2002).

A distância espacial, neste trabalho, é euclidiana com  $|ds|_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n ds_i^2}$ . A MEB

pode assumir ainda distâncias não-euclidianas como distância absoluta, atômica, riemanniana, entre outras, mas não foi esta a abordagem dada nesse estudo por se optar por trabalhar com a projeção cilíndrica no plano em UTM (Transversa Universal de Mercator).

Neste estudo assume-se um ponto definido no *continuum* espaço-tempo  $\mathfrak{R}^2 \times T$  com coordenadas  $p=(s_1, s_2, t)$ . A variável aleatória natural é escrita como  $X(p)=X(s_1, s_2, t)$ . Para a estrutura métrica separada, a distância espaço-temporal é definida indiretamente em termos de duas entidades independentes – espaço e tempo – formando o par  $(|s|, t)$ , onde a distância  $|s|$  assume, neste caso, a forma definida anteriormente para a distância euclidiana. Assim, a distância para a estrutura métrica euclidiana assume a forma  $dp = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + t^2}$ , apesar de poder não ter um significado físico em algumas outras abordagens. Em outros casos pode-se assumir coordenadas tridimensionais para o espaço e mais o tempo, porém, como o objetivo aqui é o mapeamento de uma superfície, tomou-se um sistema de coordenadas 2-D com o tempo. Para a estimativa de um ponto, consideram-se, portanto, os pontos no espaço bidimensional e no tempo (Fig. 49).



**Fig. 49:** Estimativa espaço-temporal (mod. de CHRISTAKOS et al., 2002, fig. 4.1)

● ponto a ser estimado; ● pontos de dado (tipo hard ou soft)

### Função Aleatória

Uma Função Aleatória Espaço-Temporal (FAET)  $X(p)$  é uma coleção de realizações da função aleatória  $\chi$  associadas com os valores da variável natural nos pontos  $p=(s, t)$  do *continuum* espaço-temporal  $S \times T$ . Matematicamente, a FAET  $X(p)$  é o mapeamento

$$X(p): S \times T \rightarrow L_q(\Omega, \mathfrak{F}, P)$$

onde  $\Omega$  é o espaço amostral que inclui todas as realizações possíveis do campo,  $F$  é a família de realizações,  $P(\chi) \in [0,1]$  é a probabilidade associada com cada realização e  $L_q(\Omega, \mathfrak{F}, P)$ ,  $q \geq 1$  denota a norma no espaço de probabilidade  $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$  (Definição 2.10; CHRISTAKOS, 2000).

Para o mapeamento assume-se  $X(p)$  como uma FAET ordinária, i.e., homogênea<sup>9</sup> e estacionária<sup>10</sup>, e é o resíduo de  $Z(p) = m_z + X(p)$ , onde  $m_z$  é a tendência média espaço-temporal (determinística ou estocástica). Nesse caso,  $X(p): \mathfrak{R}^2 \times T$  é expresso por espaço bidimensional e pelo tempo.

#### **4.2. Bases do Conhecimento Físico**

Como metodologia, a MEB requer o reconhecimento e classificação das diversas fontes de informação e sua natureza, assim sendo, divide toda a informação disponível sobre o fenômeno estudado em: Conhecimento Geral ( $\mathcal{G}$ ), Conhecimento Específico ( $\mathcal{S}$ ) e Conhecimento Físico ( $\mathcal{K}$ ). Pelo fato de requerer tal classificação, exige do usuário a gestão de toda a informação disponível.

Uma das bases para essa metodologia é a Teoria da Informação, mais precisamente os trabalhos de Jaynes (cf. CHRISTAKOS, 2000). A maximização da informação disponível sobre o fenômeno pode ser medida matematicamente e desenvolvida para obter mapas com maior precisão e acurácia.

##### *Conhecimento Geral - $\mathcal{G}$*

$\mathcal{G}$  é o conhecimento básico sobre o tema, leis gerais da ciência, teorias, experiências prévias e crenças justificadas relativas à situação de mapeamento global e independente de qualquer observação específica do caso. É *geral* no sentido de que é vago o suficiente para caracterizar um vasto número de casos ou situações.

É necessário fazer a distinção entre mapeamento baseado em modelos físicos e baseado em modelos estatísticos (cf. DIGGLE et al. apud CHRISTAKOS et al., 2002, p.43), e a MEB permite pode integrar esses modelos. Através da análise de MEB baseada em modelos dinâmicos a informação é propagada das áreas bem amostradas

<sup>9</sup> média temporal constante

<sup>10</sup> média espacial constante

para áreas com amostragem mais escassa, por uma feição chamada de mapeamento global porque a extrapolação pode ter significado além dos pontos observados (CHRISTAKOS et al., 2002, p.62).

Esse conhecimento geral tem a forma de momentos estatísticos (média, variância, assimetria, curtose etc.), a partir de modelos de estrutura espacial (variograma, covariograma, correlograma), equações físicas, reações e processos químicos e/ou biológicos entre outras fontes.

É expresso matematicamente como uma função estocástica, envolvendo uma série de operadores  $G_\alpha$ :

$$G: \underbrace{\overline{h_\alpha(p_{mapa})}}_{\substack{\text{momentos} \\ \text{estatísticos}}} = G_\alpha [g_\alpha, f_G; \chi_{mapa}, P_{mapa}], \alpha = 0, 1, \dots, N_c$$

onde  $g_\alpha$  é a função que expressa as leis físicas, relações empíricas, funções estatísticas, demonstrações dos fatos, teorias locais (fenomenológicas) etc.;  $f_G$  é a função de densidade de probabilidade (p.d.f., do inglês, *probability density function*) prévia, baseada em  $G$ ; e  $\chi_{mapa}$  são os valores assumidos pela variável aleatória nos pontos de mapeamento  $P_{mapa}$ .  $G_\alpha$  expressa uma função com diversas fontes, tendo  $\overline{h_0} = \overline{g_0} = 1$  para  $\alpha = 0$  (definindo a constante de normalização) e exigindo que  $g_\alpha$  (para  $\alpha > 0$ ) seja escolhida de forma que a expectativa estocástica  $\overline{h_\alpha}$  seja calculável:

$$\overline{h_\alpha(p_{mapa})} = \overline{g_\alpha(\chi_{mapa})} = \int d\chi_{mapa} g_\alpha(\chi_{mapa}) f_G(\chi_{mapa}; P_{mapa}), \alpha = 0, 1, \dots, N_c$$

Para o caso de utilizar-se os dois primeiros momentos estatísticos (média e covariância), temos:

$\alpha$	$g_\alpha$	$\overline{g_\alpha}$
$\alpha = 0$	constante de normalização $g_0(\chi_{mapa}) = 1$	
$\alpha = i,$ $i = 1, \dots, n$	restrições de média $g_i(X_i; p_i) = \chi_i$	$\overline{g_{i G}}(p_i) = \overline{X}(p_i) = m_X(p_i)$
$\alpha = (i, j),$ $i = 1, \dots, n$ $j = 1, \dots, n$	restrições de covariância $g_{ij}(X_i, X_j; p_i, p_j) = X_i X_j$	$\overline{g_{ij G}}(p_i, p_j) = \underbrace{\overline{X_i \cdot X_j}}_{C_{ij}} - \underbrace{\overline{X_i} \cdot \overline{X_j}}_{\text{zero}} + \overline{X_i \cdot X_j} = C_X(p_i, p_j)$

Com a remoção da tendência média espaço-temporal, assume-se uma média ZERO (FAET ordinária) para os pontos e as covariâncias são obtidas pela modelagem de covariância espaço-temporal a partir dos dados.

O estágio prévio do método de Máxima Entropia Bayesiana é relativo à função de probabilidade do conhecimento geral  $\mathcal{G}$ , i.e.,

$$P_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}] = p \in [0,1]$$

que significa que “a probabilidade do mapa  $\chi_{mapa} = (\chi_{dados}, \chi_k)$ , dado a base de conhecimento geral  $\mathcal{G}$  é  $p$ ”.

Uma abordagem possível da situação de mapeamento é a simulação não-condicional, produzindo diversas realizações da função aleatória, baseada no conhecimento geral, da média e da covariância, por exemplo. Enquanto essa simulação gera uma caracterização da variabilidade espaço-temporal, não é de muito valor para predições.

A informatividade implica na maximização da informação no estágio prévio, que é também condicionado ao conhecimento geral disponível, assumindo uma relação inversa entre informação e probabilidade:

*“quanto mais informativa a avaliação sobre uma situação de mapeamento, menor a probabilidade que isso realmente ocorra”* (CHRISTAKOS, 2000)

Um exemplo ilustrativo é a previsão meteorológica... se alguém lhe diz que amanhã choverá de 1 a 10 mm de chuva, temos algo pouco informativo, mas com grande probabilidade de que realmente ocorra, comparado a alguém que nos diz que amanhã choverá de 5 a 8 mm, que tem uma probabilidade de ocorrer bem menor que o caso anterior e torna-se muito mais informativo.

Da teoria de informação científica, em termos quantitativos, essa regra expressa-se como a relação inversa entre informação e probabilidade como  $\text{Info}_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}] = \{\text{Prob}_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}]\}^{-1}$ , i.e., a informação sobre a situação real de mapeamento provida por  $\mathcal{G}$  é inversamente proporcional ao modelo de probabilidade construído na base de  $\mathcal{G}$ . Christakos (2000) afirma: “dado que, por razões técnicas, as probabilidades podem ser muito pequenas, é freqüentemente mais conveniente trabalhar com logaritmos, então a informação é matematicamente definida por:”

$$\text{Info}_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}] = \log\{\text{Prob}_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}]\}^{-1} = -\log\{\text{Prob}_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}]\} = -\log f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa})$$

também conhecido por Medida de Informação de Shannon, sendo  $f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa})$  o modelo de p.d.f. multivariado associado com o conhecimento geral  $\mathcal{G}$ , antes de que o conhecimento específico  $\mathcal{S}$  seja levado em consideração<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Christakos e outros (2002, p.64-65) afirmam que o paradigma na moderna geoestatística

A informação esperada é dada então por:

$$\overline{\text{Info}}_{\mathcal{G}}[\chi_{\text{mapa}}] = - \int d\chi_{\text{mapa}} f_{\mathcal{G}}(\chi_{\text{mapa}}) \log f_{\mathcal{G}}(\chi_{\text{mapa}})$$

que é conhecida como função de *entropia*, sendo o grau de difusão da p.d.f. e que quanto mais concentrada, menor é a entropia. Notar que enquanto a definição do *continuum* de entropia como medida de incerteza é sujeito a alguns debates teóricos, é plenamente justificado do ponto de vista prático (CHRISTAKOS, 2000).

A p.d.f. prévia  $f_{\mathcal{G}}$  do mapa é obtida pela maximização da expectativa da informação prévia sujeita às restrições físicas expressas por  $\overline{h_{\alpha}(p_{\text{mapa}})}$ , na forma de momentos estatísticos (Postulado 5.2; CHRISTAKOS, 2000).

O conhecimento geral  $\mathcal{G}$  é convenientemente expresso em termos de um conjunto de equações estocásticas como:

$$\overline{h_{\alpha}(p_{\text{mapa}})} = \overline{g_{\alpha}(x_{\text{mapa}})}, \text{ com } \overline{g_{\alpha}(x_{\text{mapa}})} = \int d\chi_{\text{mapa}} g_{\alpha}(\chi_{\text{mapa}}) f_{\mathcal{G}}(\chi_{\text{mapa}})$$

onde  $g_{\alpha}$  e  $h_{\alpha}(\alpha = 1, \dots, N)$  são conjuntos de funções conhecidas dos valores  $\chi_{\text{mapa}}$  e das coordenadas dos pontos  $p_{\text{mapa}}$ , e  $N$  é o número de equações de momentos consideradas.

Dessa forma, a função variograma pode ser definida, segundo Christakos e outros (2002, p.37), por  $\overline{g_{\alpha}(x_i, x_j)} = \frac{1}{2} \overline{(x_i - x_j)^2} = \gamma_x(p_i, p_j)$ .

A implementação, assim, nos leva a:

$$f_{\mathcal{G}}(\chi_{\text{mapa}}; p_{\text{mapa}}) = e^{\mu_0 + \mu^T g} = Z^{-1} \exp\{\Upsilon_{\mathcal{G}}[\chi_{\text{mapa}}; p_{\text{mapa}}]\}$$

onde  $g = \{g_{\alpha}; \alpha = 1, \dots, N\}$  é o vetor das funções  $g_{\alpha}$  e  $\mu = \{\mu_{\alpha}; \alpha = 1, \dots, N\}$  é o vetor de coeficientes associados a  $g$ , sendo  $\mu_0$  o coeficiente que conta para a restrição de normalização  $\overline{g_0} = 1$ ,  $Z^{-1} = e^{\mu_0} = \exp\{\mu_0\}$  e  $\Upsilon_{\mathcal{G}}[\chi_{\text{mapa}}; p_{\text{mapa}}] = \sum_{\alpha=1}^{N_c} \mu_{\alpha}(p_{\text{mapa}}) g_{\alpha}(\chi_{\text{mapa}})$

ou  $f_{\mathcal{G}}(\chi_{\text{mapa}}; p_{\text{mapa}}) = \exp\left(\mu_0 + \sum_{\alpha=1}^{N_c} \mu_{\alpha}(p_{\text{mapa}}) g_{\alpha}(\chi_{\text{mapa}})\right)$ , na forma de momentos

estatísticos.

espaço-temporal permitem o uso de medidas da informação outras que não a de Shannon, como a medida da informação de Fisher e a maximização da informação epistêmica de fisher é equivalente à minimização da informação estatística de Fisher no contexto do mapeamento espaço-temporal, resultando em  $\overline{\sum_{i=1}^{m,k} \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \log f_{\mathcal{G}}(\chi_{\text{mapa}}) \right]^2}$ , resultando numa nova técnica chamada BMF (*Bayesian Maximum Fisherian*).

Para este estudo, considerando-se somente média e covariância, temos como forma final para o Conhecimento Geral  $\mathcal{G}$ :

$$f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa}; p_{mapa}) = \exp\left(\mu_0 + \sum_{i=1}^{N_C} \mu_i X_i + \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_C} \mu_{ij} X_i X_j\right)$$

### *Conhecimento Específico - S*

É o conhecimento relativo à área de estudo, podendo ser: 1. externo (ou de evidência demonstrativa), e.g., medidas reais, dado de percepção ou sentido; ou 2. interno (ou de evidência indutiva), como, e.g., inferências obtidas através de outras fontes.

É expresso como:

Dado Fiável (*hard data*) – aquele que é medido com exatidão e se conhece com máxima acurácia. Por dados fiáveis entendem-se, por exemplo, medidas laboratoriais, medidas obtidas com equipamentos diversos, i.e., medidas que se conhecem com uma probabilidade de 100% de estar correto.

$$S: \underline{\chi}_{hard} = (\chi_1, \dots, \chi_{mh}), \text{ onde } P[x_{hard} = \chi_{hard}] = 1$$

No entanto, pode-se incorporar a imprecisão da medida aos dados, quando esse para a ter uma incerteza associada, denominando-se de dado *soft*.

Dado Soft (*soft data*) – dado que tem a característica de incorporar incertezas e pode ter formas variáveis (intervalos e probabilísticos, em pontos de dados ou relacionados aos pontos de predição).

$$S: \underline{\chi}_{soft} = (\chi_{mh+1}, \dots, \chi_m), \text{ onde } \chi_{soft} \in I$$

O dado *soft* pode ainda ser expresso de diversas formas distintas:

#### *Intervalo*

$I = [a, b]$  e  $P[a \leq x_{soft} \leq b] = 1$ , onde  $a$  é o limite inferior e  $b$  o limite superior.

#### *Probabilístico*

$P_S[x_{soft} < \chi_{soft}] = F_S(\chi_{soft})$ , para uma função de densidade acumulada (c.d.f., do inglês, *cumulative density function*), ou  $P_S[x_{soft} \in I] = P_S(I)$ , para a probabilidade de

ocorrência da variável no intervalo  $I$ , notando que  $f_S(\chi_{soft}) = \frac{\partial F_S(\chi_{soft})}{\partial \chi_{soft}}$ .

### Probabilístico no Ponto de Predição (filtragem)

$S = S_0 \cup S_1 = P_S [x_{soft} < \chi_{soft}, x_k < \chi_k] = F_S(\chi_{soft}, \chi_k)$ , note que

$$f_S^{(soft,k)}(\chi_{soft}, \chi_k) = \frac{\partial^{n_S} F_S(\chi_{soft}, \chi_k)}{\partial \chi_{soft} \partial \chi_k}$$

Assim, exemplos de dados tipo *soft* seriam medidas inexatas que podem estar compreendidas em um intervalo, sem saber seu valor mais provável, como seria o caso de quando se delimita a superfície potenciométrica de um aquífero no topo de uma camada sotoposta impermeável nos pontos onde foi atingido o contato; ou uma curva probabilística, como no caso de perfil raio-gama (GR) em estudos geofísicos; ou, então, dado probabilístico no ponto de predição, por exemplo, limitando a superfície potenciométrica na superfície topográfica quando não ocorre artesianismo na região.

O fato de a Máxima Entropia Bayesiana possibilitar a incorporação de dados do tipo *soft* é uma vantagem em relação a outros métodos que são interpoladores exatos pois leva em consideração incertezas presentes no processo de predição de pontos medidos.

Após a incorporação do conhecimento específico  $S$  ao conhecimento geral  $G$ , condicionando por Bayes  $G$  à  $S$ , temos a síntese do conhecimento físico  $\mathcal{K} = G \cup S$ . O processo de predição, dessa forma, é:

$$X(p) \xrightarrow[\text{processo } G]{\text{estágio prévio}} f_G(\underbrace{\chi_{hard}, \chi_{soft}, \chi_k}_{\mathcal{X}_{mapa}}) \xrightarrow[\text{processo } S]{\text{estágio posterior}} f_{\mathcal{K}}(\chi_k)$$

### Conhecimento Físico - $\mathcal{K}$

É a união do conhecimento geral e específico, conduzindo a uma função de densidade de probabilidade (p.d.f. final ou posterior) para ser utilizada pelo preditor, na forma matemática adequada e conforme o conhecimento disponível para o fenômeno.

Na condicionalização bayesiana tem-se uma probabilidade à priori da ocorrência de um fenômeno e após um novo conhecimento, temos a alteração desse valor para uma probabilidade à posterior. Assim, temos o conhecimento geral, que tem grande probabilidade de ocorrência, exatamente por ser geral, condicionado a um novo conhecimento, que são dados específicos do caso (*site* ou *case specific data*).

Para ficar mais fácil compreender a condicionalização bayesiana, voltemos ao exemplo da previsão meteorológica... se alguém, no entanto, nos diz que a probabilidade de que chuva 5 mm depois de amanhã é de 27% caracterizamos nossa

probabilidade à priori. Se chover amanhã, podemos atualizar nosso modelo meteorológico com essa nova informação e teremos, por exemplo, uma probabilidade de 36% no dia seguinte, caracterizando nossa probabilidade à posteriori.

A condicionalização bayesiana é baseada na evidência, porém pode-se optar por uma condicionalização não-bayesiana, baseada na funcionalidade. Por exemplo, se eu saio de casa e chove, pela condicionalização bayesiana, pode-se estabelecer uma probabilidade da relação entre eu sair de casa e chover, porém, não existe (pressupostamente) uma relação física entre o fato de eu sair de casa e isso desencadear algum fenômeno meteorológico que provoque a chuva. Para uma condicionalização funcional é sem sentido essa medida.

Para a p.d.f. à posteriori temos:

$$f_{\mathcal{K}}(\chi_k) = f_G[\chi_k | \chi_{\text{dados}}(S)] = A^{-1} \Upsilon_S[\Upsilon_G, S, \chi_{\text{mapa}}; p_k]$$

$$f_{\mathcal{K}}(\chi_k) = A^{-1} \int_I dF_S(\chi_{\text{soft}}) f_G(\chi_{\text{mapa}}) = A^{-1} \int_I d\chi_{\text{soft}} f_S(\chi_{\text{soft}}) f_G(\chi_{\text{mapa}})$$

sendo  $\chi_{\text{mapa}} = (\chi_{\text{hard}}, \chi_{\text{soft}}, \chi_k)$ ;  $\chi_{\text{dados}} = (\chi_{\text{hard}}, \chi_{\text{soft}})$ ;  $A = \int_I d\chi_{\text{soft}} f_S(\chi_{\text{soft}}) f_G(\chi_{\text{dados}})$  a

constante de normalização;  $I$  o domínio de  $\chi_{\text{soft}}$ ; e  $\Upsilon_G$  e  $\Upsilon_S$  são operadores:

$$\Upsilon_G[\chi_{\text{mapa}}; p_{\text{mapa}}] = \sum_{i=1}^{N_G} \mu_{\alpha}(p_{\text{mapa}}) g_{\alpha}(\chi_{\text{mapa}})$$

$$\Upsilon_S[\chi_{\text{mapa}}; p_{\text{mapa}}] = B \int_D d\Xi_S(\chi_{\text{soft}}) e^{\Upsilon_G}, \text{ onde } B, D \text{ e } \Xi \text{ dependem do conhecimento}$$

específico disponível, da forma do dado *soft* (vide tabela a seguir):

Equação do dado <i>soft</i> para S: $\chi_{\text{soft}} \in I$ e $i = m_{h+1}, \dots, m$	$B$	$D$	$\Xi$
Intervalos $I_i$ $\chi_i \in I_i = [a_i, b_i]$	1	$I$	$\chi_{\text{soft}}$
Probabilístico $P_S[\chi_{\text{soft}} \leq \chi] = F_S(\chi)$	1	$I$	$F_S(\chi_{\text{soft}})$
Probabilístico $P_S[\chi_{\text{soft}} \leq \chi] = F_S(\chi; h)$	$\int_{R^1} dF_S(\chi; h)$	$I(\chi)$	$\chi_{\text{soft}}$
Intervalo de Probabilidades $P_S[\chi_{\text{soft}} \in I] = p_S(I)$	$\prod_{i=m_{h+1}}^m \sum_{\lambda_i} p_S(\lambda_{m_{h+1}}, \dots, \lambda_m)$	$\prod_{i=m_{h+1}}^m e_i$	$\chi_{\text{soft}}$

**Fonte:** Christakos (2000)

Para este trabalho, utilizando-se dados *soft* do tipo probabilístico temos:

$$\Upsilon_S[\chi_{\text{mapa}}] = \int_I d\chi_{\text{soft}}(\chi_{\text{soft}}) e^{\Upsilon_G[\chi_{\text{mapa}}]}$$

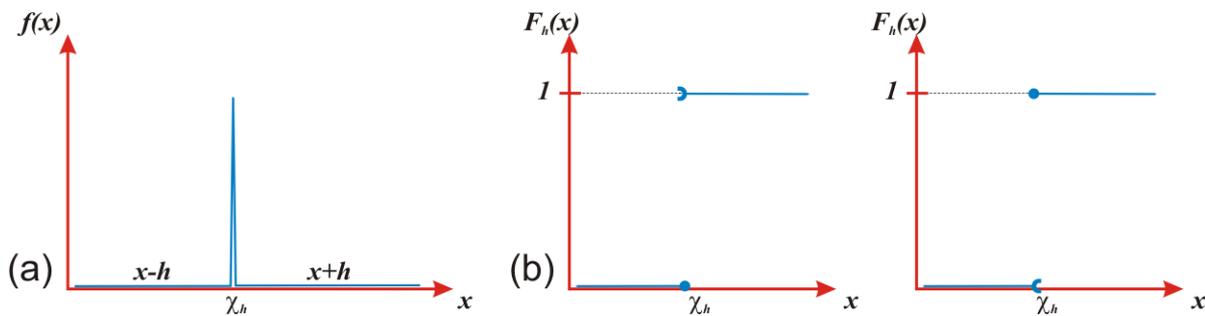
E, finalmente, a f.d.p. a posteriori assume, para o caso estudado, a forma final de:

$$f_{\kappa}(\chi_k) = A^{-1} \int_I d\chi_{soft} f_S(\chi_{soft}) \exp\left(\mu_0 + \sum_{i=1}^{N_C} \mu_i X_i + \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_C} \mu_{ij} X_i X_j\right)$$

onde  $\exp\left(\mu_0 + \sum_{i=1}^{N_C} \mu_i X_i + \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_C} \mu_{ij} X_i X_j\right)$  representa o conhecimento geral do fenômeno e  $\int_I d\chi_{soft} f_S(\chi_{soft})$  o conhecimento específico da área.

Tem-se a impressão, no entanto, que os dados tipo hard não estão sendo considerados na função  $f_{\kappa}(\chi_k)$ , mas o são pela distribuição de Dirac ( $\delta(\chi)$ ) (Marc L. Serre, SPH/UNC – informação oral), que é indefinida, somente sabendo-se que  $\int \delta(\chi) d\chi = 1$ , de onde obtém-se que  $\int \delta(\chi) f(\chi) d\chi = f(0)$  e  $\int \delta(h-a) f(h) d\chi = f(a)$ , sendo  $h$  um dado valor de  $\chi$  e não um intervalo ou p.d.f.. Dessa forma, sabendo que  $P[x_{hard} = \chi_{hard}] = 1$  tendo  $f_h(u) = \delta(u - \chi_h)$  e  $\int_{-\infty}^{+\infty} f_h(u) du = 1$ , tem-se que:

$$F_h(x) = \int_{-\infty}^x du f_h(u) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq \chi_h \text{ ou se } x < \chi_h \\ 1 & \text{se } x \geq \chi_h \text{ ou se } x > \chi_h \end{cases} \text{ (vide Fig. 50a;b)}$$



**Fig. 50:** Dirac: p.d.f. (a) e c.d.f. (b)

### 4.3. Preditor

De posse do conhecimento físico, a metodologia de Máxima Entropia Bayesiana permite ao usuário definir o preditor mais adequado para atender suas necessidades, como resultado direto de se dispor da p.d.f. à posteriori do processo estudado. Suas principais formas são:

✓ MEB moda  $\hat{\chi}_k = \max_{\chi_i = \hat{\chi}_i} f_{\kappa}(\chi_k)$

que fornece a moda da distribuição no ponto predito, seu valor mais provável

✓ MEB mediana  $\hat{\chi}_k = F_G^{-1}(0,5; p_k)$

que fornece a mediana, i.e., o valor que divide a distribuição ao meio

✓ MEB média condicional  $\hat{\chi}_k = \overline{X(p_k) | \chi_{data}(S)}$

que é a média da distribuição condicionada aos dados

✓ MEB percentil  $\hat{\chi}_k = \chi_k^p = \int_{-\infty}^{\chi_k^p} d\chi_k f_{\mathcal{K}}(\chi_k) = p$

que resulta na probabilidade de o valor assumido pela variável no ponto predito ser menor ou igual ao limiar  $\chi_k^p$

O preditor *MEB média condicional* gera resultado equivalente ao obtido pela Krigagem Ordinária e *MEB percentil* fornece respostas semelhantes aos da Krigagem Indicativa, quando a f.d.p. à posteriori formato equivalente ao dado pela krigagem.

#### 4.4. Síntese

Desta forma a metodologia de MEB pode ser dividida em três etapas:

*Estágio I:* definição das suposições e maximização da entropia do conhecimento geral  $\mathcal{G}$ .

$\text{Info}_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa}) = -\log f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa})$  para  $\chi_{mapa} = (\chi_{dados}, \chi_k)$  *Informação*

$\overline{\text{Info}_{\mathcal{G}}}[\chi_{mapa}] = -\int d\chi_{mapa} f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa}) \log f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa})$  *Maximização*

dada as restrições  $\overline{h_{\alpha}} = \int d\chi_{mapa} g_{\alpha}(\chi_{mapa}) f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa})$

Neste estágio se obtém o modelo informativo

$$f_{\mathcal{G}}(\chi_{mapa}; p_{mapa}) = Z^{-1} e^{\mathcal{Y}_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}; p_{mapa}]}$$

*Estágio C:* definição do conhecimento físico  $\mathcal{K} = \mathcal{G} \cup \mathcal{S}$  e condicionalização de  $\mathcal{G}$  dado  $\mathcal{S}$  e obtenção da f.d.p. a posteriori:

$$f_{\mathcal{K}}(\chi_{\mathcal{K}}) = A^{-1} \mathcal{Y}_{\mathcal{S}}[\chi_{soft}, e^{\mathcal{Y}_{\mathcal{G}}[\chi_{mapa}]}]$$

*Estágio P:* escolha do preditor  $\hat{\chi}_k$  e processo de mapeamento.

## 5. Geoestatística Clássica versus Máxima Entropia Bayesiana

A Geoestatística Clássica:

- ✓ é vista como uma extensão da Estatística Clássica, sendo também chamada de Estatística Espacial;
- ✓ não faz interpretação, somente ajuda nesse processo; e
- ✓ concerne somente à manipulação dos dados existentes, não substituindo bons dados adicionais.

A Máxima Entropia Bayesiana:

- ✓ é vista como um ramo da Análise Estocástica;
- ✓ possui a modelagem físico-matemática como importante componente; e
- ✓ não é restrita à manipulação de dados, podendo ir além dos dados.

O processo de modelagem é crítico, requer conhecimento especializado, não sendo um processo de caixa preta.

Para efeito de comparação a tabela abaixo (Tab. 13) apresenta as feições da MEB e da Krigagem:

**Tab. 13:** Comparação entre a MEB e a Krigagem

	<b>MEB</b> <sup>12</sup>	<b>KRIGAGEM</b> (KS, KO, KI, KD, KIn) <sup>13</sup>
<b>Critério de Predição</b>	Espistêmico	Estatístico Erro Médio Quadrado da Estimativa
<b>Forma do Preditor</b>	Arbitrário	Linear (KS, KO, KIn) Soma de dados de funções univariadas (KD)
<b>Leis Físicas</b>	Arbitrário	Não considerado
<b>Base de Conhecimento Específica para a Área</b>	Dados fiáveis Modelo de Observação Intervalos Funções de Probabilidade Lógica de Probabilidade Conjuntos <i>Fuzzy</i>	Dados fiáveis Modelo de Observação Intervalos (KI)
<b>Momentos Estatísticos</b>	Qualquer ordem Multi-pontual	1 <sup>o</sup> e 2 <sup>o</sup> momentos Dois pontos
<b>Cálculo de Momentos</b>	Implícito em leis físicas Explícito das leis físicas	Explícito a partir dos dados experimentais
<b>Distribuição de Probabilidade Subordinada</b>	Qualquer forma	Gaussiana Formas bivariadas específicas (KI, KD)
<b>Varição Espaço-temporal</b>	Homogêneo / Estacionário Não-Homogêneo / Não-Estacionário	Homogêneo / Estacionário (KS, KO, KI, KD) Não-Homogêneo / Não-Estacionário (KIn)
<b>Condicionização das Bases de Conhecimento</b>	Bayesiana Não Bayesiana	Estatística Linear

<sup>12</sup> MEB - Máxima Entropia Bayesiana

<sup>13</sup> KS - Krigagem Simples, KO - Krigagem Ordinária, KI - Krigagem Indicativa, KD - Krigagem Disjuntiva, KIn - Krigagem Intrínseca

<b>Formato dos Preditores</b>	$\hat{\chi}_k = f(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$	$\hat{\chi}_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i \chi_i$ - KS, KO, KI, KIn $\hat{\chi}_k = \sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(\chi_i)$ - KD
<b>Outras Feições de Predição</b>	Base de Conhecimento no ponto de estimativa <i>Upscaling / Downscaling</i> Global (predição vetorial, simultânea, multi-pontual) / Pontual	Downscaling (Krigagem de Bloco) Pontual (predição escalar, recursiva)

**Fonte:** modificado de Christakos e outros (2002)

Algumas das técnicas de Krigagem são uma particularização do método de Máxima Entropia Bayesiana quando: o conhecimento geral  $\mathcal{G}$  é menor ou igual a dois momentos estatísticos, o conhecimento específico  $\mathcal{S}$  expressa-se somente por dados fiáveis e a estimativa é pontual.



A Máxima Entropia Bayesiana não é nenhum método novo, mas somente uma nova roupagem para um conjunto de metodologias, como a Teoria da Informação, Análise Estocástica, Estatística Bayesiana e Geoestatística, com o que podem ressaltar propriedades emergentes do fenômeno estudado.

## 6. Equipamentos e Softwares Utilizados

Para o desenvolvimento dessa tese foram utilizados alguns equipamentos obtidos com recursos da Reserva Técnica da bolsa de doutorado da FAPESP (processo 99/01719-0) e Auxílio Pesquisa da FAPESP (processo 02/01973-8).

Um computador AMD-Athlon de 1,2 GHz, com 256 Mb de memória RAM e um computador Pentium IV de 1,8 GHz com 512 Mb de memória RAM e HD de 40 Gb.

Os pacotes de programas utilizados para o processamento dos dados são:

BMELib (CHRISTAKOS et al., 2002)

<http://www.unc.edu/~mserre/ESEhome.html>

GS-LIB (DEUTSCH; JOURNAL, 1997)

<http://www.gslib.com>

ISATIS (GEOVARIANCES, 2001)

<http://www.geovariances.fr/>

MATLAB 6.5 (MATWORKS, 2002)

<http://www.mathworks.com/>

SURFER 8.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002)

<http://www.goldensoftware.com/>

VarioWin 2.21 (PANNATIER, 1996)

<http://www-sst.unil.ch/research/variowin/>

## V. APLICAÇÃO E DISCUSSÃO

### 1. Aquisição e Análise Exploratória dos Dados

Os dados utilizados nesse trabalho foram em grande parte obtidos com o DAERP (Departamento de Água e Esgoto de Ribeirão Preto). São dados dos poços tubulares operados pelo DAERP, i.e., dados gerais do poço (alguns com georeferenciamento, profundidade do nível estático e dinâmico, vazão e outros dados pertinentes), alguns compilados pela FIPAI (Anexo A) e outros do DAERP, bem como algum levantamento com GPS Garmin 48, altímetro digital Ward's/Speedtech e dados do mapa viário digital de Ribeirão Preto.

Foram necessárias prévias filtragem e seleção de dados, pois alguns poços não apresentam medidas da profundidade do nível estático, outros não possuem georeferenciamento ou este era incorreto e outros ainda eram muito próximos a outros poços e apresentavam grande interferência do cone de depleção ou valores bem diferentes entre si.

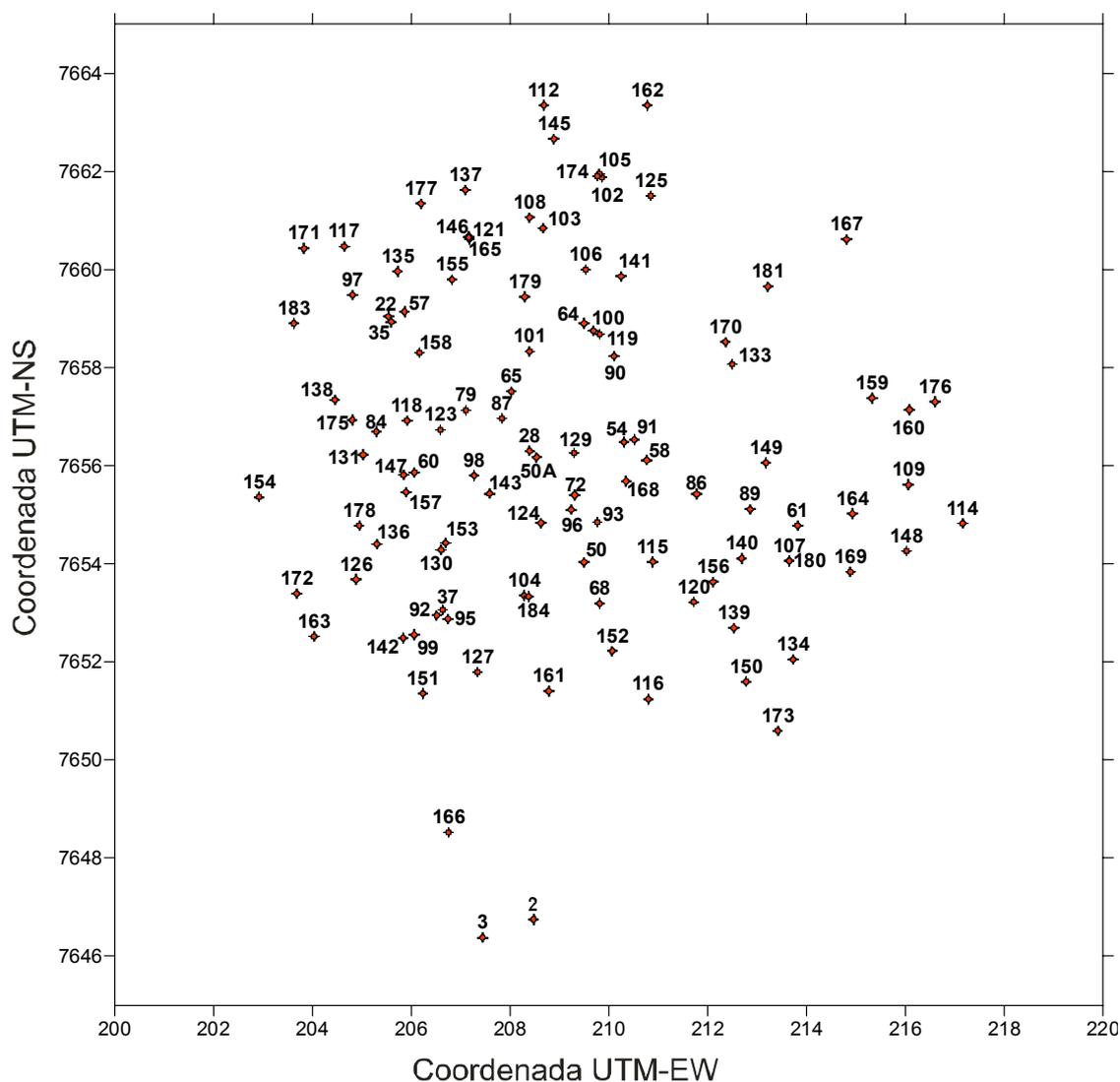
A cota altimétrica do nível estático (CNE) foi obtida da subtração da profundidade do nível d'água, medida nos poços pelo DAERP, pela cota topográfica na boca do poço.

Foram compostos 3 bancos de dados: um para a Krigagem e dois para a Máxima Entropia Bayesiana (MEB). Para a Krigagem, que não trabalha na dimensão temporal, foi compilado um banco de dados somente com a identificação dos poços, sua posição espacial, cota altimétrica da boca do poço, a medida da profundidade do nível estático e a cota altimétrica do nível estático (Apêndice A). Para a MEB foram compilados dois bancos de dados distintos, um com as medidas de profundidade do nível estático (Apêndice B) e outro com as medidas de profundidade do nível dinâmico e vazão (Apêndice C), ambos com datas, pela metodologia de MEB incorporar a dimensão temporal.

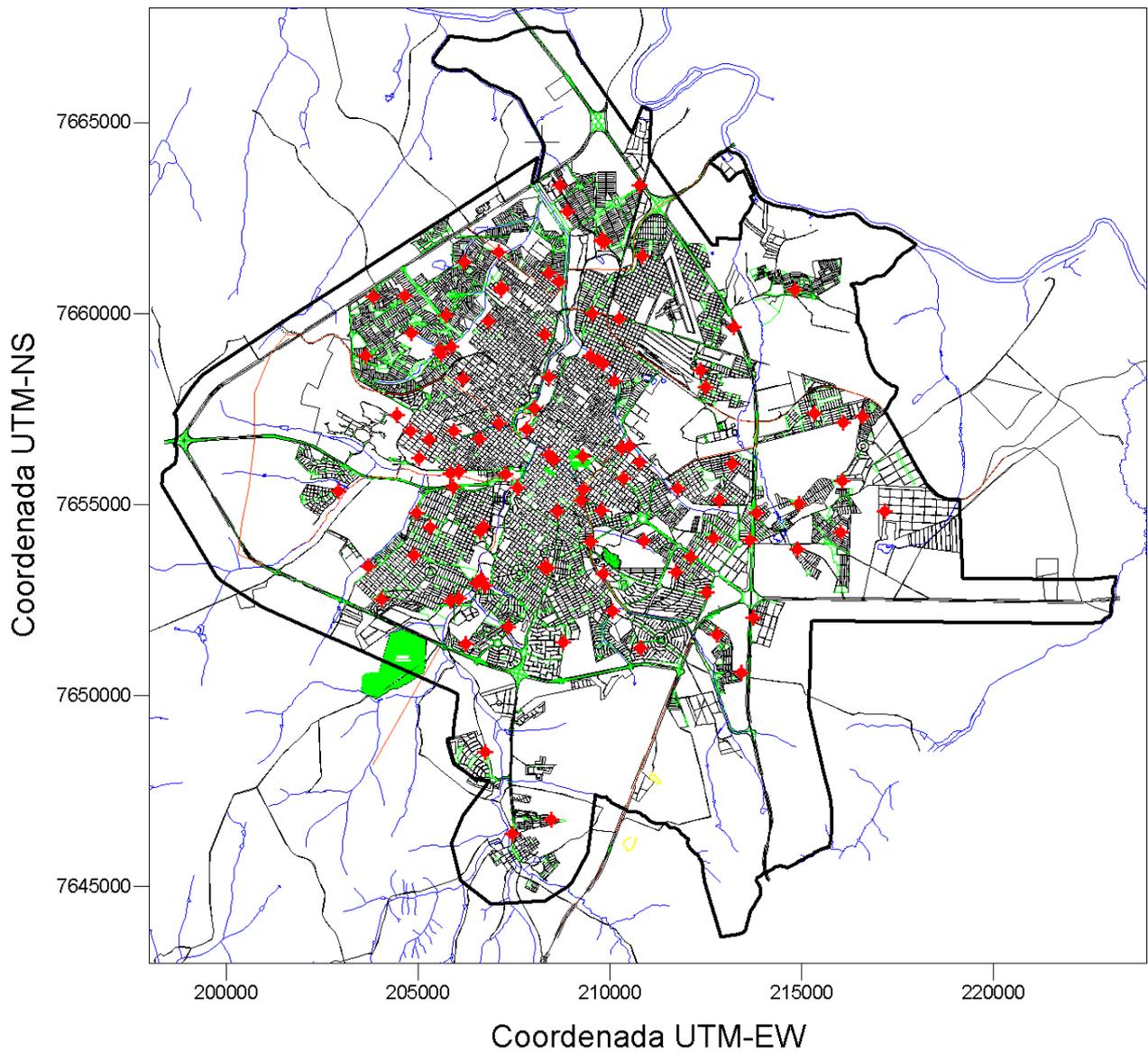
As medidas de profundidade de nível estático (dado *hard*) disponíveis são escassas, pois, por serem poços para abastecimento público do município, os poços operam 24 horas por dia, parando a abstração de água somente para troca de bombas ou manutenção, quando pode ser efetuada uma medida. A falta de um programa de monitoramento do nível estático, regular e adequadamente, traz algumas dificuldades quando se quer fazer uma modelagem espaço-temporal da variação da superfície potenciométrica.

Foram obtidos dados, com georreferenciamento, de 108 poços operados pelo DAERP (Fig. 51), mas somente parte deles pode ser usada devido às informações disponíveis. Na Figura 52 é possível notar como os poços concentram-se nas áreas urbanizadas, com o intuito de minimizar custos com a distribuição e atender à demanda hídrica da população. É possível notar que alguns poços encontram-se muito próximos uns dos outros, com menos de 100 metros de distância, como é o caso dos poços 107 e 180 (existe uma imprecisão no GPS que deve ser considerada e que fornece a mesma posição para ambos); 102, 105 e 174; e 121, 146 e 165. Além disso, existem outros poços, que não operados pelo DAERP e que tornam a situação mais delicada, pois a interferência entre os poços, dada pelos cones de depleção e área de influência dos poços, falseia os dados de medida do nível d'água.

Esse é um problema original dos dados que não pode ser mensurado sem um estudo específico, tendo este trabalho como hipótese que essa interferência não é significativa, apesar de se saber que existe.

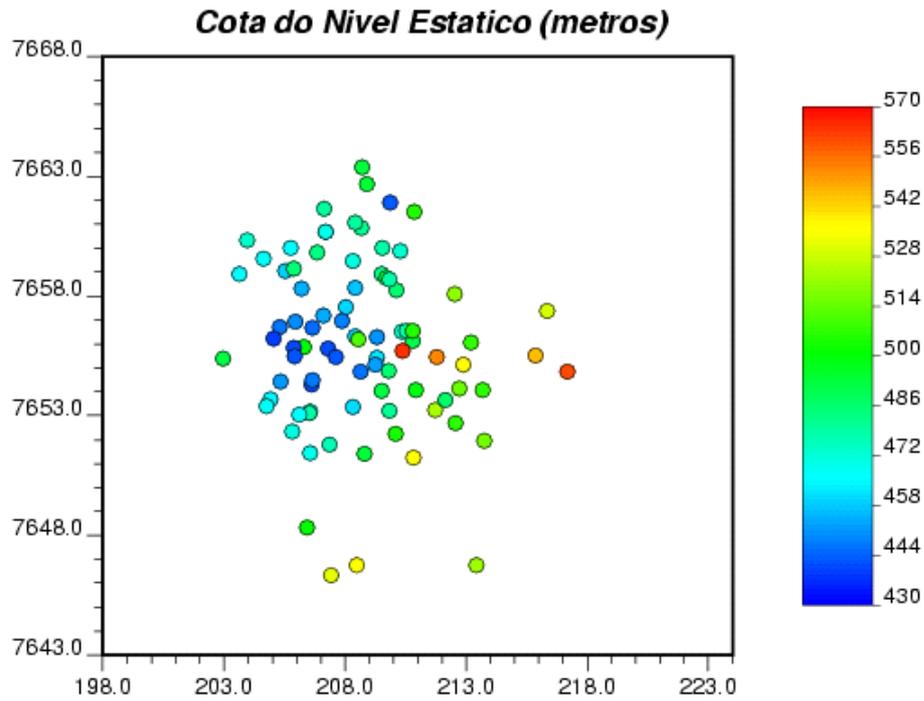


**Fig. 51:** Localização dos poços operados pelo DAERP



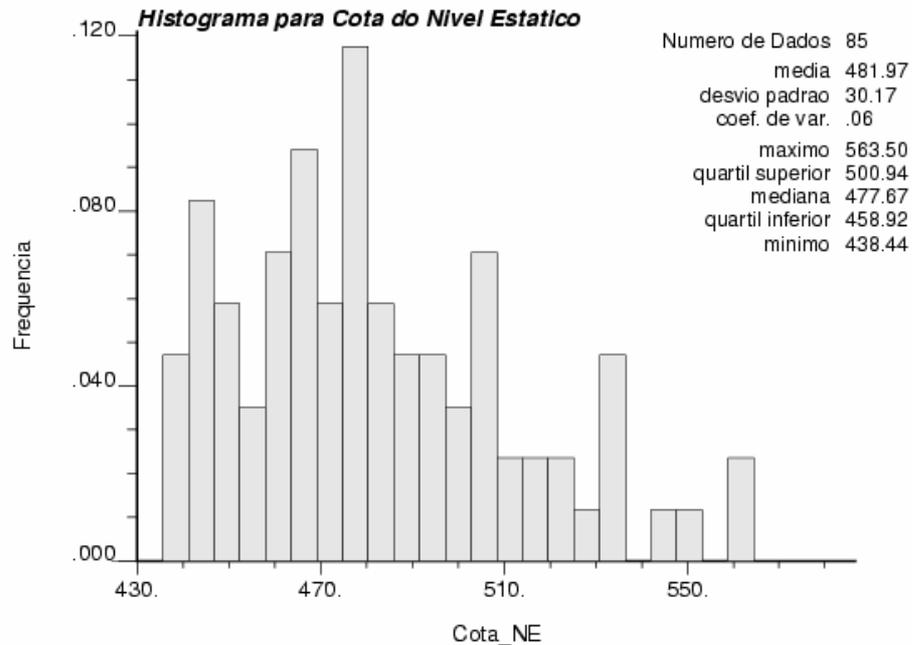
**Fig. 52:** Localização dos poços sobre malha viária

A grande proximidade de alguns poços vai ter um impacto na modelagem variográfica e no alto efeito pepita resultante, principalmente pelos valores de CNE mais altos no meio de valores mais baixos e vice-versa (Fig. 53), mas esse tópico será mais discutido no item seguinte.

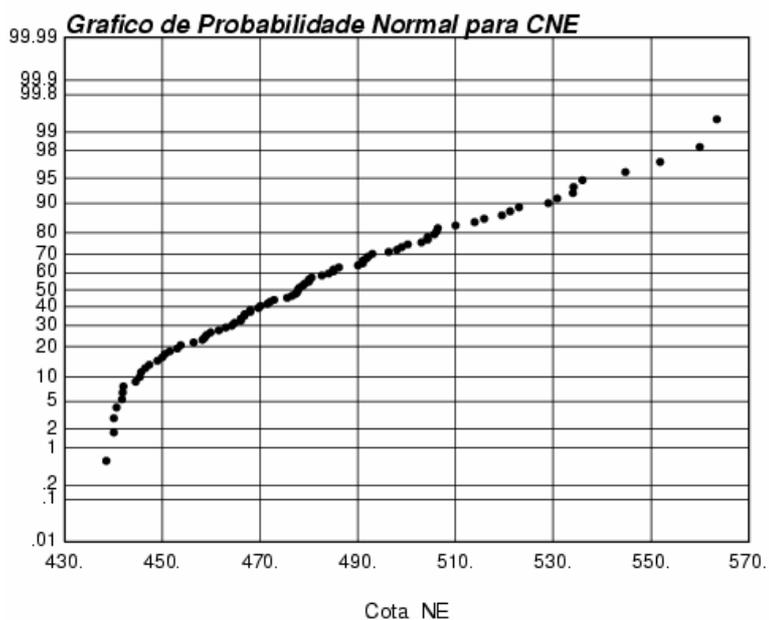


**Fig. 53:** Localização dos pontos amostrais com escala de valores de CNE

O histograma da CNE apresenta-se ligeiramente assimétrico, com média em 481,97 metros e desvio padrão de 30,17 metros (Fig. 54), demonstrado também pelo gráfico de probabilidade normal da variável (Fig. 55), que apresenta maiores freqüências para valores inferiores a 445 metros.



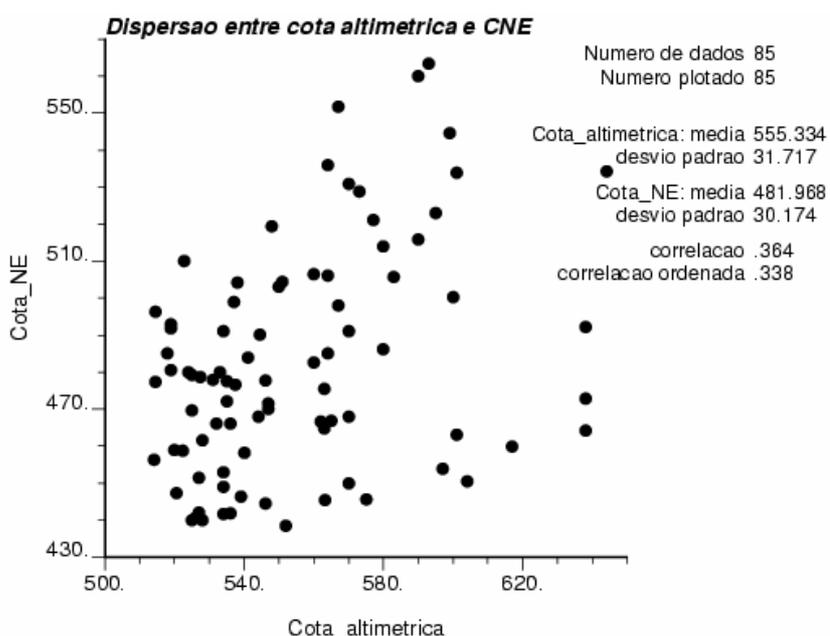
**Fig. 54:** Histograma da CNE



**Fig. 55:** Gráfico de Probabilidade Normal para CNE

A assimetria para a variável é de 0,702569, podendo ser classificada como assimetria moderada e positiva ( $0,15 < \text{assimetria} < 1$ ) e a é de curtose de -0,0443, praticamente mesocúrtica ( $\text{curtose} \approx 0,263$ ).

O gráfico de dispersão entre a cota altimétrica, na boca do poço, e a cota altimétrica do nível estático demonstra que a correlação entre as duas variáveis é muito baixa (Fig. 56), talvez exatamente pelo comportamento transitório entre aquífero confinado e aquífero livre, como alertado por Sinelli e Gallo (1980).



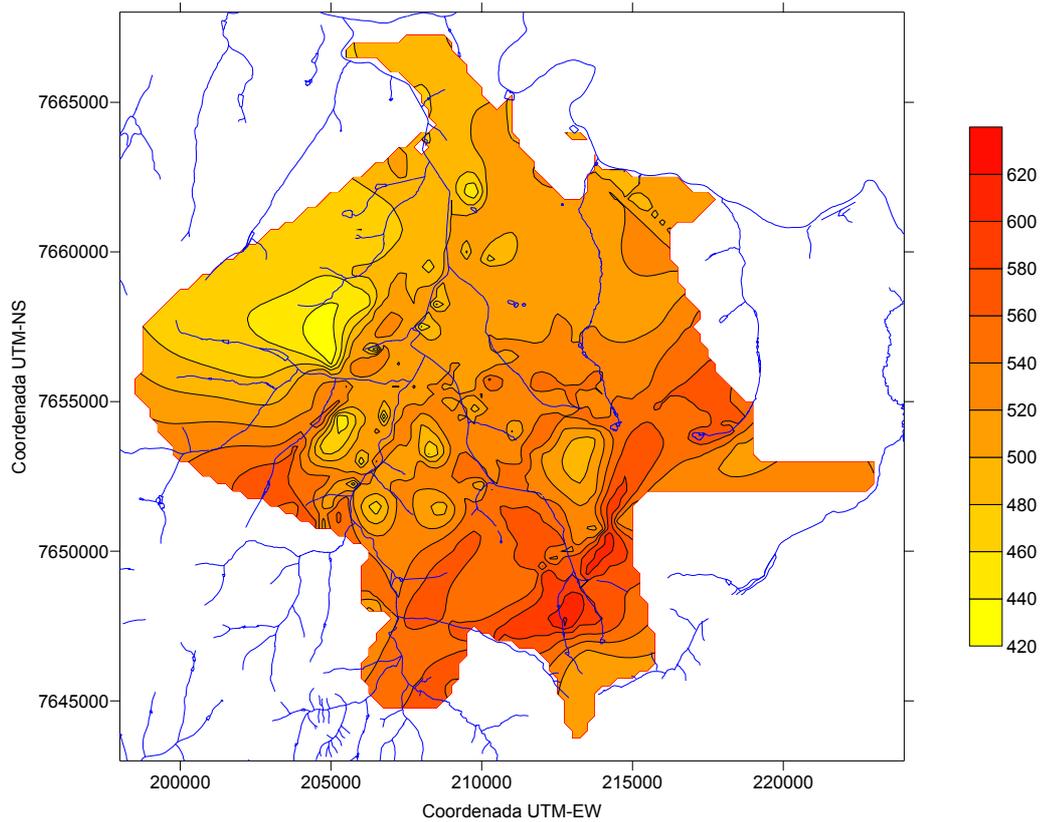
**Fig. 56:** Dispersão entre a cota altimétrica da topografia e do nível estático

O fato de não haver uma boa correlação entre as superfícies topográfica e potenciométrica pode resultar de 3 fatos, principalmente:

- ✓ O Sistema Aqüífero Guarani em Ribeirão Preto (SP) apresenta características hidrogeológicas diversas com comportamento de aqüífero livre (onde afloram os arenitos da Formação Botucatu/Pirambóia, porção nordeste do município), semi-confinado (no limite do afloramento dos basaltos fraturados da Formação Serra Geral e soleiras) a confinado (sob os basaltos e diabásios da Formação Serra Geral e rochas básicas associadas, na forma de soleiras e diques), considerando-se ainda uma complexidade geológica dada por falhas e fraturas, tal como já relatado por Sinelli (1970);
- ✓ Estima-se que no município que existam mais de 400 poços, muitos deles clandestinos, tendo efeitos diretos sobre as medidas no nível estático pela interferência dos cones de depleção; e
- ✓ As medidas do nível estático foram tomadas em diferentes épocas e são escassas para um estudo mais preciso. O nível estático somente é medido quando da troca das bombas dos poços por se tratarem de poços para abastecimento público, além disso, a troca das bombas demora de alguns minutos a poucas horas, o que é pouco tempo para a estabilização do nível estático, mesmo de um aqüífero poroso como o Guarani na região, sendo necessário aguardar ao menos 6 horas para que fosse feita uma medida com mais confiança, sem representar um valor intermediário entre o nível estático (sem bombeamento) e nível dinâmico (com bombeamento), se não houvesse interferência de outros poços.

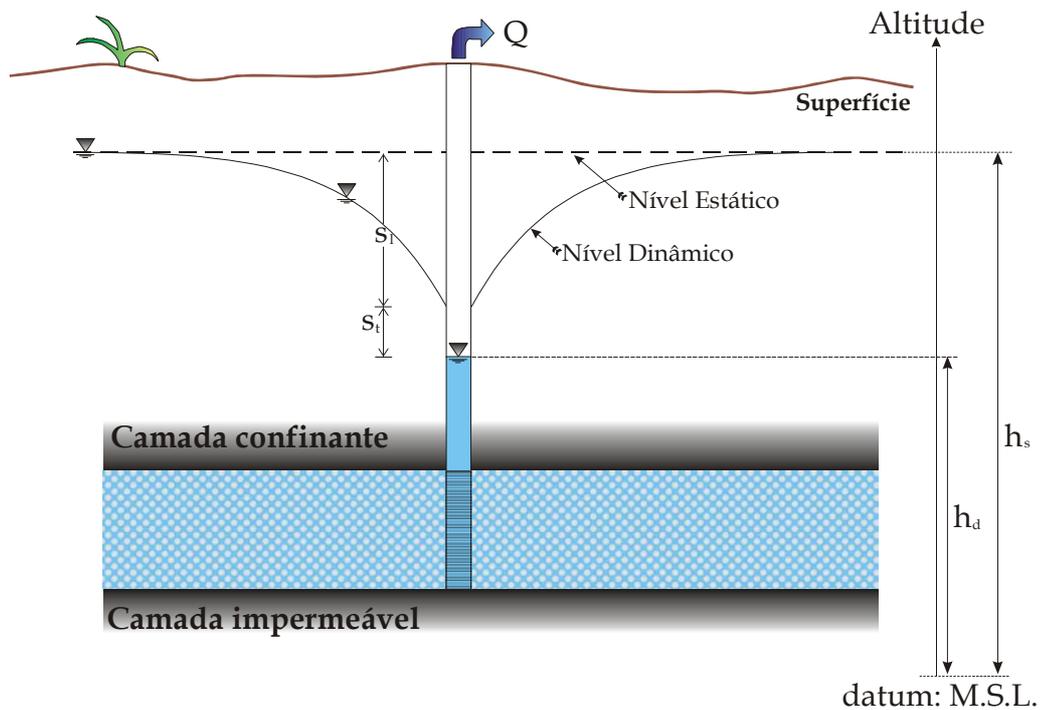
Como é possível verificar, essas incertezas não podem ser facilmente medidas ou inferidas e são responsáveis por um erro intrínseco aos dados, causando um efeito pepita alto na modelagem e estimativa do variograma, como será visto na modelagem do variograma.

A seguir (Fig. 57) é plotada a medida da cota altimétrica do nível estático pelo método da mínima curvatura, considerando as drenagens principais como afloramento da superfície freática, para visualização preliminar da distribuição da variável. É importante ressaltar a importância que também devem ter mapas elaborados manualmente por hidrogeólogo que conheça bem a área.



**Fig. 57:** Superfície potenciométrica por Mínima Curvatura

Existe, no entanto, uma profusão de dados de profundidade do nível dinâmico, medidos com a bomba do poço em funcionamento e sob efeito do cone de depleção ou rebaixamento da superfície potenciométrica (Fig. 58).



**Fig. 58:** Ilustração da relação entre o nível estático e o nível dinâmico de um aquífero confinado

Essas medidas de nível dinâmico e vazão serão utilizadas para se obter uma medida estimada da cota altimétrica do nível estática. A Capacidade Específica de um poço é a relação entre sua vazão, em m<sup>3</sup>/h, e o rebaixamento do nível d'água em metros (Q/s). Este conceito (ou seu equivalente, a vazão específica) é uma das melhores formas de se comparar a produtividade de aquíferos e poços e será utilizada para se estimar a profundidade do nível estático com suas incertezas (dado *soft*). Esta proposta será discutida com detalhe mais adiante no item Máxima Entropia Bayesiana.

O uso de pré-filtros em poços reduz as perdas por fricção, diminuindo conseqüentemente o rebaixamento e aumentando a capacidade específica. A precipitação de ferro por ferro-bactérias e carbonatos, formando incrustações que alteram as condições do poço e podem causar colmatagem do poço, é uma das causas da perda de capacidade específica de um poço, além de outras causas construtivas que podem interferir nessas medidas e na produção do poço. Outro problema construtivo comum em muitos casos, mas que não será discutido aqui, é a questão falta dos cuidados sanitários necessários. Uma outra dificuldade presente é a mudança de técnicas construtivas de poços, que tentou-se minimizar utilizando-se somente os dados de poços do DAERP.

## 2. Análise de Superfícies de Tendência

Foi realizada uma análise de superfícies de tendência com os dados espacializados (85 poços), obtendo-se as seguintes equações para uma regressão polinomial de 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> graus:

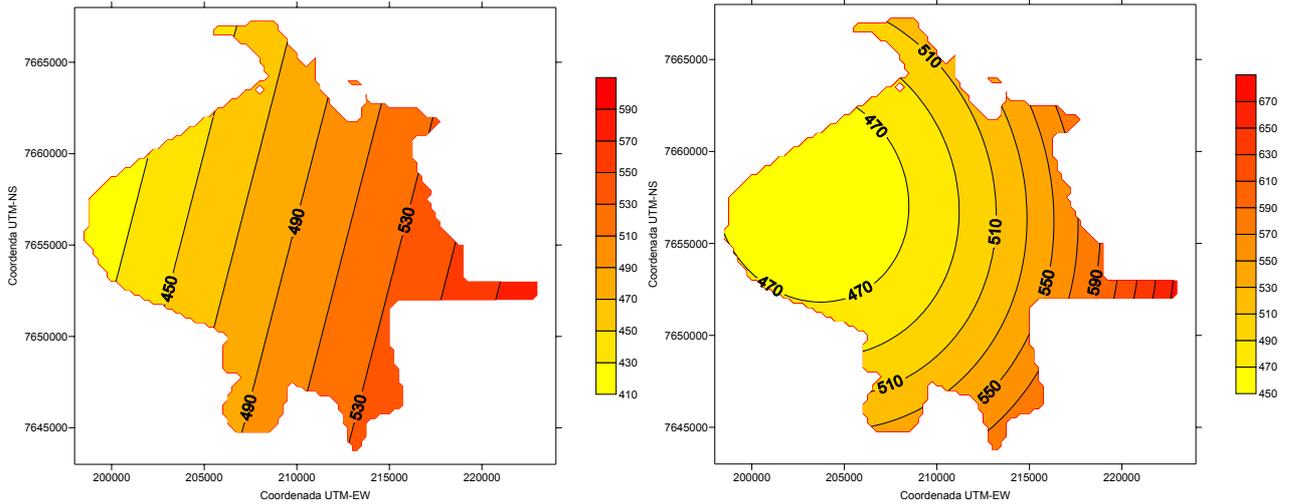
*Superfície planar simples (1<sup>o</sup> grau)*

$$Z(x,y) = 12204,0270 - 0,0017.y + 0,0067.x$$

*Superfície quadrática (2<sup>o</sup> grau)*

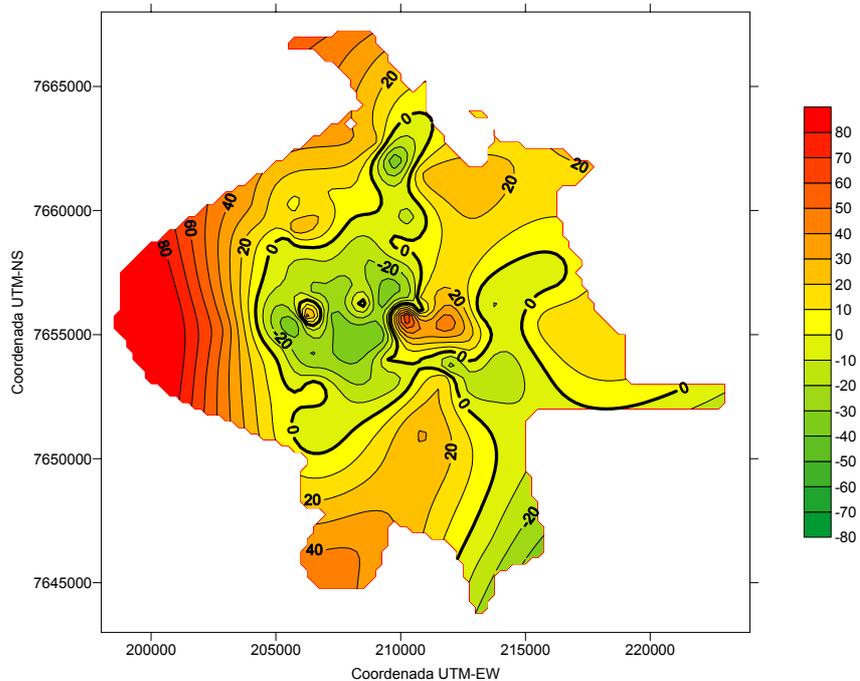
$$Z(x,y) = 27674027,0446 - 7,2019.y + 4,69.10^{-7}.y^2 - 0,9763.x + 9,77.10^{-8}.xy + 5,6104.10^{-7}.x^2$$

As superfícies de tendência (Fig. 59) tomam formas segundo a equação que as definem. A superfície de 1<sup>o</sup> grau define um plano com caimento para NW e a de 2<sup>o</sup> grau define uma superfície parabolóide, com centro na porção NW da área de expansão urbana do município.

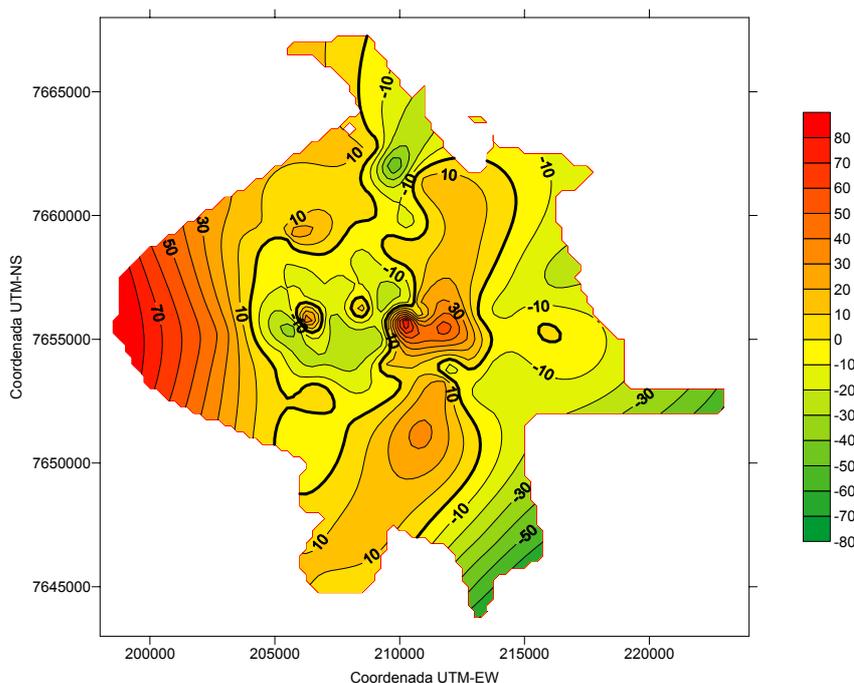


**Fig. 59:** Superfície de tendência de 1º grau (esquerda) e de 2º grau (direita)

Os resíduos, resultados da diferença entre a regressão polinomial e os valores medidos, foram interpolados por mínima curvatura. Os mapas de resíduos das superfícies de 1º grau (Fig. 60) e 2º grau (Fig. 61) são bastante semelhantes, apresentando resíduos negativos na porção central da cidade de Ribeirão Preto e positivos para fora. São gerados alguns artefatos positivos e negativos nas regiões leste e sudeste da área, resultados da ausência de dados e problemas de extrapolação na análise de superfícies de tendência.



**Fig. 60:** Resíduos da superfície de tendência de 1º grau



**Fig. 61:** Resíduos da superfície de tendência de 2º grau

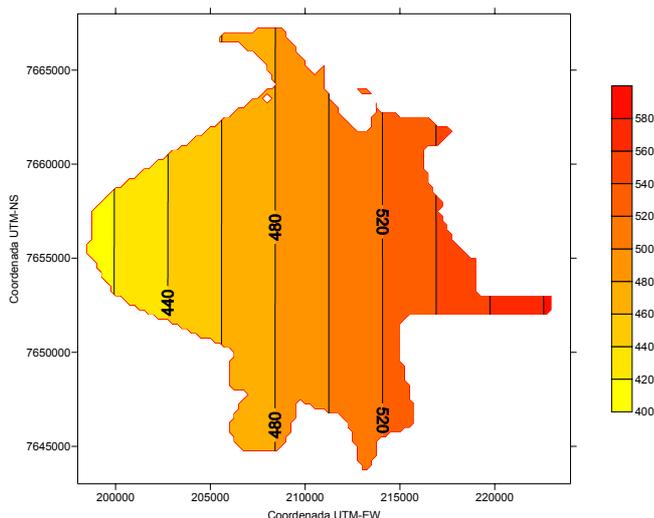
A análise de variância, como proposta por Davis apud Landim (1998), para as superfícies de 1º e 2º graus apresenta os seguintes resultados:

<b>Fontes de Variação</b>	<b>SQ</b>	<b>g.l.</b>	<b>MQ</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>F<sub>calc.</sub></b>	<b>F<sub>crit. (α=0,05)</sub></b>
Regressão de 1º grau	37759,74317	2	18879,87159	0,4879	39,0659	3,1079
Resíduos referentes à 1º grau	39629,1231	82	483,2819891			
Regressão de 2º grau	45507,41174	5	9101,482349	0,5880	22,5528	2,3302
Resíduos referentes à 2º grau	31881,45453	79	403,5627156			
Regressão devido ao incremento de 1º para 2º grau	7747,668573	3	2582,556191		6,3993	2,7203
<b>Total</b>	<b>77388,86628</b>	<b>84</b>				

A porcentagem de ajuste dos dados à superfície da equação quadrática, de  $R^2 \approx 58,80\%$ , é maior que o da equação planar, de  $R^2 \approx 48,79\%$ .

Como o  $F_{\text{calculado}}$  da regressão, devido ao incremento de 1º para 2º grau é maior que o  $F$  crítico (tabelado), rejeita-se a hipótese nula  $H_0$  e se aceita a alternativa  $H_1$ , de que é significativa a diferença dada pelo incremento da ordem da regressão polinomial.

Assim, foi calculada a superfície de tendência de 3º grau (Fig. 62).



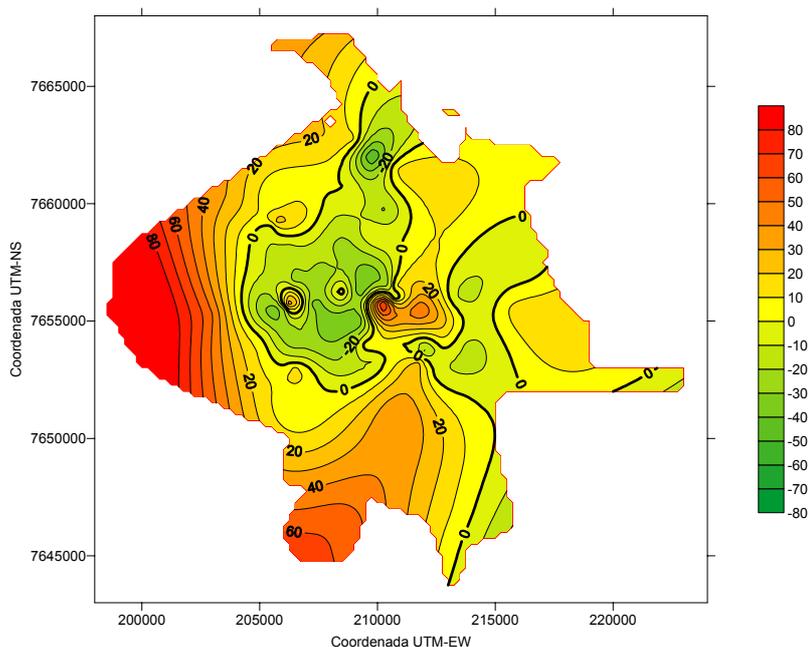
**Fig. 62:** Superfície de tendência de 3<sup>o</sup> grau

É possível notar que essa superfície guarda muitas semelhanças com a superfície de 1<sup>o</sup> grau quando plotada para as coordenadas da área de estudo. Sua equação, no entanto, com 10 coeficientes é bem mais complexa:

*Superfície cúbica (3<sup>o</sup> grau)*

$$Z(x,y) = 0 + 1,83 \cdot 10^{-32} \cdot y + 2,68 \cdot 10^{-24} \cdot y^2 - 2,21 \cdot 10^{-18} \cdot y^3 - 4,99 \cdot 10^{-34} \cdot x + 1,58 \cdot 10^{-23} \cdot xy + 1,20 \cdot 10^{-16} \cdot xy^2 + 8,62 \cdot 10^{-25} \cdot x^2 + 6,58 \cdot 10^{-18} \cdot x^2y + 2,70 \cdot 10^{-19} \cdot x^3$$

O mapa de resíduos da superfície cúbica (Fig. 63) é semelhante aos mapas obtidos para as superfícies planar e quadrática.



**Fig. 63:** Resíduos da superfície de tendência de 3<sup>o</sup> grau

O teste F aplicado para as superfícies de 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> graus apresenta um resultado diferente do anterior:

<i>Fontes de Variação</i>	<i>SQ</i>	<i>g.l.</i>	<i>MQ</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>F<sub>calc.</sub></i>	<i>F<sub>crít. (α=0,05)</sub></i>
<i>Regressão de grau "p"</i>	45507.41174	2	22753.70587	0.5880	58.5232	3.1079
<i>Resíduos referentes à "p"</i>	31881.45453	82	388.798226			
<i>Regressão de grau "p+1"</i>	35437.28579	9	3937.476199	0.4579	7.0393	2.0073
<i>Resíduos referentes à "p+1"</i>	41951.58048	75	559.3544065			
<i>Regressão devido ao incremento de "p" para "p+1" grau</i>	-10070.126	7	-1438.589422		-2.5719	2.1343
<i>T o t a l</i>	77388.86628	84				

A porcentagem de ajuste dos dados à superfície da equação cúbica, de  $R^2 \approx 45,79\%$ , é menor que o da equação quadrática, de  $R^2 \approx 58,80\%$ .

Neste caso, o  $F_{\text{calculado}}$  da regressão, devido ao incremento de 2<sup>o</sup> para 3<sup>o</sup> grau, é menor que o F crítico (tabelado), aceitando-se a hipótese nula  $H_0$  de que é insignificante a diferença dada pelo incremento da ordem da regressão polinomial e sendo plausível a hipótese de se assumir uma tendência quadrática para os dados, quando somente considerada a dimensão espacial.

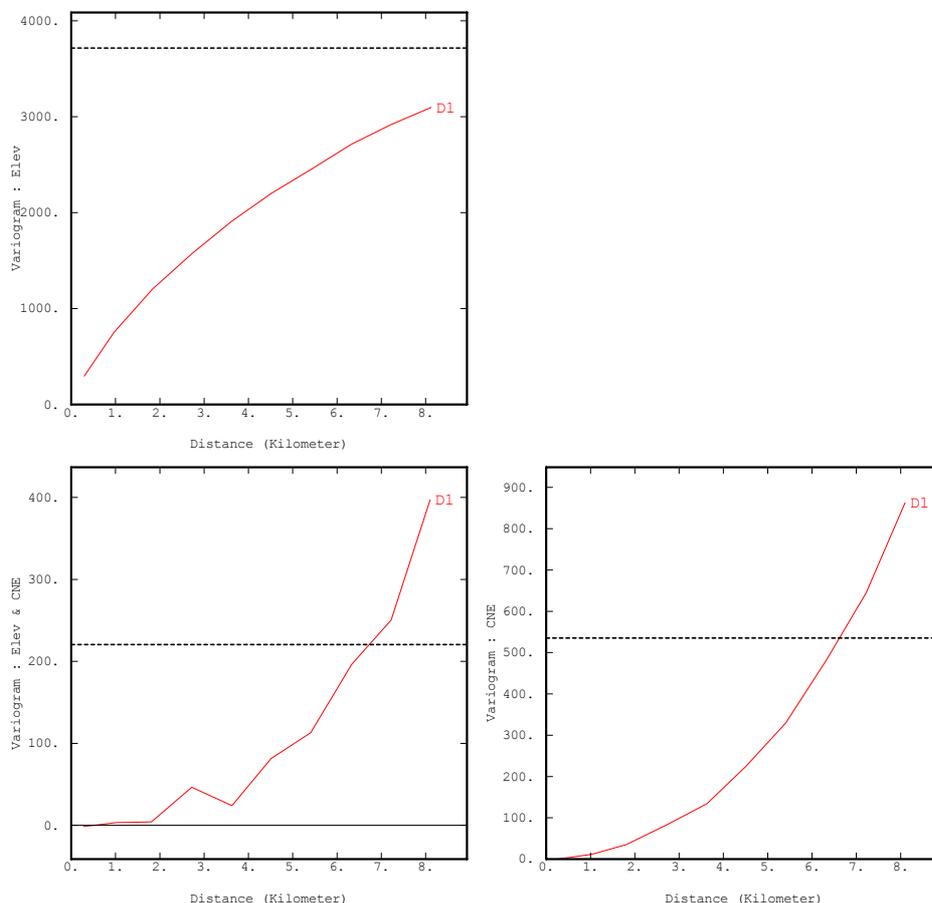
É possível aqui especular que existe algum fenômeno que gera anomalias negativas na superfície potenciométrica do Sistema Aquífero Guarani sob a cidade de Ribeirão Preto. A consideração desse estudo é de que essa anomalia é dada por um processo de rebaixamento dado pela sobreexploração do aquífero.

### 3. Geoestatística Clássica

A cokrigagem da cota altimétrica da topografia e da cota altimétrica do nível estático (CNE) foi a primeira alternativa concebida para um estudo de Geoestatística Clássica, pois existem 10.591 pontos de cota topográfica para a área de estudo (que poderiam ser usados como variável secundária) e somente 85 pontos para cota altimétrica do nível estático (a serem usados como variável primária). Porém, esse método ficou inviabilizado pela baixa correlação entre as variáveis, de cerca de 0,3004.

A variável topográfica é bem comportada e define um variograma experimental que seria muito fácil o ajuste de um modelo exponencial (Fig. 64 - no alto). A variável de cota altimétrica do nível estático (CNE) exhibe, por sua vez, uma forte deriva (tendência) (Fig. 64 - direita), como já observado no item anterior, e evidenciada após 6,5 km quando o variograma experimental ultrapassa a variância a priori e continua de forma

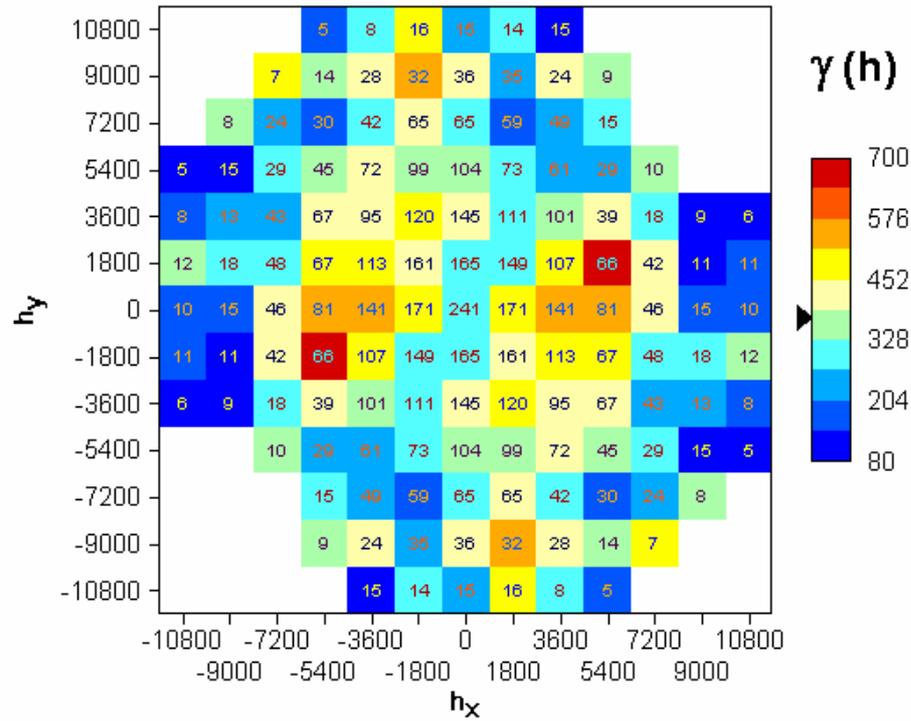
ascendente com um comportamento parabólico, sendo uma forte indicação de que a variável CNE não é estacionária e impedindo a aplicação da técnica de Krigagem Ordinária, que exige uma função aleatória ordinária. A única variável tratada pela Geoestatística Clássica, nesse caso, é a cota altimétrica do nível estático.



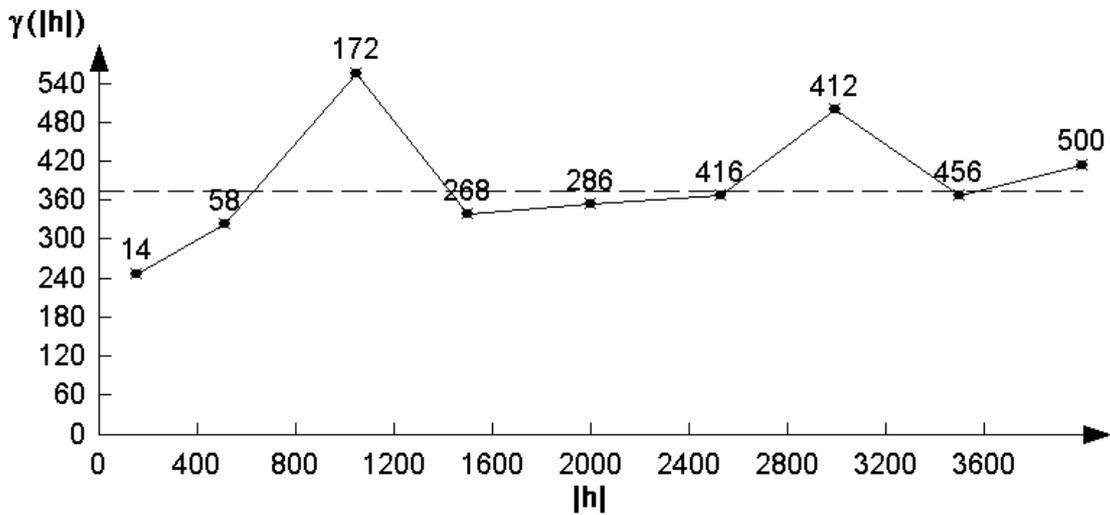
**Fig. 64:** Variogramas experimentais diretos e cruzado para cota altimétrica da topografia e do nível estático

A segunda alternativa era a Krigagem Residual, como descrita por Samper-Calvete e Carrera-Ramírez (1996), pela krigagem ordinária dos resíduos da superfície de tendência. No entanto, como discutido pelos autores, este é um processo inconsistente, na medida em que o método de mínimos quadrados ordinários supõe que os resíduos são espacialmente independentes, ainda que a existência do variograma implique que existe uma estrutura de auto-correlação.

O mapa do variograma dos resíduos é bastante isotrópico (Fig. 65) e o variograma experimental exibe um formato que permite somente o ajuste de um modelo efeito pepita puro (Fig. 66) aos dados removida tendência de 2º grau.

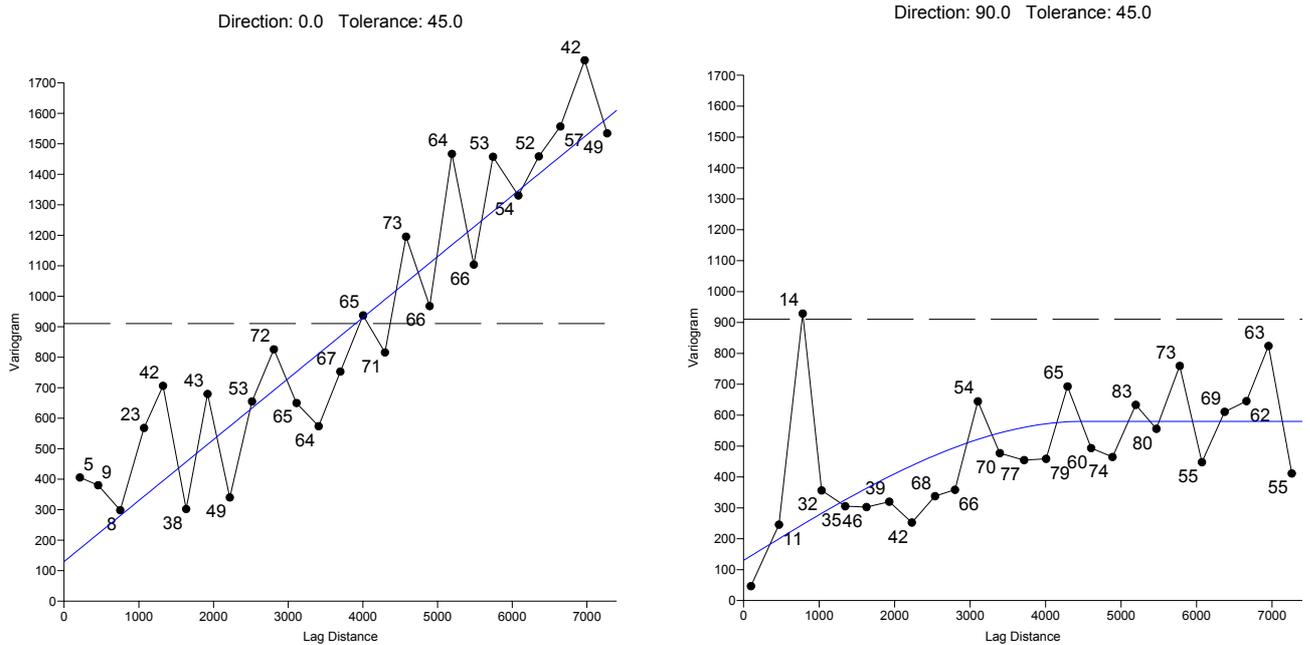


**Fig. 65:** Mapa de variograma dos resíduos da superfície quadrática da CNE com passo 1,8 km (nas células está representado o número de pares utilizados para calcular a semivariância –  $m^2$ )



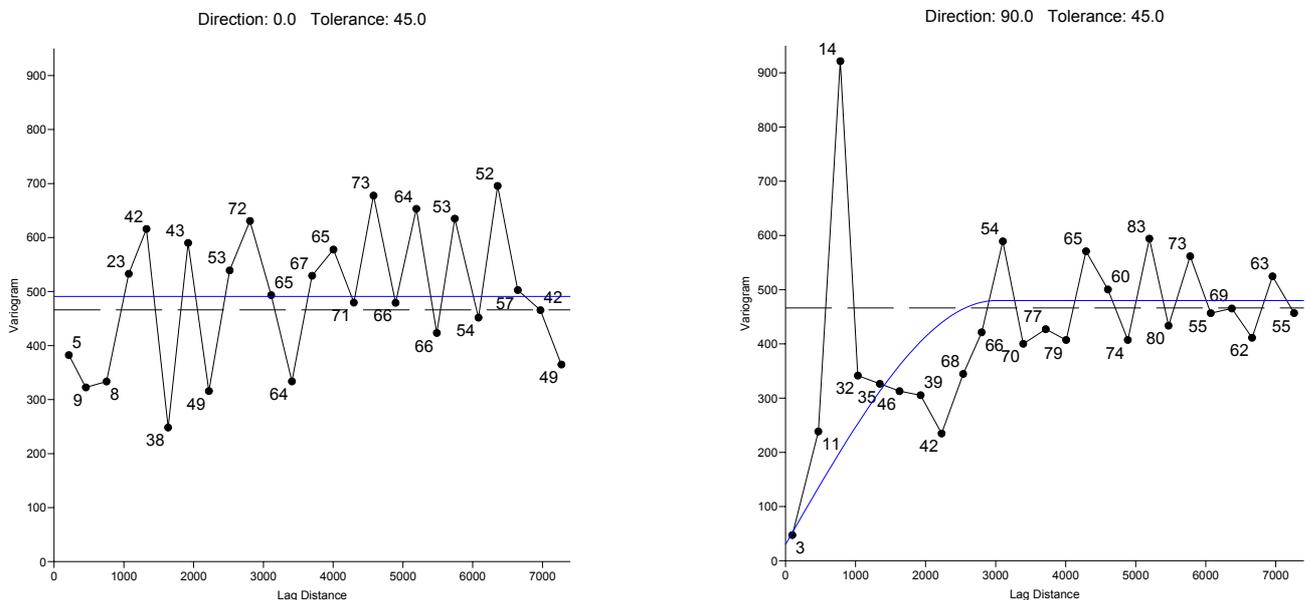
**Fig. 66:** Variograma experimental omnidirecional para a cota altimétrica no nível estático

Tentando simplificar o problema, pode-se supor uma tendência de 1º grau, tal como (cf. STURARO, 1988), obtendo-se para os dados de CNE os seguintes variogramas (Fig. 67):



**Fig. 67:** Variogramas direcionais:  $\gamma_{EW}(h) = 130 + Lin(0,2)$  e  $\gamma_{NS}(h) = 130 + 450.Sph(4500)$

É nítido que existe uma anisotropia dos dados, mas dados pela tendência. Ao se levar em conta uma tendência de 1º grau, como Sturaro (1988), observa-se que o variograma da direção EW somente admite um efeito pepita puro (Fig. 68).



**Fig. 68:** Variogramas direcionais:  $\gamma_{EW}(h) = 491$  e  $\gamma_{NS}(h) = 30 + 450.Sph(3000)$

Os variogramas das figuras 67 e 68 apresentam-se com uma alta variabilidade de cerca de 1 km para cada ciclo que podem refletir um artefato gerado pelo passo, influência de valores anômalos ou o comportamento da variável, indicando interferência entre poços, área de influência e cone de depleção.

Outra tentativa foi assumir uma função aleatória intrínseca de ordem  $k$ . O programa ISATIS<sup>®</sup> permite ao modelador identificar uma deriva (tendência) ótima e a melhor combinação de modelos de variograma para constituir a covariância generalizada. Foi definida uma vizinhança em quadrante, com um raio de procura de 2,5 km.

Na identificação da tendência, indo ao encontro do estudo de análise de superfícies de tendência, fica evidente que a melhor opção por uma superfície de tendência quadrática dentre as possibilidades testadas (Tab. 14).

**Tab. 14:** Identificação da deriva a ser assumida

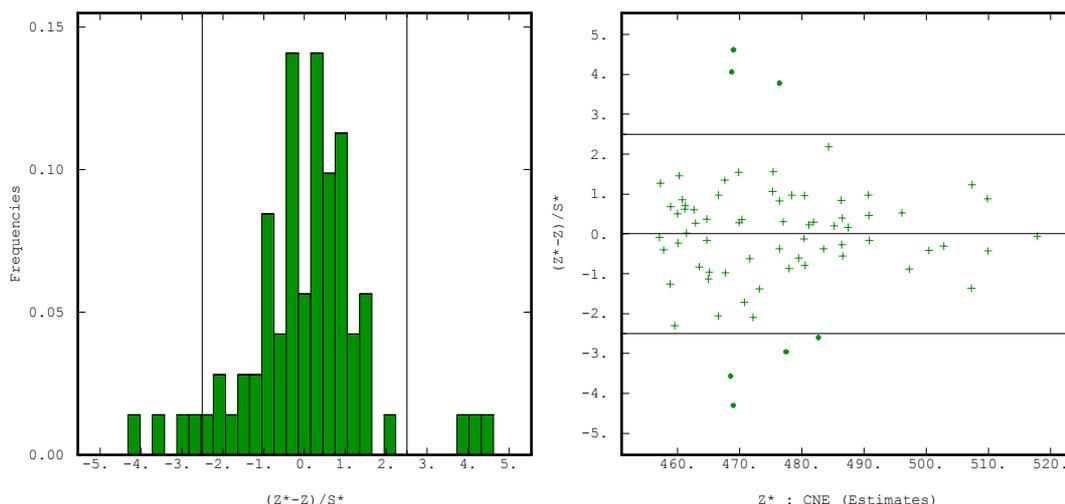
Média Ordenada	Média do Erro	Variância do Erro	Deriva testada
0	$-3,9106 \cdot 10^{-7}$	$2,6902 \cdot 10^{-10}$	$1 \times y \quad x^2 \quad xy \quad y^2$
1,6	0,057285	3,3552	$1 \times x^2$
2,1	1,2956	0,14187	$1 \times y$
2,4	-0,0029212	8,0185	Sem deriva

A covariância generalizada correspondente a essa superfície quadrática é expressa somente por um modelo exponencial, com um coeficiente de  $3,388 \cdot 10^{-10}$  (Tab. 15), sendo todas as outras estruturas descartadas por seus patamares serem praticamente zero. No entanto, não há muita diferença entre a estrutura exponencial e as outras, nem no ordenamento nem na ordem de grandeza dos coeficientes.

**Tab. 15:** Teste de covariância generalizada para uma deriva quadrática

Escore	Efeito Pepita	Exponencial	Esférico	C.G. de 1ª ordem	C.G. spline
0,9798	0	$3,388 \cdot 10^{-10}$	0	0	0
0,97241	0	0	0	$9,1771 \cdot 10^{-10}$	0
0,96907	0	0	$5,9683 \cdot 10^{-10}$	0	0
1,0769	$1,2841 \cdot 10^{-10}$	0	0	0	0
0,89708	0	0	0	0	$3,0592 \cdot 10^{-9}$

A validação cruzada faz uma verificação do modelo assumido. O desvio entre o valor de CNE medida e estimada possui média de erro padrão de 0,01593, tendo somente 7 valores fora do intervalo de -2,5 e 2,5, e variância de 2,21131 para os 71 valores testados (Fig. 69), sendo valores adequados para o processo de estimativa.



**Fig. 69:** Histograma do erro padrão  $(Z^*-Z)/S^*$  e diagrama do valor estimado pelo erro padrão

A krigagem fornece a seguinte distribuição para a CNE estimada:

Mínimo = 454,68 m; Quartil-25% = 464,75; Mediana = 476,26; Quartil-75% = 490,91; e Máximo = 535,52 com uma média  $\bar{Z} = 479,68\text{m}$ , desvio-padrão  $s = 18,31\text{m}$  e  $\bar{Z}/s = 0,0381766$ .

Para a medida do desvio-padrão, devido ao número de casas decimais, todos valores são zero, dando a entender que a interpolação foi bem sucedida.

Esta falsa idéia ocorre por causa da forte tendência dos dados, da alta isotropia dos resíduos e de um modelo variográfico praticamente de efeito pepita puro para os resíduos.

Em estudos anteriores a tendência já tinha sido observada por outros pesquisadores (cf. STURARO, 1988) (Tab. 16).

**Tab. 16:** Modelos variográficos adotados para diversas variáveis de interesse hidrogeológico em Ribeirão Preto (STURARO, 1988)

Variável	Modelo	Patamar (m <sup>2</sup> )	Alcance (km)	Efeito Pepita (m <sup>2</sup> )
Espessura da Fm. Serra Geral	Esférico	1.800	3,5 km	60
Cota altimétrica do topo da Fm. Botucatu	Linear	345	1 km	300
Superfície Potenciométrica	Linear	147 (150°) 27 (60°)	1 km	130
Vazão específica	Efeito Pepita Puro			9,9

Bellenzani-Júnior e outros (1990), também estudando o Sistema Aquífero Guarani, porém na cidade de Araraquara, encontrou modelos diferentes (Tab. 17).

**Tab. 17:** Modelos variográficos adotados para diversas variáveis de interesse hidrogeológico

em Araraquara (BELLENZANI-JR. et al. 1990)

Variável	Modelo	Patamar (m <sup>2</sup> )	Alcance (km)	Efeito Pepita (m <sup>2</sup> )
Espessura da Fm. Serra Geral	Esférico	2.529	5 km	0
Cota altimétrica do topo da Fm. Botucatu	Esférico	3.105,1	8 km	0
Superfície Potenciométrica	Esférico	3.719,3	2,5 km	1.800
Vazão específica	Efeito Pepita Puro			15

É evidente que existem diferenças geológicas, um arcabouço estrutural distinto entre as duas regiões, porém, é possível notar que em Araraquara é possível identificar uma estrutura de auto-correlação espacial que em Ribeirão Preto se perde pela forte deriva, provavelmente resultante de uma exploração intensiva do aquífero e por se encontrar na borda da bacia, com forte estruturação tectônica e entrecortada por diques e soleiras de diabásio.

Como é possível perceber os dados exercem forte influência nos resultados das estimativas, sendo necessário definir critérios adequados e assumir hipóteses para uma modelagem aceitável. Um banco de dados organizado e confiável é imprescindível para o sucesso de uma estimativa.

Para esse estudo a recomendação é não assumir modelos sobre os quais pairam muitas incertezas, devendo-se optar pela aplicação de métodos de interpolação que comprometem-se menos com o comportamento regional/global dos dados como o Inverso do Quadrado da Distância (IQD) ou a Mínima Curvatura ou, de melhor forma, pela interpolação manual (analógica) da superfície potenciométrica pelo especialista, que incorpora outras fontes de conhecimento, fenômenos de escalas distintas e particularidades locais que não seriam considerados.

#### 4. Máxima Entropia Bayesiana

As análises utilizaram-se da biblioteca de rotinas para MATLAB<sup>®</sup> (Mathworks, Inc.), BMElib versão 0.4 e 1.0b, desenvolvida por Marc L. Serre e Patrick Bogaert na Universidade da Carolina do Norte em Chapel Hill (CHRISTAKOS et al., 2002).

Utilizou-se o MATLAB (*Matrix Laboratory*, Mathworks, 2000), versão 6.0.0.88 e 6.5, e rodando em estação gráfica SUN/Solaris e em Pentium-IV.

#### 4.1. Conhecimento Geral

Assumiu-se nesse trabalho uma função aleatória ordinária  $X(p)$  para representar a variável de cota altimétrica do nível estático, sendo  $Z(p) = m_z + X(p)$  seu resíduo, onde  $m_z$  é a tendência média espaço-temporal, calculada pela média estocástica espaço-temporal.

Para o processo de estimativa, foi assumido um covariograma espaço-temporal gaussiana de contribuição igual a 1000 m<sup>2</sup>, alcance espacial de 4 km e alcance temporal de 2192 dias (ou 6 anos) (Fig. 70).

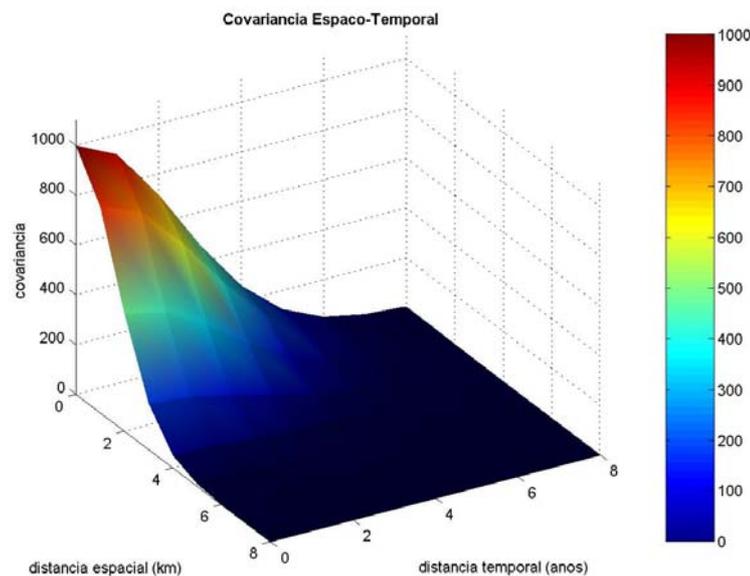


Fig. 70: Covariograma espaço-temporal

#### 4.2. Geração de dados tipo soft

Os dados de nível estático do tipo *soft* foram obtidos a partir de medidas de nível dinâmico e vazão medidas pelo DAERP de 1987 até junho de 1999 para 52 poços.

Existiam poços que tinham mais de uma medida de nível dinâmico na mesma data, para os quais foi considerada a média aritmética dessas medidas. Alguns poços tiveram a medida de nível dinâmico com uma vazão mínima e máxima que não chegavam a variar 8 m<sup>3</sup>/s e com variação de nível dinâmico inferior a 1 m; nesse caso foi calculada a média do nível dinâmico e da vazão. Para os poços que tinham TAP (registro de derivação instalado na tubulação) foi calculada a média do nível dinâmico e a vazão foi obtida com a soma da vazão de cada TAP. Outros dados foram desconsiderados por não conterem o valor do nível dinâmico ou da vazão, inclusive por

entupimento do poço.

Dispondo-se dos dados de nível dinâmico e a vazão foi obtido o nível estático estimado, através de uma regressão não-linear e calibração de um modelo adequado. Temos, assim, um erro associado a essa medida, desta forma, caracterizando um dado *soft* do tipo probabilístico para o nível estático, representado por uma curva de distribuição gaussiana, para cada medida de nível dinâmico no tempo, como apresentado a seguir.

Sendo Capacidade Específica  $S = \frac{Q}{s} = \frac{Q}{|hs - hd|}$ , onde  $S$  é a capacidade específica,

$Q$  é vazão,  $hs$  é o nível estático e  $hd$  é o nível dinâmico, pode-se obter  $hd = hs + \frac{Q}{S}$ .

Supondo-se que o nível dinâmico tenha uma componente que não varia e uma componente que varia no tempo, obtém-se:

$hd = a_0 + a_1.t + \frac{Q}{S}$ , onde  $a_0$  e  $a_1$  são coeficientes dessa equação,  $t$  é o tempo e  $hs = a_0 + a_1.t$

Foi considerado também um modelo com efeito de flutuação do nível d'água dado pela sazonalidade da precipitação pluviométrica, sendo  $hs = a_0 + a_1.t + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{365,25}t + t_0\right)$

e  $hd = a_0 + a_1.t + \frac{Q}{S} + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{365,25}t + t_0\right)$ .

Como modelo físico pode-se considerar:

(1)  $S(t) = \frac{Q}{s}$ , a capacidade específica  $S$ , um parâmetro da produtividade do poço,

como uma variável aleatória dependente do tempo e diminuindo com o tempo; ou

(2)  $s(t) = hs(t) - hd(t) = \frac{1}{S}Q \Rightarrow hd(t) = hs(t) - \frac{1}{S}Q$ , com  $S$  constante e rebaixamento  $s$

variando no tempo.

constante no tempo, o nível estático constante ou ambos variando. Todos os casos foram testados porém o que apresentou o melhor resultado em relação às medidas de nível estático (tipo *hard*) foi quando se considerou a capacidade específica constante.

Primeiramente foi escolhida uma regressão da cota altimétrica do nível dinâmico, envolvendo o termo constante e termos dependentes da vazão e/ou do tempo.

Foram testados alguns modelos de regressão não linear:

$$\text{Modelo 1: } \hat{hd} = a_0 + a_1t + a_2Q + a_3tQ, \text{ com } \hat{hs} = a_0 + a_1t$$

$$\text{Modelo 2: } \hat{hd} = a_0 + a_1t + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}t + t_0\right) + a_3Q + a_4tQ, \text{ com}$$

$$\hat{hs} = a_0 + a_1t + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}t + t_0\right)$$

$$\text{Modelo 3: } \hat{hd} = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}t + t_0\right) + a_2Q + a_3tQ, \text{ com } \hat{hs} = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}t + t_0\right)$$

$$\text{Modelo 4: } \hat{hd} = a_0 + a_1t + a_2Q, \text{ com } \hat{hs} = a_0 + a_1t$$

$$\text{Modelo 5: } \hat{hd} = a_0 + a_1t + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}t + t_0\right) + a_3Q, \text{ com}$$

$$\hat{hs} = a_0 + a_1t + a_2 \cos\left(\frac{2\pi}{365.25}t + t_0\right)$$

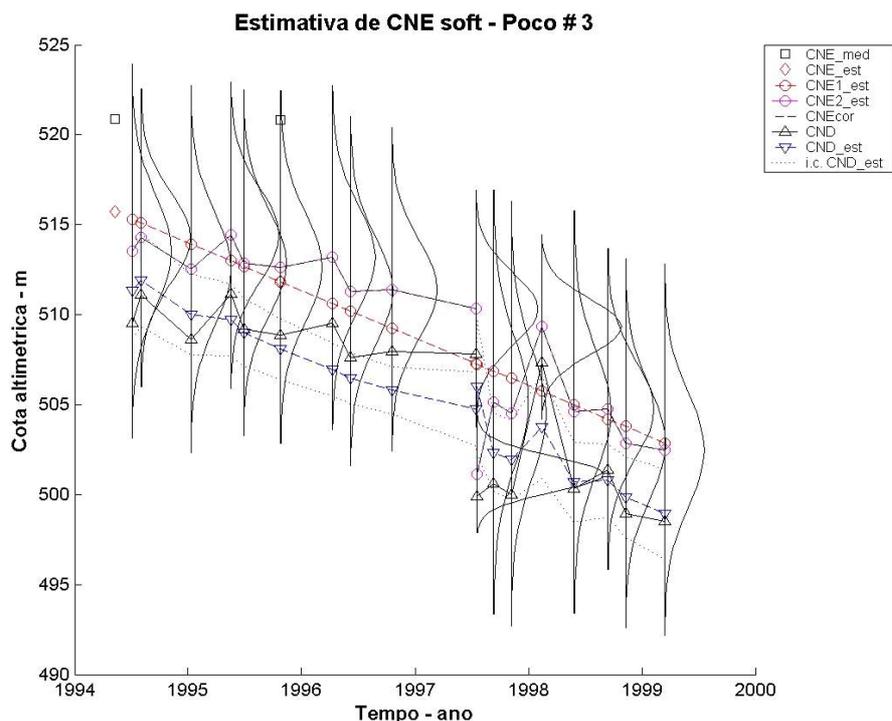
O modelo julgado mais adequado é também o mais simples,  $\hat{hd} = a_0 + a_1t + a_2Q$ , expressando uma relação linear entre as variáveis. Essa decisão foi baseada na calibração com os dados de nível dinâmico e cota altimétrica do nível estático medidos.

Com o modelo foi calculada a cota altimétrica do nível dinâmico estimada e seu intervalo de confiança. Pela equação  $\hat{s} = a_2Q$  calcula-se o rebaixamento estimado. Dessa forma obtiveram-se duas medidas da cota altimétrica do nível estático:

$$\hat{hs2} = \hat{hd} - \hat{s} \quad \text{e} \quad \hat{hs1} = \hat{hd} - \hat{s}$$

Alamy Filho (2002) utilizou-se de uma abordagem alternativa utilizando-se de avaliação das funções do poço (W) e cálculo dos rebaixamentos totais pela teoria da superposição de efeitos.

Pela análise preliminar pode-se especular um contínuo rebaixamento do nível estático de 1994 a 2000 no poço 109 (Fig. 71 – as barras verticais representam a distribuição da cota altimétrica do nível estático). Em triângulo preto para cima têm-se os dados fiáveis de medida do nível dinâmico, em triângulo azul para baixo sua estimativa pela regressão com o respectivo intervalo de confiança. Em círculo vermelho a estimativa do nível estático e em rosa a diferença entre o nível dinâmico e o rebaixamento. Em preto a função de densidade probabilidade do dado *soft*.



**Fig. 71:** Regressão entre a cota altimétrica do nível dinâmico (azul) e estático (vermelho)

Foram gerados arquivos para os dados fiáveis, incluindo 52 medidas dos níveis estáticos de 44 poços operados pelo DAERP, e para os dados soft, 968 médias e variâncias de 45 poços geradas pela regressão não-linear de 4 modelos distintos.

Para a obtenção dos dados *soft*, após o ajuste da regressão, para os poços que tiveram convergência pelo método Gauss-Newton, calculou-se o rebaixamento e então o nível estático estimado ( $\hat{h}_s$ ) pela diferença do nível dinâmico ( $\hat{h}_d$ ) e do rebaixamento ( $s$ ). Com o valor estimado e o intervalo de confiança calculou-se a média e variância dos dados *soft*, resultando numa distribuição gaussiana.

Para exemplificar o resultado da análise, abaixo são reproduzidos os dados para o poço 3 (no distrito de Bonfim Paulista):

-----  
 Regressao para o poco # 3  
 -----

Numero de medidas: 18

$$\hat{y} = b1 + b2*t + b3*Q$$

PARAMETROS estimados para Regressao e Intervalo de Confianca:

5.796885e+003	4.013198e+003	7.580573e+003
-7.250146e-003	-9.695178e-003	-4.805115e-003
-2.860539e-002	-7.294654e-002	1.573576e-002
1.000000e+000	-3.865451e+008	3.865451e+008

Teste de Hipotese para  $H_0: CND=CND^{\wedge}$  e  $H_1: CND \neq CND^{\wedge}$ :  
 $p=0.9874$ ,  $h=0$ ,  $\alpha=0.05$  and  $i.c.=95\%$

Estimativa de CND:

CND	CND <sup>^</sup>	i.c.	CNE <sup>^1</sup>	CNE <sup>^2</sup>	s <sup>^</sup>	tempo	vazao
509.55	511.33	2.64	515.31	513.53	-3.98	04-Jul-1994	139.00
511.10	511.91	2.59	515.09	514.28	-3.18	03-Aug-1994	111.00
508.63	510.02	2.25	513.93	512.54	-3.91	10-Jan-1995	136.80
511.17	509.73	2.00	512.99	514.43	-3.26	19-May-1995	114.00
509.20	509.01	1.88	512.70	512.88	-3.68	29-Jun-1995	128.71
508.88	508.07	1.71	511.83	512.64	-3.76	26-Oct-1995	131.38
509.53	506.96	1.47	510.62	513.19	-3.66	10-Apr-1996	128.00
507.60	506.49	1.43	510.20	511.31	-3.71	07-Jun-1996	129.84
507.96	505.79	1.33	509.24	511.41	-3.45	18-Oct-1996	120.45
507.80	504.76	2.05	507.28	510.32	-2.52	15-Jul-1997	88.14
499.89	506.01	3.76	507.25	501.13	-1.24	19-Jul-1997	43.32
500.62	502.34	2.16	506.86	505.14	-4.52	11-Sep-1997	158.00
499.98	501.93	2.22	506.45	504.50	-4.52	06-Nov-1997	158.16
507.35	503.77	2.86	505.74	509.32	-1.97	12-Feb-1998	68.84
500.32	500.70	2.22	504.98	504.60	-4.28	28-May-1998	149.73
501.35	500.78	2.01	504.19	504.76	-3.41	14-Sep-1998	119.33
498.93	499.86	2.24	503.79	502.85	-3.92	09-Nov-1998	137.14
498.53	498.92	2.50	502.87	502.48	-3.95	15-Mar-1999	138.18

Verificando modelo para CNE conhecida:

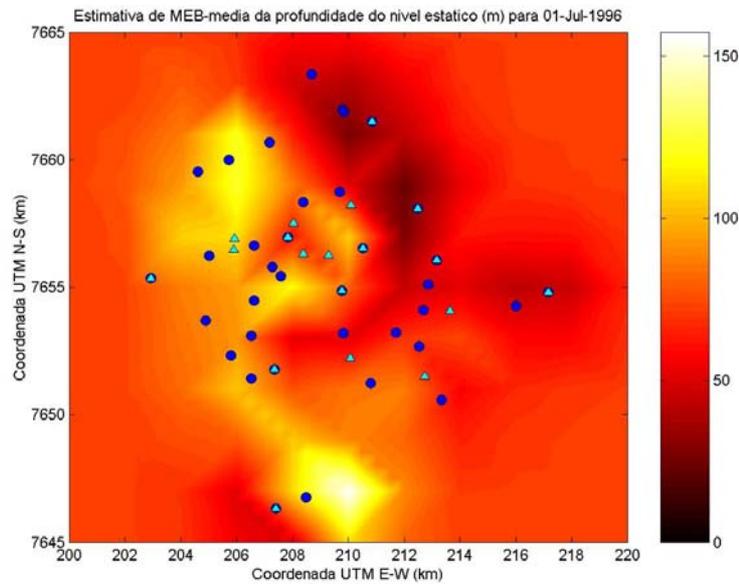
CNE	CNE <sup>^</sup>	CND	tempo	vazao
520.87	515.70	58.31	10-May-1994	204.00
520.85	511.84	51.12	25-Oct-1995	131.18

### 4.3. Predição espaço-temporal

Os dados utilizados são pontos fiáveis (dados *hard*) de medida da cota altimétrica do nível estático e dados *soft* dessa variável, no formato de dado probabilístico, definido por uma função gaussiana (expressa pela média e covariância momentos estatísticos). O estimador utilizado foi a média condicional.

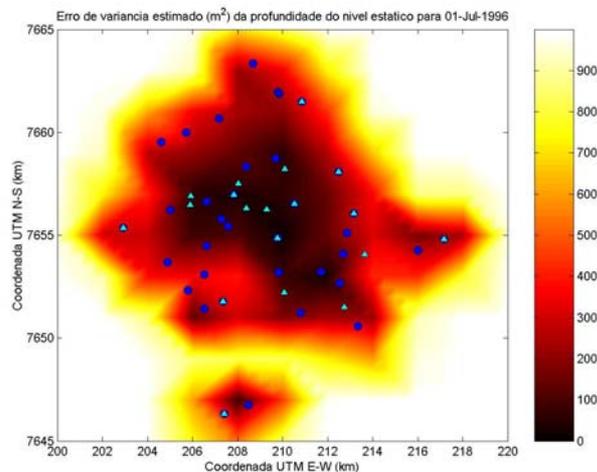
O número máximo de dados *hard* definido para cada ponto a ser estimado foi de 6 pontos e de dados *soft* 2, pelo tempo de processamento ser exponencial com o número de dados do tipo *soft*. O raio da elipse de procura para a estimativa foi de 10 km e 2 anos.

Na figura seguinte (Fig. 72) é apresentada a estimativa pelo método de MEB para a variável profundidade do nível estático, com dados fiáveis (triângulo ciano) e *soft* (círculo azul) para 01-Julho-1996 e seu respectivo mapa de variância (Fig. 73).



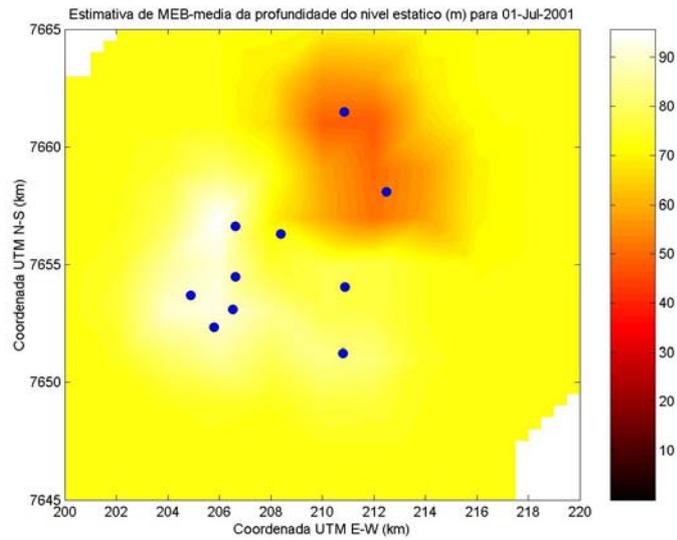
**Fig. 72:** Mapa da profundidade de NE para 01-Jul-1996

No mapa de erro de variância obtém-se valor zero para dados fiáveis na data da estimativa, porém se o ponto utilizado na estimativa for do tipo *soft*, indicando uma incerteza à sua medida, ou dado fiável medido em outra data que não a da estimativa, a variância não será de zero.

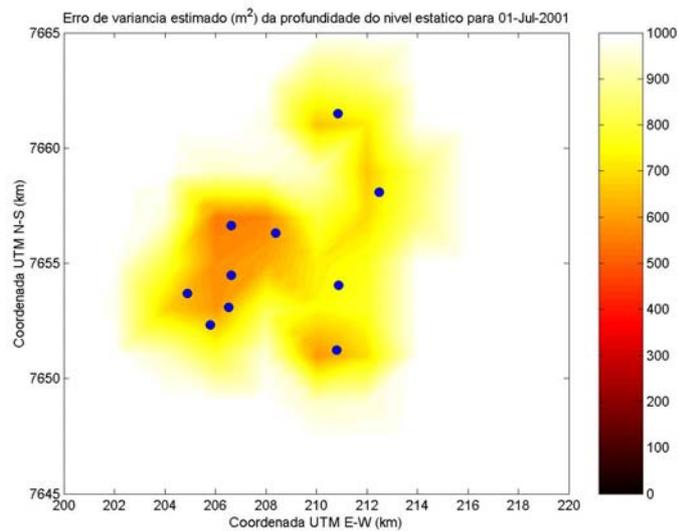


**Fig. 73:** Mapa de variância da profundidade de NE para 01-Jul-1996

Na figura seguinte (Fig. 74) é apresentada a estimativa pelo método de MEB para a variável de profundidade do nível estático, com dados fiáveis (triângulo ciano) e *soft* (círculo azul) para 01-Julho-2001 e seu respectivo mapa de variância (Fig. 75).

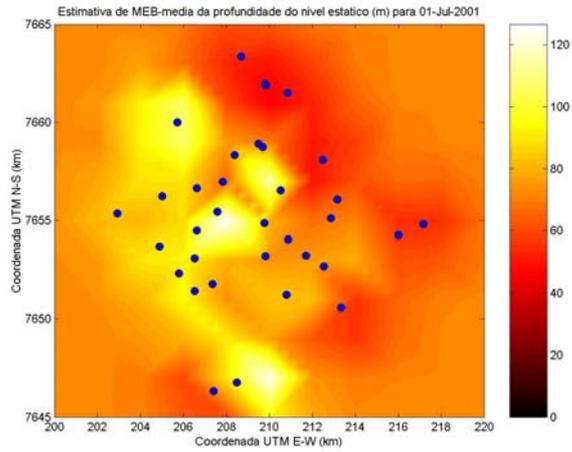


**Fig. 74:** Mapa da profundidade de NE para 01-Jul-2001

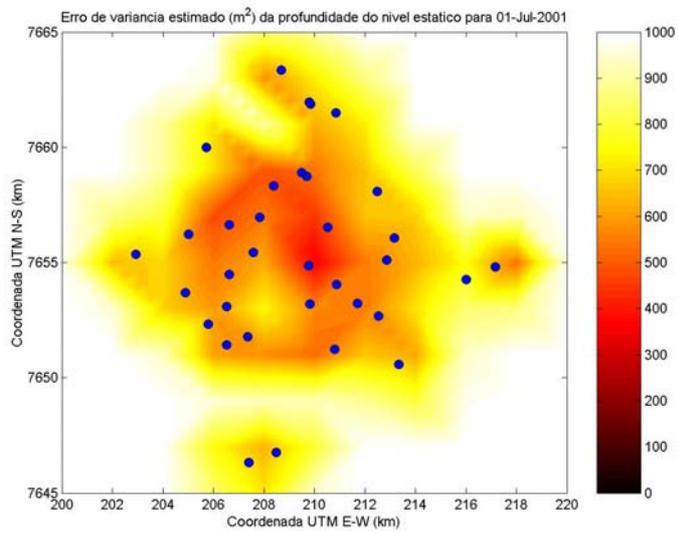


**Fig. 75:** Mapa de variância da profundidade de NE para 01-Jul-2001

Na situação anterior existe um número reduzido de pontos para a estimativa no dia 1<sup>o</sup> de julho de 2001 com um raio de procura de 2 anos, incorporando dados (*hard* e *soft*) de julho de 1999 a julho de 2003, com um raio de procura de 1095,75 dias (ou 3 anos) o resultado é melhor pois se incorporam dados de julho de 1998 a julho de 2004 (Figs. 76 e 77) e em 1998 o número de dados é bem maior.



**Fig. 76:** Mapa da profundidade de NE para 01-Jul-2001 com maior raio de procura



**Fig. 77:** Mapa de variância da profundidade de NE para 01-Jul-2001 com maior raio de procura

## **VI. CONCLUSÕES**

### **1. Aspectos da Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos**

Este trabalho traduz uma preocupação ainda incipiente com os recursos hídricos subterrâneos sob o ponto de vista quantitativo, principalmente quando se fala do Sistema Aquífero Guarani, que parecer ser inesgotável e por isso não sendo considerado um recurso escasso a ser adequadamente gerido. O foco principal aqui é a exploração intensiva local do aquífero em Ribeirão Preto (SP), que pode apresentar em longo prazo um processo de sobreexploração.

Baseado na caracterização da área de estudo e comentários de Margat (1992), a sobreexploração deve ser principalmente avaliada com base no critério físico, hidráulico, qualitativo e ambiental pelo ponto de vista do gestor dos recursos hídricos, no caso de Ribeirão Preto, pela ANA, DAEE, DNPM, CETESB e DAERP (em parte), e com base no critério sócio-econômico e da legislação ambiental pelo ponto de vista do operador (DAERP) e outros usuários (indústrias, empresas e usuários domésticos).

O ponto de vista dos órgãos gestores favorece o critério de não-equilíbrio (excesso de demanda em relação ao abastecimento) e o ponto de vista do operador (DAERP) e outros usuários foca essencialmente a natureza indesejável e inaceitável das conseqüências da exploração das águas subterrâneas.

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (CBH-Pardo) tem um papel imprescindível na gestão dos recursos hídricos da região, mas é preciso que disponha de um corpo consultivo que emita pareceres não enviesados e que tenha uma real dimensão da importância dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

No caso de Ribeirão Preto, uma cidade com alto IDH, um adensamento população ainda crescente e uma industrialização, comércio e agronegócios que buscam por novos espaços (cf. item III.2. Aspectos Históricos e Econômicos), tem-se uma expectativa de maior demanda por água, dificultando a implementação de uma adequada estratégia de preservação dos recursos hídricos subterrâneos.

É necessário chamar a atenção, no entanto, para os problemas de mudança de fluxo das águas subterrâneas, que somente pode ser visualizada com um adequado levantamento e cadastramento dos poços (inclusive clandestinos), coleta de informações e monitoramento da superfície potenciométrica por piezômetros e modelagem espaço-temporal dessa superfície potenciométrica. Essa mudança de fluxo deve ser decorrente

da depleção local do aquífero, promovendo maiores gradientes hidráulicos e redefinindo divisores de água subterrânea. Assim, as águas poluídas do rio Pardo e o chorume do “lixão de Serrana” podem ser mobilizados pelo rebaixamento da superfície potenciométrica na região central da cidade de Ribeirão Preto e alimentar o aquífero sob a cidade, onde se encontram os poços do DAERP para abastecimento público, degradando a qualidade das águas subterrâneas e causando, inclusive, sendo risco potencial para problemas epidemiológicos decorrentes de doenças de veiculação hídrica.

Por se encontrar numa região de borda de aquífero, com características de semi-confinamento, os efeitos provocados pelo uso e ocupação no município de Ribeirão Preto podem demorar a ser sentidos regionalmente, dadas as dimensões do Sistema Aquífero Guarani e a alta inércia na região, necessitando de um longo período de re-equilíbrio, demonstrando a baixa resiliência do aquífero para porções mais afastadas.

Por ser composto essencialmente por águas juvenis e de origem meteórica (cf. GALLO; SINELLI, 1980), o clima exerce forte influência sobre a recarga do aquífero e na flutuação do nível d'água, daí a grande importância da adequada gestão da porção central e nordeste do município. O governo local vai ao encontro do problema impondo restrições severas à ocupação das áreas de afloramento dos arenitos Botucatu/Pirambóia, como previsto no Projeto de Lei do Código Municipal do Meio Ambiente, porém esta região deveria ser definida como Área de Máxima Proteção, por ser área de recarga local do Sistema Aquífero Guarani, uma região altamente vulnerável (FERREIRA, S.T., 1996) à contaminação numa situação que constitui depósito de águas essencial ao abastecimento público (cf. Art. 20 da Lei Estadual 6.134/88 e Decreto 32.955/91), sendo no mínimo incoerente por parte do governo municipal que essa região seja definida como área de expansão urbana. A porção central já apresentou problemas de poluição por cloretos e nitratos (informação oral do DAERP) e deve ser considerada uma área vulnerável (LANDIM et al., 1973), ainda que pouco possa ser feito quanto ao uso e ocupação nessa região.

A exploração intensiva dos recursos hídricos subterrâneos, que é evidente em Ribeirão Preto, deve ser gerida com destaque sob o ponto de vista legal, sendo de competência do Poder Público instituir áreas de proteção às águas subterrâneas para sua preservação e conservação (Artigo 9º da Lei Estadual 6.134/88), sendo extremamente importante a aprovação do Projeto de Lei Complementar do Código Municipal do Meio Ambiente, como instrumento adequado a uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos que vise a sustentabilidade.

A sobreexploração, ou minimamente a exploração intensiva, como pode se caracterizar a condição do aquífero em Ribeirão Preto, se encarada como uma situação de déficit hídrico, permite ao DAEE e à CETESB proibir novas captações e impor restrições às já existentes (Art. 22 da mesma lei anterior). Outra questão a ser debatida, sob o ponto de vista técnico-jurídico e em audiência pública, é que se a exploração intensiva que ocorre em Ribeirão Preto, comprometer e suspender o abastecimento de água, ainda que temporariamente, pode-se ou não configurar o fato como um crime ambiental (cf. Art. 54, §2º, III, da Lei Federal 9.605/98), passível das sanções devidas.

Algumas alternativas aos problemas encontrados no município seriam:

- ✓ o controle efetivo da outorga de licenças de perfuração, concessões de exploração do aquífero (cf. Lei 9.034/94, Decreto 41.258/96, Decreto Municipal 264/88, Lei Complementar 204/92), bem como licença ambiental (Projeto de Lei Complementar do Código do Meio Ambiente), considerando aspectos técnico-científicos, mas também sócio-econômicos, ambientais e legais;
- ✓ a realocação de poços e locação de novos poços para áreas mais afastadas do centro urbano, visando diminuir a interferência do cone de depleção dos poços e o progressivo rebaixamento da superfície potenciométrica, podendo levar à conseqüências indesejáveis, já identificadas ou não;
- ✓ o recadastramento de poços (cf. Lei 9.034/94) e a cobrança pela abstração da água, com a instalação de hidrômetros (cf. Art. 117, IV, do Projeto de Lei Complementar do Código Municipal de Meio Ambiente) em todos os poços, com valor diferenciado para cada tipo de usuário;
- ✓ a recarga artificial do aquífero, com o desenvolvimento de estudos que comprovem a sua conveniência técnica, econômica e sanitária e a preservação da qualidade das águas subterrâneas (cf. Art. 43, da Seção V – Da Recarga Artificial, do Decreto 32.955/91); e
- ✓ a educação ambiental, nos aspectos de informação, formação, conscientização e sensibilização para o problema do uso dos recursos hídricos, para uma sociedade sustentável e participativa, contando com o efetivo compromisso da sociedade civil organizada, empresas, o terceiro setor e a administração pública.

## **2. Mapeamento Espaço-Temporal**

A Máxima Entropia Bayesiana se apresenta como mais uma de análise espacial em uma fase de transição entre a modelagem espacial ou temporal clássica, com a

incorporação de informações fiáveis (dado *hard*) e conhecimento geral único (variograma ou equações físicas), para uma nova fase com modelagem espaço-temporal, com incorporação de informação fiável e *soft*, de diversas fontes de conhecimento e um conhecimento geral integrado que considera não somente objetividade, mas também a subjetividade (a intuição do *expert*) sobre o fenômeno.

Sua maior utilidade talvez resida no fato de permitir diagnosticar um fenômeno e também prognosticar (prever sua evolução), acessando incertezas sobre o processo de interesse.

Para uma síntese da MEB são tecidos alguns comentários. Essa metodologia permite a combinação das abordagens determinística (e.g., equações de fluxo, dispersão de contaminantes etc.) e estocástica (e.g., (co)variogramas) como Conhecimento Geral ( $\mathcal{G}$ ), e a incorporação dados do tipo *hard* (medido, conhecido com 100% de certeza) e *soft* (incertos, expressos na forma de intervalos, probabilidades e como informação no ponto a ser estimado), perfazendo o Conhecimento Específico ( $\mathcal{S}$ ), que, por uma condicionalização bayesiana dos conhecimento específico ao geral, resulta no Conhecimento Físico ( $\mathcal{K}$ ).

Esse conhecimento físico ( $\mathcal{K}$ ), expresso como uma função de densidade de probabilidade a posteriori ( $f_{\mathcal{K}}$ ) é usado para se fazer a estimativa. A forma do estimador também pode ser a mais diversa, como a moda, média condicional, mediana ou outro percentil qualquer. A estimativa pode ser pontual ou multi-pontual, além de trabalhar no *continuum* espaço-temporal, e não somente em na dimensão espacial ou temporal. A MEB admite fenômenos com comportamento não-homogêneos e não-estacionários, não exigindo uma normalidade da distribuição estatística, assumindo momentos estatísticos de ordem superior a 2, porém ainda é matemática e computacionalmente mais complicado assumir esses padrões.

No caso desse trabalho foi assumida estacionariedade de 2<sup>a</sup> ordem, considerando somente os dois primeiros momentos estatísticos (média e covariância), além de somente o covariograma como Conhecimento Geral ( $\mathcal{G}$ ), porém, espaço-temporal. Outro diferencial foi considerar os dados *hard* e *soft*, estes obtidos a partir de medidas do nível dinâmico e vazão por uma regressão. O estimador pontual escolhido foi o de média condicional, buscando os resultados mais parecidos com a krigagem ordinária porém no tempo.

Os mapas de profundidade obtidos pela Máxima Entropia Bayesiana evidenciam um progressivo rebaixamento da superfície potenciométrica do Sistema Aquífero

Guarani na cidade de Ribeirão Preto, sendo indicativo de uma exploração intensiva dos recursos hídricos subterrâneos, sugerindo a instalação de um processo que pode vir a ser classificado como de sobreexploração e que se não for gerido adequadamente pelo Poder Público e a Sociedade poderá apresentar severos problemas e interrupções no abastecimento público de água, tanto na quantidade demandada como na qualidade, na medida em que mude o fluxo das águas subterrâneas. Assim, as águas do aquífero podem não resultar somente da precipitação pluviométrica, mas também de recarga pelas águas de baixa qualidade do Rio Pardo, além de mobilizar águas poluídas por chorumes e agrotóxicos na região limítrofe da cidade.

Deve ser chamada a atenção para a importância dos dados na modelagem de problemas reais. A modelagem tem por fim interpretar a natureza e processos antrópicos que a modificam. Do fenômeno em estudo são obtidas amostras que se transformam em dados e informações para a sua modelagem. A quantidade de dados é irrelevante quando se considera sua representatividade, sua qualidade. Antes ter um “banco de dados”, menor, porém organizado, que um grande “bando de dados” não confiáveis, imprecisos e pouco acurados de forma a não permitir uma modelagem suficientemente adequada.

A incorporação de dados *site-specific* do tipo *soft*, de forma muito fácil pela Máxima Entropia Bayesiana, não representa uma vantagem considerável quando os dados do tipo *hard*, os quais deveriam representar uma probabilidade de 100% de certeza no seu valor, são questionáveis.

A instalação de piezômetros e um programa de monitoramento adequado deveriam ser implantados pelo Poder Público ou pelo operador, sendo uma medida pouco onerosa ao município quando comparada às vantagens advindas da manutenção desse programa.

Dados não representativos geram previsões ruins e enviesadas, dados representativos permitem previsões boas, adequadas e razoáveis em relação ao fenômeno real.

A metodologia de Máxima Entropia Bayesiana é uma tecnologia que ainda está buscando uma definição e não possui um programa com interface amigável para sua aplicação imediata. Para um uso operacional da MEB faz-se necessário a elaboração de um manual que explique a teoria e a implementação da metodologia passo-a-passo.

### 3. Dificuldades no desenvolvimento do projeto

A principal dificuldade encontrada no desenvolvimento desse trabalho é a falta de um adequado monitoramento dos níveis potenciométricos do aquífero. Primeiramente, são escassos os dados de medida do nível estático, sendo que alguns deles não refletem realmente o nível estático, pois foram medidos durante a recuperação do nível quando da troca ou manutenção das bombas dos poços. Segundo ponto importante, e mais relacionado à modelagem proposta neste trabalho, é o fato de que algumas medidas do DAERP não possuem a data da medida ou está incompleta, constando somente o mês ou o ano, bem como o banco de dados da CPRM (SIAGAS), descartando-se, então, esses dados.

O uso da capacidade específica para se ter uma estimativa do nível estático apresentou-se como um problema não esperado pela mudança de tecnologia empregada na construção dos poços e perdas de cargas ocasionadas, levando, mais recentemente, à necessidade de se ter poços de produção com maior diâmetro.

Por ser uma metodologia recente ainda não existe uma interface amigável para a aplicação da Máxima Entropia Bayesiana (MEB), desenvolvida para MATLAB® (Mathworks, Inc.), o que exigiu certo conhecimento de programação em MATLAB® para implementar as rotinas de MEB e também obter dados *soft* a partir de medidas do nível dinâmico e vazão dos poços.

### 3. Sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento natural da abordagem hidrogeológica de mapeamento da superfície potenciométrica é a aplicação de equações de fluxo (2-D e 3-D) como Conhecimento Geral -  $\mathcal{G}$  (SERRE, 1999; KOLOVOS, 2001) incorporando, assim, a abordagem determinística à modelagem do aquífero na região. A simulação numérica do fluxo da água subterrânea é importante para o planejamento urbano e gestão de recursos hídricos. É uma abordagem determinística, diferente da proposta desse trabalho, porém, subsidia planos para locação de novos poços, definição de perímetro de proteção de poços e mananciais e estudo de fluxo para aplicação em contaminação de águas subterrâneas. Sua incorporação à modelagem por Máxima Entropia Bayesiana pode trazer relevantes contribuições. Nesses modelos podem ainda ser incorporadas a recarga vertical do aquífero e as interferências entre poços.

Outro passo é trabalhar com um modelo de estrutura espaço-temporal não-separado (CRISTAKOS, 2000; DE IACO et al., 2002), inclusive considerando

distribuição não-gaussianas (HRISTOPULOS; CHRISTAKOS, 2001) e funções aleatórias intrínsecas (S/TRF- $v/\mu$ , CHRISTAKOS, 2000; YEVJEVICH, 1993) para casos de não-homogeneidade e não-estacionariedade.

Pode-se ainda incorporar variáveis auxiliares para um mapeamento multi-pontual da superfície potenciométrica, no campo multivariado (CHRISTAKOS, 2000), tal como levantamentos geofísicos (e.g., sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico) e a superfície topográfica para tornar os mapas mais precisos e acurados.

Para a avaliação da flutuação na superfície potenciométrica em Ribeirão Preto devem ser levados em conta mapas históricos da cidade, com indicação de nascentes, surgências, áreas alagadas, além de mapas hidrogeológicos mais antigos.

Tecnicamente sugere-se um monitoramento sistemático do nível estático dos poços, ao menos anual, para atualização do modelo de estrutura espacial e acompanhamento da flutuação da superfície potenciométrica, e possibilitando a avaliação da interferência da sazonalidade climática no nível estático.

Os mapas da superfície potenciométrica gerados nesse trabalho podem ser utilizados como mapas temáticos em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para estudos ambientais, tal como locação de áreas para aterros sanitários, zoneamento ambiental entre outras aplicações, ou ser informação de entrada para modelos de simulação de fluxo e transporte de partículas.

## VII. REFERÊNCIA

### 1. Aspectos Gerais, Geografia, Dados Estatísticos e Mapas

BURIN, R.H. *Avaliação temporal de Perdas de Solo na bacia hidrográfica do ribeirão Preto (SP) utilizando geoprocessamento*. 1999. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geociências na Área de Concentração de Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. (orient. Profa. Dra. Paulina Setti Riedel).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Levantamento semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula Ribeirão Preto, SF. 23-V-C-I*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, São Paulo: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 1983. 1 mapa, color.. Escala 1:100.000.

FRANCISCO, F.C. *Agricultura e meio ambiente: um estudo sobre a sustentabilidade ambiental de sistemas agrícolas na região de Ribeirão Preto (SP)*. 1996. 400 f. Tese (Doutorado em Geografia na Área de Concentração em Organização do Espaço) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. (orient. Profa. Dra. Maria Juraci Zani dos Santos).

HOUAISS, A. (Ed.). *Dicionário Eletrônico Houaiss da Língua Portuguesa*. versão 1.0. [s.l.]: Objetiva, 2001.

IAC. Instituto Agrônomo de Campinas. *Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Ribeirão Preto*. Campinas: IAC, 1987. 1 mapa, color.. Escala 1:100.000. (publicado no *Boletim Científico do IAC*, v.7., p.57-73).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2001. Censo Demográfico 2000: sinopse preliminar. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/ibge/estatistica/populacao/censo2000>. Acesso em: 10 dez. 2001.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Apresenta diversos dados estatísticos e geocientíficos do Brasil. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 fev. 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Folha Topográfica SF. 23-V-C-I-2 – Serrana*. Rio de Janeiro: IBGE, 1971a. 1 mapa, color.. Escala 1:50.000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Folha Topográfica SF. 23-V-C-I-3 – Bonfim Paulista*. Rio de Janeiro: IBGE, 1971b. 1 mapa, color.. Escala 1:50.000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Folha Topográfica SF. 23-V-C-I-4 – Cravinhos*. Rio de Janeiro: IBGE, 1971c. 1 mapa, color.. Escala 1:50.000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Folha Topográfica SF. 22-X-DC-III-4 – Guariba*. Rio de Janeiro: IBGE, 1971d. 1 mapa, color.. Escala 1:50.000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Folha Topográfica SF. 23-V-C-I-1 – Ribeirão Preto*. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 1 mapa, color.. Escala 1:50.000.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT/Divisão de Minas e Geologia Aplicada,

Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1981a. 2 v. color..

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1994a. *Carta Geotécnica do Estado de São Paulo – Folha Ribeirão Preto*. São Paulo: IPT, 1994a. 2v. Escala 1:500.000. (Publicação IPT 2089).

LAROUSSE. *Grande Enciclopédia Larrouse Cultural*. São Paulo: Nova Cultural, 1998. v. 20, p.5046-5047. (Ribeirão Preto).

PNUD. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. *Novo Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil*. Apresenta tabelas e relatórios sobre o desenvolvimento humano no Brasil. Disponível em: <<http://www.undp.org.br/IDHM-BR%20Atlas%20Webpage/index.asp>>. Acesso em: 12 fev. 2003.

RIBEIRÃO PRETO. SEPLAN. Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental. Página oficial da secretaria, disponibilizando o Plano Diretor de Ribeirão Preto. Disponível em: <<http://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/PRINCIPALN.ASP?pagina=/SPLAN/I28PRINCIPAL.HTM>>. Acesso em: 12 fev. 2003.

RIBEIRÃO PRETO. SEPLAN. Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental. *Mapa Base de Ribeirão Preto*. Ribeirão Preto: SEPLAN, 1999. Arquivo AutoCAD.

RIBEIRÃO PRETO. SEPLAN. Secretaria de Planejamento e Gestão Ambiental. *Mapa de Zoneamento Ambiental de Ribeirão Preto*. Ribeirão Preto: SEPLAN, 1994. 1 mapa. Escala 1:50.000.

ROSS, J.L.S; MOROZ, I.C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: FFLCH/USP, IPT, FAPESP, 1997. 2 v. 64 p. (1 Mapa, escala 1:500.000).

SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Apresenta diversos dados estatísticos sobre o Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br>>. Acesso em: 12 fev. 2003.

## 2. Geologia

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R; MELLO, M.S.; BISTRICHI, C.A. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT, 1981. color., 2v.. Escala 1:500.000. (Monografias 6).

BRIGHETTI, J.M.; CAETANO-CHANG, M.R. Feições características de depósitos de interdunas eólicas em sedimentitos da Formação Pirambóia na região de Rio Claro (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. *Boletim de Resumos Expandidos...* São Paulo: SBG, 1992. v.2, p.510-511. (Sessões Temáticas).

CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T. Bacia do Paraná: formações Pirambóia e Botucatu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. *Roteiro de Excursão...* São Paulo: SBG, 1992. v.2, 19 p.

DAEE; UNESP. Departamento de Águas e Energia Elétrica; Universidade Estadual Paulista. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo – SF. 23-V-C – Ribeirão Preto*. 1 ed. São Paulo: DAEE, UNESP, 1982. Diversos mapas, color.. Escala 1:250.000. (Convênio DAEE-UNESP).

DONATTI, L.M. *Faciologia, proveniência e paleogeografia das Formações Pirambóia e Botucatu no Estado do Paraná*. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. (orient. Prof. Dr. Paulo César

Fonseca Giannini).

FACCINCANI, E.M.; HASUI, Y.; SANTOS, M.; JIMENEZ-RUEDA, J.R.; MATTOS, J.T. Influência das estruturas e tectônica na gênese e evolução das boçorocas da região de São Pedro, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. *Boletim de Resumos Expandidos...* Florianópolis: SBG, DNPM, CPRM, 1994. v.2, p.278-279.

FACCINI, U.F. Estratigrafia de seqüências aplicada a depósitos continentais a partir da análise de afloramentos: progressos e limitações, um estudo de caso do intervalo Permiano Superior-Mesozóico da borda SE da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 3., 1997, Barra do Garças. *Bol. de Res....* Rio de Janeiro: UERJ, 1997. p.32-33. (05 a 11 de outubro de 1997).

FONTES, A.T.; Souza, M.P. Diagnósticos e cenários ambientais utilizando SIG na conservação de recursos hídricos: o caso de Ribeirão Preto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997, Vitória. *Anais...* Vitória: ABRH, 1997. v.1, p.651-658.

FULFARO, V.J.; SAAD, A.R; PERINOTTO, J.A.J.; ETCHBEHERE, M.L.C. Paraná Basin: mineral resource potentials in Brazil, Uruguay, and Paraguay. *International Geology Review*, Lawrence, v.39, p.703-722, 1997.

FULFARO, V.J.; SAAD, A.R; SANTOS, M.V.; VIANNA, R.B. Compartimentação e evolução da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.12, n.4, p.590-611, 1982.

GOMES, R.L.; RODRIGUES, J.E. Reconhecimento dos diferentes tipos de derrames basálticos segundo a compartimentação entablamento-colunata em algumas pedreiras no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 9., 1999, São Pedro. *Boletim...* Rio Claro: ABGE, UNESP, 1999. 1 CD-ROM. (Tema 5 – Materiais de Construção, p.57-73.).

HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZÓICA CONTINENTAL NO SUDESTE BRASILEIRO, 1., 1990, Belo Horizonte. *Boletim SBG/MG...* Belo Horizonte: SBG, 1990. v.11, p.1-31.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT/Divisão de Geologia, 1981b. 2 v. 1 mapa, color.. (Monografia, 6).

LANDIM, P.M.B.; SOARES, P.C.; GAMA-JÚNIOR, E.G. *Estratigrafia do nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná*. Rio Claro: Depto. de Geologia Geral e Aplicada, IGCE/UNESP, 1980. 77 p. Curso de Especialização - Convênio IPT/UNESP.

MANTOVANI, M.S.M.; WILDNER, W.; JUCHEM, P.L. Paraná Basin Magmatism, Stratigraphy and Mineralization (Southern Brazil). In: INTERNACIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., 2000, Rio de Janeiro. *Pre-Congress Field Trip Guide...* Rio de Janeiro: IUGS, SBG, 2000. 63p. (August 6-17, 2000, Field Trip Bft 01).

MILANI, E.J. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental*. 1997. 255 f. Tese (Doutorado em Geociências na Área de Concentração de Estratigrafia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grando do Sul, Porto Alegre. 2v.

MILANI, E.J.; FACCINI, U.F.; SCHERER, C.M.; ARAÚJO, L.M.; CUPERTINO, J.A.

- Sequences and stratigraphic hierarchy of Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. *Boletim IG-USP*, São Paulo, v.29, p.125-173, 1998. Série Científica.
- NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F.; AGLINSKAS, R.S. Proposição dos membros Palmas e Chapecó como unidades litoestratigráficas da formação Serra Geral. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4., 1995, Águas de São Pedro. *Boletim de Resumos...* Rio Claro: UNESP, SBG, 1995. p.73.
- NOWATZKI, C.H.; KERN, H.P. The eolianites between Sanga do Cabral and Botucatu Formations in Rio Grande do Sul State, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v.72, n.2, p.247-256, jun. 2000.
- PENALVA, F.; SOARES, P.C.; WERNICK, E.; SINELLI, O.; SOUZA, A.; CASTRO, P.R.M. Geologia da Folha de Ribeirão Preto (São Paulo). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. *Resumo das comunicações...* Aracaju: SBG, 1973. p.119-121.
- SCHERER, C.M.S. Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin. *Sedimentary Geology*, Amsterdam, v.137, p.63-84, 2000.
- SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: SBG, 1974. v. 1, p.41-65.
- SINELLI, O. Considerações gerais sobre a tectônica no Município de Ribeirão Preto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, 1971b, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG, 1971b. v. 2, p.145-151.
- SINELLI, O.; DAVINO, A. Estudo do comportamento tectônico dos basaltos da região de Ribeirão Preto por métodos geofísicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. *Resumo das comunicações...* Aracaju: SBG, 1973. p.192-193.
- SOARES, P.C. Divisão estratigráfica do mesozóico no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v.5, p.229-251, 1975.
- SOARES, P.C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: SBG, 1974. v. 4, p.107-121.
- SOARES, P.C. *Mesozóico gonduânico no Estado de São Paulo*. 1973. 260 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geologia e Mineralogia, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Rio Claro.
- SOARES, P.C. Nota sobre a tectônica moderna na Depressão Periférica Paulista. *Notícia Geomorfológica*, Campinas, v.13, n.25, p.75-81, 1973.
- SOARES, P.C.; BAGGIO, S.B. Formação Botucatu: geometria, fácies elétricas e indicadores paleotectônicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. *Boletim de Resumos Expandidos...* Florianópolis: SBG, 1994. v.1, p.96-97 (Simpósio SM-04 – Bacia do Paraná).
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B. Aspectos regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. *Anais...* Aracaju: SBG, 1973. v.1, p.243-256.
- SOARES, P.C.; SINELLI, O.; PENALVA, F.; WERNICK, E.; SOUZA, A.; CASTRO,

P.R.M. Geologia do nordeste do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. *Anais...* Aracaju: SBG, 1973. v.1, p.209-228.

WERNICK, E.; SINELLI, O. Análise estrutural em Geomorfologia. *Notícias Geomorfológicas*, Campinas, v.10, n.20, p.39-54, dez. 1970.

WU, F.T.; CAETANO-CHANG, M.R. Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo. *Revista IG*, São Paulo, v.13, n.1, p.58-68. jan./jun. 1992.

ZALÁN, P.V.; CONCEIÇÃO, J.C.I.; ASTOLFI, M.A.M.; APPI, V.T.; WOLFF, S.; VIEIRA, I.S.; MARQUES, A. Estilos estruturais relacionados a intrusões magmáticas em rochas sedimentares. *Boletim Técnico da Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.28, p.211-230, 1985.

ZUQUETTE, L.V.; PEJON, O.J.; SINELLI, O.; GANDOLFI, N. Carta de zoneamento geotécnico específico para disposição de resíduos da reigão de Ribeirão Preto - SP. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 3., 1995, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto: [s.n.], 1995. v.2, p.535-548

ZUQUETTE, L.V.; PEJON, O.J.; SINELLI, O.; GANDOLFI, N. Engineering geological zoning mapping of the Ribeirão Preto city (Brazil) at 1:25,000 scale. In: INTERNATIONAL IAEG CONGRESS, 7., 1994, Lisboa. *Anais...* Rotterdam: Balkema, 1994. v.2, p.1169-1175. ISBN 90-5410-503-8.

### 3. Sistema Aquífero Guarani e Recursos Hídricos

ALAMY FILHO, J.E. *Determinação de rebaixamento em sistemas de poços tubulares através da construção e aplicação de programa específico*. 2002. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. (orient. Prof. Dr. Dante Contin Neto).

ANA. Agência Nacional de Águas. *Regiões Hidrográficas do Brasil: caracterização geral e aspectos prioritários*. Brasília: ANA, mar. 2002. 1 CD-ROM. Edição comemorativa do Dia Mundial da Água - arquivo em PDF.

AZEVEDO, A.A.; ALBUQUERQUE FILHO, J.L. *Capítulo 8 – Águas Subterrâneas*. p.111-130. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (ed.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998. 586 p. ISBN 85-7270-002-1.

BROWN, G. et al. *Recursos hídricos*. Tradução e adaptação de Alvaro Crósta. Campinas: UNICAMP, 2000. 146 p. (The Open University, Os Recursos Físicos da Terra, Bloco 4, parte 1). ISBN 85-268-0440-5.

CAMPOS, H.C.N.S. *Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo*. 1993. 177 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. (orient. Profa. Dra. Maria Szikszay).

CAMPOS, H.C.N.S. Modelación conceptual y matemática del acuífero Guaraní, Cono Sur. *Acta Geologica Leopoldensia*, São Leopoldo, v.23, n.4, p.3-50, 2000. Inclui Mapa hidrogeológico do Aquífero Guarani. Escala 1:2.500.000. (Série Mapas).

CBH-PARDO. Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo. Plano de Bacia e Relatório Zero. Disponível em <[http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh\\_cgi.exe/HPComites?Comite=crh/cbh-pardo](http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh_cgi.exe/HPComites?Comite=crh/cbh-pardo)>. Acesso em: 12 fev. 2003.

CERÓN GARCÍA, J.C. *Hidrogeoquímica del Acuífero del Alto Guadalentín (Murcia)*. Jaén (Espanha): Grupo de Investigaciones en “Recursos Hídricos y Geología Ambiental”, Universidad de Granada; Consejería de Medio Ambiente, Agricultura y Agua de la Región de Murcia; Ayuntamiento de Lorca; Ayuntamiento de Puerto Lumbreras, 276 p, 1997. (Tese de Doutorado - Universidad de Granada). ISBN 84-8499-310-8.

CERVI, M.B.R. *Caracterização do aquífero e dos problemas atuais no abastecimento com água subterrânea no município de Ribeirão Preto*. 1981. 46 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Ecologia) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. (orient. Profa. Lucy Marion Calderini Philadelpho Machado).

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 1978. 188 p.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 1990. 164 p.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo - 1997*. São Paulo: CETESB, 1998a. 289 p. (Série Relatórios).

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo - 1997*. São Paulo: CETESB, 1998b. 106 p. (Série Relatórios).

CUSTODIO, E. Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal*, v.10, n.2, p.254-277, 2002.

CUSTODIO, E. Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. p.3-27. In: SUMMERS, I; VILLAROYA, F.; REBOLLO, L.F. (Ed.) *Selected papers on Aquifer Overexploitation*, Puerto de la Cruz (Tenerife, Spain): IAH, 1992. (Hydrogeology; vol.3 – selected papers: International Congress of the IAH, 23., April 15-19, 1991).

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Água subterrânea: uma riqueza de São Paulo. *Revista Águas e Energia*, p.75-80, abr. 1999.

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Estudo das Águas Subterrâneas – região administrativa 6 – Ribeirão Preto*. São Paulo: Geopesquisadora Tahal, 1974. 2v.

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Estudo de águas subterrâneas no Estado de São Paulo: avaliação preliminar*. São Paulo: DAEE, 1972. 35 p.

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos*. São Paulo: Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras, 2000. 1 CD-ROM.

DAVINO, A.; SINELLI, O.; SOUZA, A.; GONÇALVES, N.M.M. Gravimetria, sondagem elétrica e perfilagem geofísica na pesquisa de água subterrânea em Ribeirão Preto, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Camboriú. *Anais...* Camboriú: SBG, 1980. p.904-914.

FEITOSA, F.A.C.; MANOEL-FILHO, J. (Coord.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. 412 p.

FERREIRA, J.C. Poluição natural de aquíferos por petróleo nas bacias sedimentares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. *Anais...* Salvador:

SBG. v. 3, p.498-499. (Sessão Temática de Hidrogeologia).

FERREIRA, S.T. *Estudo da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto - SP*. 1996. 69 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. (orient. Prof. Dr. Osmar Sinelli).

FILI, M.; ROSA FILHO, E.F.; AUGÉ, M.; MONTAÑO XAVIER, J.; TUJCHNEIDER, O. El Acuífero Guarani: um recurso compartilhado por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (América Del Sur). *Boletín Geológico y Minero*, v.109, n.4, p.389-394, jul./ago. 1998.

FRAGA, C.G. *Introdução ao zoneamento do Sistema Aqüífero Serra Geral no Estado do Paraná*. 1986. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. (orient. Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças).

FREIRE, C.C.; PEREIRA, J.S.; KIRCHHEIN, R.; RIBEIRO, M.M.R.; LANNA, A.E. Aspectos legais da gestão de recursos hídricos subterrâneos no Brasil. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DEL CONOSUR, 2., 1998, Santa Fé (Argentina). Anais... Santa Fé: Instituto Nacional del Agua y del Ambiente, 1998. 1 CD-ROM. Disponível em: <<http://jaildo.chez.tiscali.fr/subter.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2003.

GAIOTO, N. *Rebaixamento do Lençol Freático*. São Carlos: UFSCar, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 1997. 23 p. (Publicação Didática – Reimpressão de 1980).

GALLO, G.; SINELLI, O. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto (SP). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo. v. 10, p.129-140, 1980.

HIRATA, R.C.A.; BASTOS, C.R.A.; ROCHA, G.A. (Coord.). *Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto Geológico, CETESB, 1997. v.1. 144 p. (Série Documentos).

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HIDROGEOLOGISTS CONGRESS ON GROUNDWATER IN THE URBAN ENVIRONMENT, 23., 1997, Nottingham (UK). *Proceedings...* Nottingham: IAH, 1997. (21-27 sep. 1997).

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Risco Potencial de Poluição – Saneamento "in situ"*. São Paulo: IPT, 1994b. 1 mapa, color.. Escala 1:2.000.000. (Publicação IPT 2089).

LANDIM, P.M.B.; SINELLI, O.; CASTRO, P.R.M. Aplicação da análise de tendência em estudos de poluição de aqüíferos subterrâneos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. *Resumo das comunicações...* Aracaju: SBG, 1973. p.240.

LARA, G.F.; ORTIZ, F.G. Feasibility study for the attenuation of groundwater exploitation impacts in the urban area of Aguascalientes, Mexico. In: CHILTON, J. (Ed.). *Groundwater in the urban environment: selected city profiles*. Rotterdam: Balkema, 1999. p.181-187. (Volume 21 - International Contributions to Hydrogeology – volume 2, Proceedings of the XXIII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment, Nottingham, UK, 21-27 sep. 1997).

LEADBEATER, S.G.; BENTLEY, L.; OSBORN, G.; ROBINSON, N. Urban development and groundwater levels in downtown Calgary. In: CHILTON, J. (Ed.). *Groundwater in the urban environment: selected city profiles*. Rotterdam: Balkema, 1999. p.189-194.

(Volume 21 - International Contributions to Hydrogeology – volume 2, Proceedings of the XXIII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment, Nottingham, UK, 21-27 sep. 1997).

LEAL, M.S. *Gestão Ambiental de Recursos Hídricos: princípios e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM, 1998. 176 p.

LEGGET, R.F. Chapter four: Hydrogeology of cities. In: \_\_\_\_\_. *Cities and Geology*. New York: McGraw-Hill, 1973. 624 p.\

LEITE, J.C. ; ZUQUETTE, L.V. Atributos fundamentais à elaboração da carta de susceptibilidade à contaminação e poluição das águas subsuperficiais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8., 1996, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABGE, 1996. v.2, p.647-657. (16 a 19 de setembro).

LLAMAS, M.R. La Surexplotation des aquifères: aspects techniques et institutionnels. *Hydrogéologie*, n.4, p.139-144, 1992.

LOPEZ-CAMACHO Y CAMACHO, B. ; ANGUITA-BARTOLOME, F. La sobreexplotación de acuíferos en España. In: ANGUITA, F. et al. (Eds.). *Curso Internacional de Hidrología Subterránea*. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universitat Politècnica de Catalunya, p.287-296, 1991.

LÓPEZ-GETA, J.A.; FORNÉS-AZCOITI, J.M.; RAMOS-GONZÁLEZ, G.; VILLARROYA-GIL, F. *Las aguas subterráneas: um recurso natural del subsuelo*. [s.l.]: Instituto Geológico y Minero de España, Fundación Marcelino Botín, 2001. 94 p. (Educación Ambiental).

MACHADO, P.A.L. *Direito Ambiental Brasileiro*. 10 ed. São Paulo: Malheiros, 2002. 1038 p. ISBN 85-7420-332-7.

MARGAT, J. Quel est le concept de surexploitation utile à la gestion des eaux souterraines ? *Hydrogéologie*, n.4, p.145-152, 1992a.

MARGAT, J. The over-exploitation of aquifers. p.29-40. In: SUMMERS, I; VILLARROYA, F.; REBOLLO, L.F. (Ed.) *Selected papers on Aquifer Overexploitation*. Puerto de la Cruz (Tenerife, Spain): IAH, 1992b. (Hydrogeology; vol.3 – selected papers: International Congress of the IAH, 23., April 15-19, 1991).

MENG, S.X.; MAYNARD, J.B. Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from the Botucatu aquifer in São Paulo state, Brazil. *Journal of Hydrology*, n.250, p.78-97, 2001.

MENTE, A. Cartografia Hidrogeológica: classificação e utilização de mapas hidrogeológicos. p.175-182. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL-FILHO, J. (Coord.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. 412 p.

MURILLO-DÍAZ, J.M.; DE LA ORDEN-GÓMEZ, J.A.; ARMAYOR-CACHERO, J.L.; CASTAÑO-CASTAÑO, S. *Recarga artificial de acuíferos*. Alicante: Excelentísima Diputación Provincial de Alicante, 1999. 156 p.

OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 582 p., 1998.

PACHOALATO, C.F.P.R. *Caracterização dos líquidos percolados gerados por disposição de lixo urbano em diferentes sistemas de aterramento*. 2000. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. (orient. Prof. Dr.

Carlos Eduardo Blundi).

PETROBRÁS. Petróleo Brasil S.A. *Lixão de Serrana: Caracterização do problema ambiental e proposição de soluções*. [s.l.]: PETROBRÁS, Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), 1997. 91 p. (Relatório Final).

RAMNARONG, V. Evaluation of groundwater management in Bangkok: positive and negative. In: CHILTON, J. (Ed.). *Groundwater in the urban environment: selected city profiles*. Rotterdam: Balkema, 1999. p.51-62. (Volume 21 - International Contributions to Hydrogeology – volume 2, Proceedings of the XXIII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment, Nottingham, UK, 21-27 sep. 1997).

REBOUÇAS, A. A inserção da água subterrânea no Sistema Nacional de Gerenciamento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.7, n.4, p.39-50, out./dez. 2002.

REBOUÇAS, A. Groundwater resources in South America. *Episodes*, Vienna, v.22, n.3, p.232-237, 1999.

ROCHA, G.A. Mega-reservatório de água subterrânea do Cone Sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL “AQÜÍFERO GIGANTE DO MERCOSUL”, 1., 1996, Curitiba. *Relatório...* Curitiba: UFPR, 1996. 27 p., ilustr. Inédito. (23 a 24 de maio).

SETTI, A.A. *A necessidade do uso sustentável dos recursos hídricos*. Brasília: MMA/IBAMA, 1996. 344p.

SINELLI, O. Água subterrânea no município de Ribeirão Preto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG, 1971a. v.2, p.17-34.

SINELLI, O. *Geologia e água subterrânea no município de Ribeirão Preto e adjacências*. 1970. 116 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.

SRACEK, I.; HIRATA, R. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v.10, n.6, p.643-655, 2002.

SUÁREZ, L.; REGUEIRO, M. (Ed.). *Guía ciudadana de los riesgos geológicos*. Madrid: Ilustre Colégio Oficial de Geólogos de España, 1997. 196 p. ISBN 84-920097-3-X.

SURESH, T.S. Impact of urbanisation on groundwater regime: a case study of Bangalore City, Karnataka, India. In: CHILTON, J. (Ed.). *Groundwater in the urban environment: selected city profiles*. Rotterdam: Balkema, 1999. p.251-258. (Volume 21 - International Contributions to Hydrogeology – volume 2, Proceedings of the XXIII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment, Nottingham, UK, 21-27 sep. 1997).

TANCO, R.; KRUSE, E. Prediction of seasonal water-table fluctuations in La Pampa and Buenos Aires, Argentina. *Hydrogeology Journal*, v.9, n.4, p.339-347, 2001.

UNESCO; DNPM; CPRM. *Mapa hidrogeológico da América do Sul*. Brasília: CPRM, 1996. Diversos mapas. Escala 1:5.000.000. 2 v. 218 p. (organizado por N.F.R. Anjos e P. Mente).

USGS. United States Geological Survey. *Modeling groundwater flow with MODFLOW and related programs*. Denver: USGS, 1997. (USGS Fact Sheet – FS 121-97).

- VILLAROYA, F.; ALDWELL, C.R. Sustainable development and groundwater resources exploitation. *Environmental Geology*, v.34, n.2/3, p.111-115, 1998.
- VILLELA, S.M.; MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw Hill, 1975. 345 p.
- WARDLE, D.A.; BONNER, K.I.; BARKER, G.M. Stability of ecosystem properties in response to above-ground functional group richness and composition. *Oikos*, Copenhagen, v.89, n.1, p.11-23, apr. 2000.
- WILKINSON, W.B.; BRASSINGTON, F.C. Rising groundwater levels: an international problem. p.35-53. In: DOWNING, R.A.; WILKINSON, W.B. (Ed.). *Applied groundwater hydrogeology*. Oxford: Oxford University Press, 1991. 340 p.
- WINTER, T.C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. *Groundwater and Surface Water: a single resource*. Denver (CO): USGS, 1999. 79 p. (U.S. Geological Survey Circular 1139). ISBN 0-607-89339-7.
- ZUQUETTE, L.V.; ELIS, V.R. Estudos geológicos-geotécnicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos – cidade de Ribeirão Preto (Brasil). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 1998, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS, ABEF, 1998. 10 p. 1 CD-ROM. (29 e 30 de setembro de 1998).
- ZUQUETTE, L.V.; PEJON, O.J.; ELIS, V.R. Estudos geológicos-geotécnicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos – cidade de Ribeirão Preto (Brasil). In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 1997, Lisboa. *Anais...* Lisboa: [s.n.], 1997. v.1, p.329-340.

#### **4. Geoestatística e Superfícies de Tendência**

- AI-GEOSTATS Discussion List. List maintained by European Commission/Joint Research Centre, Grégoire A. G. Dubois. Disponível em: <<http://www.ai-geostats.org>>. Acesso em: 12 fev. 2003.
- ALABERT, F.G.; MODOT, V. Stochastic Models of Reservoir Heterogeneity: Impact on Connectivity and Average Permeabilities. *SPE Technical Report*, No. 24893, 1992. (67<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Washington, DC, October 4-7, École des Mines de Nancy, Elf Aquitaine).
- ARMSTRONG, M. *Basic Linear Geostatistics*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 153 p.
- ARMSTRONG, M. Common problems seen in variograms. *Mathematical Geology*, v.16, n.3, p.305-313, 1984.
- BELLENZANI JÚNIOR, V.D.; LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R. 1990. Análise espacial quantitativa de dados hidrogeológicos do município de Araraquara-SP. *Geociências*, São Paulo, p.197-214, 1990. Número especial
- BILONICK, R.A. The space-time distribution of sulfate deposition in the northeastern U.S.. *Atmospheric Environment*, v.19, n.11, p.2513-2524, 1985.
- BOGAERT, P.; CHRISTAKOS, G. Spatiotemporal analysis and processing of thermometric data over Belgium. *Journal of Geophysical Research (Atmospheric)*, v.102, n.D22, p.25.831-25.846, 1997.
- CARR, J.D.; MEYERS, D.E.; GLASS, C.E. Cokriging. A computer program. *Computers; Geosciences*, v.11, n.2, p.11-127, 1985.

- CHILÈS, J-P; DELFINER, P. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Berlin: Wiley-Interscience, 1999. 672 p. ISBN 047 1083151.
- CHRISTAKOS, G. A Bayesian/maximum-entropy view to the spatial estimation problem. *Mathematical Geology*, v.22, n.7, p.763-776, 1990a.
- CHRISTAKOS, G. *Modern Spatiotemporal Geostatistics*. New York: Oxford University Press, 2000. 288 p.
- CHRISTAKOS, G. *Random field models in earth sciences*. San Diego: Academic Press, 1992. 474 p.
- CHRISTAKOS, G. Some applications of the Bayesian, maximum entropy concept in Geostatistics. p.215-229. In: FOUGÈRE, P.F. (ed.). *Maximum Entropy and Bayesian Methods – Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Workshop* (Dartmouth, MA, USA, 1989). Dordrecht (Netherlands): Kluwer Acad. Publ., 1990b. (Fundamental theories of Physics, volume 39).
- CHRISTAKOS, G.; BOGAERT, P.; SERRE, M.L. *Temporal GIS: Advanced Functions for Field Based Applications*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 217 p. 1 CD-ROM. ISBN. 3-540-41476-2.
- CHRISTAKOS, G.; SERRE, M.L. *Model-based mapping and risk assessment*. Chapel Hill: [s.n.], 2001. Notas de aula de Rubens Caldeira Monteiro, jan./mai. 2001.
- CHRISTAKOS, G.; SERRE, M.L. Spatiotemporal Mapping: using the MEB numerical libraries – MEBintEst and MEBpdfEst. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IAMG, 1998, Ischia Island (Italy). *Shortcourse...* [s.l.]: International Association for Mathematical Geology, 1998. 33 p. (5-8 October, 1998).
- CHRISTAKOS, G.; XINYANG LI. Bayesian Maximum Entropy Analysis and Mapping: a farewell to Kriging Estimators ? *Mathematical Geology*, v.30, n.4, p.435-462, 1998.
- CLARK, I.; HARPER, W.V. *Practical Geostatistics 2000*. Columbus (OH): Ecosse North America, 2000. 442 p. ISBN 0-9703317-0-3.
- COMPUTERS & GEOSCIENCES. New York: International Association for Mathematical Geology, 1975- .10 vols. por ano. ISSN 0098-3004.
- DAMSLETH, E.; HOLDEN, L. Mixed reservoir characterization methods. *SPE Technical Report*, n. 27969, 1994. (SPE Centennial Petroleum Engineering Symposium. Tulsa (Oklahoma), 1994. *Proceedings...* Tulsa, SPE. 29-31 August, 1994).
- DAVIS, J.C. *Statistics and data analysis in Geology*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 646 p.
- DAVIS, S.F.; LIN, M.C. Basis functions for data representation, processing and computation. In: ADVANCED CONCEPT WORKSHOP. Raleigh: U.S. Army Research Office, 1996.
- DE IACO, S.; MYERS, D.E.; POSA, D. Nonseparable Space-Time Covariance Models: some parametric families. *Mathematical Geology*, v.34, n.1, p.23-42, 2002.
- DEUTSCH, C.V. *Geostatistical Simulation: Principles and Hands – on Practice*. School of Mining and Petroleum Engineering. November 26-27, 1998. (Visual aids / Lecture Notes – Curso de Simulação Geoestatística, São Paulo, SP, Brasil, 23-27 novembro. 150 p. IG/UNICAMP, Poli/USP e DATAMINE Latin America).
- DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. *GSLIB – Geostatistical Software Library and User's*

*Guide*. 2 ed. New York: Oxford University Press, 1997. 369 p. Inclui 1 CD-ROM.

DOWD, P.A. A review of recent developments in geostatistics. *Computer & Geosciences*, New York, v.17, n.10, p.1481-1500, 1992.

DUBRULE, O. A review of stochastic models for petroleum reservoirs. In: GALLI, A.; BEUCHER, H. *Stochastic models for reservoir characterization: a user-friendly review*. *SPE Technical Report*, n. 38999, 1997. (Fifth Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil, 30 August-3 September. École des Mines de Paris, Centre de Geostatistique).

GALLI, A.; BEUCHER, H. Stochastic models for reservoir characterization: a user-friendly review. *SPE Technical Report*, No. 38999, 1997. (Fifth Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil, 30 August-3 September. École des Mines de Paris, Centre de Geostatistique).

GEOVARIANCES. *The Universe of Geostatistics: Introduction to Geostatistics, a video short course on Geostatistics*. Produção de Shell International Exploration and Production, Geovariances. Concepção de Jacques Deraisme. [s.l.]: Geovariances, 1996. 1 videocassete (90 min), VHS, son., color.

GOODMAN, A. COMPARE: a FORTRAN IV program for the quantitative comparison of polynomial trend surfaces. *Computers & Geosciences*, New York, v.9, n.3, p.417-454, 1983.

GOOVAERTS, P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford: Oxford University Press, 1997. 496 p. ISBN 0-19-511538-4.

GUERRA, P.A.G. *Geoestatística operacional*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1988. 145 p.

HAAS, T.C. Local prediction of a spatiotemporal process with an application to wet sulfate depositions. *Journal of the American Statistical Association*, v.90, n.432, p.1189-1199, 1995.

HRISTOPULOS, D.T.; CHRISTAKOS, G. Practical calculation of non-gaussian multivariate moments in Spatiotemporal Bayesian Maximum Entropy Analysis. *Mathematical Geology*, v.33, n.5, 2001.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. *Applied Geostatistics*. New York: Oxford Univ. Press, 1989. 561 p. ISBN 0-19-505012-6.

JAIN, A.K. *Fundamentals of digital image processing*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 569 p.

JOURNEL, A.G. Constrained interpolation and qualitative information: The soft kriging approach. *Mathematical Geology*, v.18, n.3, p.269-286, 1986.

JOURNEL, A.G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 28., 1989, Washington. *Short Course in Geology...* Wahsington, American Geophysical Union, 1989. v.8, 40 p.

JOURNEL, A.G.; DEUTSCH, C.V. Entropy and Spatial Disorder. *Mathematical Geology*, v.25, n.3, p.329-255, 1993.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, Ch. 1978. *Mining Geostatistics*. London: Academic Press. 600 p. (4<sup>a</sup> reimpressão, 1989).

KITANIDIS, P.K. *Introduction to Geostatistics: applications in hydrogeology*. 2.ed.

Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 249 p. (1 edição de 1997).

KOLOVOS, A. *Computational investigations of the BME mapping approach and incorporation os physical knowledge bases*. 2001. 185 f. Tese (Doctor of Philosophy in Environmental Modeling) - School of Public Health, University of North Carolina, Chapel Hill (NC, USA). (orient. George Christakos). Disponível em: <<http://www.unc.edu/~kolovos/Dissertation/main.html>>. Acesso em: 12 fev. 2003.

KRIGE, D.G. *A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand*. 1951. Tese (Magister Science Engineering) - University of the Witwatersrand, Johannesburg.

KRIVORUCHKO, K. Using linear and non-linear kriging interpolator to produce probability maps. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IAMG, 2001, Cancun (Mexico).

LANDIM, P.M.B. *Análise Estatística de Dados Geológicos*. São Paulo: EDUNESP, 1998. 226 p. (Série Ciência e Tecnologia). ISBN 85-7139-166-1.

LANDIM, P.M.B. *Texto didático 02 - Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. Rio Claro: UNESP, 2000. 20 p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 12 fev. 2003. (formato Adobe Acrobat PDF).

LANDIM, P.M.B.; CORSI, A.C. *Texto didático 05 – Cálculo de Superfícies de Tendência, por regressão polinomial, pelo “SURFER® 6”*. Rio Claro: UNESP, 2001. 11 p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 12 fev. 2003. (formato Adobe Acrobat PDF).

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R.; MONTEIRO, R.C. O coeficiente de correlação na utilização da cokrigagem. In: SIMPÓSIO DE QUANTIFICAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS, 6., 1995, Rio Claro. *Boletim de Resumos Expandidos...* Rio Claro: IGCE-UNESP, 1995. p.91-94.

MARCOTTE, D. Cokriging with MATLAB. *Computers & Geosciences*, v.17, n.9, p.1265-1280, 1991.

MATHEMATICAL GEOLOGY. Dordrecht: International Association for Mathematical Geology, 1968- .8 vols. por ano. ISSN 0882-8121.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, v.15, p.1246-1266, 1963.

MATHERON, G. *The Theory of Regionalized Variables and its applications*. Paris: École de Mines de Paris, 1971. 211 p. (Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fointainbleau).

MONTEIRO, R.C. ; LANDIM, P.M.B. Mapeamento espaço-temporal do Aquífero Guarani em Ribeirão Preto por Máxima Entropia Bayesiana: uma nova abordagem Geoestatística. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 47., 2002. *Anais...* Rio Claro: RBRAS-IBS, UNESP/RC, 2002. 5 p. 1 CD-ROM.

MONTENEGRO, A.A.A. ; RIGHETTO, A.M. ; SINELLI, O. Modelação do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto 1. Descrição do Domínio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 5., 1988, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABAS, 1988. p.32-41.

MONTENEGRO, A.A.A; RIGHETTO, A.M. Modelação matemática do manancial

- subterrâneo de Ribeirão Preto - SP 3. Simulações Computacionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6., 1990, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: ABAS, 1990. p.117-124.
- OLEA, R.A. (Ed.) *Geostatistical glossary and multilingual dictionary*. New York: Oxford University Press, 1991. 177 p. (International Association of Mathematical Geology: Studies in Mathematical Geology n. 3). ISBN 0-19-506689-8.
- OLEA, R.A. *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. [s.l.]: Kluwer, 1999. 328 p. ISBN 0-7923-8523-3.
- PANNATIER, Y. VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D. New York: Springer-Verlag. 1996. ISBN 0-387-94679-9.
- POLYAK, I.; NORTH, G.R.; VALDES, J.B. Multivariate space-time analysis of PRE-STORM precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, v.33, p.1079-1087, 1994.
- REMACÉ, A.Z. Introdução às funções aleatórias. Campinas: [s.n.], 1999a. 23p. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/~armando/armandop.htm>>. Acesso em: 12 fev. 2003. (arquivo aula.pdf, compactado aula.zip). (Apostila da curso de nivelamento para a Disciplina de Geoestatística I – Variografia e Krigagem, IG-UNICAMP).
- REMACÉ, A.Z. Revisão de conceitos probabilísticos. Campinas: [s.n.], 1999b. 43p. Disponível em <http://www.ige.unicamp.br/~armando/armandop.htm>. Acesso em 12 fev. 2003. (arquivo nivel.pdf, compactado nivel.zip). (Apostila da curso de nivelamento para a Disciplina de Geoestatística I – Variografia e Krigagem, IG-UNICAMP).
- REMACRE, A.Z.; CARVALHO, R.M. *Curso de Simulação Geoestatística*. Campinas: UNICAMP, IG, 1998 27 f. (Apostila – Curso de Simulação Geoestatística, São Paulo, SP, Brasil, 23-27 novembro. 27 p. IG/UNICAMP, Poli/USP e DATAMINE Latin America).
- RIVOIRARD, J. *Introduction to disjunctive kriging and non-linear geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1994. 181 p.
- ROUHANI, S.; MYERS, D.E. Problems in space-time kriging of geohydrological data. *Mathematical Geology*, v.22, n.5, p.611-623, 1990.
- ROYLE, A.G. *A practical introduction to Geostatistics*. Leeds: Department of Mining and Mineral Sciences, Leeds University, 1979. 3 v.
- SAMPER-CALVETE, F.J.; CARRERA-RAMÍREZ, J. *Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea*. 2.ed. Barcelona: CIMNE, 1996. 484 p. (1 ed. 1990).
- SCHNOOR, J.L. (Ed.). *Modeling of total acid precipitation impacts*. Boston: Butterworth, 1984. 222 p.
- SERRE, M.L. *Environmental spatiotemporal mapping and groundwater flow modeling using the BME and ST methods*. 1999. 236 f. Tese (Doctor of Philosophy in Environmental Modeling) - School of Public Health, University of North Carolina, Chapel Hill (NC, USA). (orient. George Christakos). Disponível em: <<http://www.unc.edu/~mserre/PhDtableOfContents.html>>. Acesso em: 12 fev. 2003.
- SERRE, M.L.; BOGAERT, P.; CHRISTAKOS, G. Latest Computational Results in Spatiotemporal Prediction Using the Bayesian Maximum Entropy Method. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL GEOLOGY, 4., 1998, Napole. *Proceedings...* Nápole: De Frede, 1998. p.117-122.
- SOARES, A. *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente*. Lisboa: IST, 2000.

206 p. ISBN 972-8469-10-1.

SCHULTZ, C.; MYERS, S.; HIPPI, J.; YOUNG, C. Nonstationary Bayesian kriging: a predictive technique to generate corrections for detection, location and discrimination. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 88, p. 1275-1288, 1998.

STURARO, J.R. *Estudo do comportamento espacial de variáveis geológicas e hidrogeológicas da área urbana de Ribeirão Preto – SP*. 1988. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. (orient. Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim).

STURARO, J.R.; LANDIM, P.M.B. Estudo do nível piezométrico por análise geoestatística. *Geociências*, São Paulo, v.7, p.201-210, 1988.

SUTTERLIN, P.G.; HASTINGS, J.P. Trend-surface analysis revisited - a case history. *Computers & Geosciences*, v.12, n.4B, p.537-562, 1986.

UZUMAKI, E.T. Geoestatística Multivariada: estudo de métodos de predição. Campinas. 1994. 104 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Instituto de Matemática, Estatística e Ciência de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VALENTE, J.M.G.P. *Geomatemática: lições de Geoestatística*. 2.ed. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1989. 8 v.

YAMAMOTO, J.K. An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates. *Mathematical Geology*, v.34, n.4, p.489-509, 2000.

YAMAMOTO, J.K. *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: EDUSP, FAPESP, 2001. 232 p. (Coleção Acadêmica, 38). ISBN 85-314-0626-9.

YATES, S.R.; YATES, M.V. *Geostatistics for waste management. A user's manual for the GEOPAK (version 1.0)*. Geostatistical Software System: U.S. Environmental Protection Agency, 1990. (Report no. EPA/600/8-90/004).

YEVJEVICH, V. General introduction to application of stochastic hydrology in water resource. p.3-23. In: MARCO, J.B.; HARBOE, R.; SALAS, J.D. (Ed.) *Stochastic hydrology and its use in water resources systems simulation and optimization*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; NATO Scientific Affairs Division, 1993. (Series E: Applied Sciences, v. 237).



## **VIII. APÊNDICES**

## APÊNDICE A – Localização e cota altimétrica da boca dos poços

POÇO	UTM EW	UTM NS	Cota_boca
2	208.480	7646.750	634.00
3	207.450	7646.375	560.00
22	205.545	7659.040	540.00
28	208.400	7656.300	522.30
35	205.599	7658.931	550.00
37	206.642	7653.060	532.00
50	209.500	7654.030	534.00
50A	208.540	7656.170	522.70
54	210.310	7656.480	547.00
57	205.870	7659.140	541.00
58	210.770	7656.110	544.50
60	206.070	7655.860	537.00
61	213.820	7654.780	555.00
64	209.500	7658.900	524.00
65	208.030	7657.510	520.00
68	209.820	7653.190	533.00
72	209.310	7655.400	528.00
79	207.110	7657.131	534.00
84	205.300	7656.690	575.00
86	211.780	7655.420	567.00
87	207.840	7656.960	520.60
89	212.860	7655.110	564.00
90	210.110	7658.230	518.00
91	210.520	7656.530	537.50
92	206.520	7652.948	531.00
93	209.770	7654.850	564.00
95	206.748	7652.874	536.00
96	209.240	7655.100	527.00
97	204.821	7659.480	562.00
98	207.280	7655.800	526.00
99	206.064	7652.551	518.00
100	209.690	7658.750	514.50
101	208.400	7658.330	514.00
102	209.860	7661.880	527.00
103	208.670	7660.840	519.00
104	208.290	7653.350	617.00
105	209.810	7661.950	515.00
106	209.530	7660.000	535.00
107	213.650	7654.060	564.00
108	208.400	7661.060	527.30
109	216.063	7655.607	589.00
112	208.690	7663.350	519.00
114	217.160	7654.820	590.00
115	210.890	7654.040	567.00
116	210.800	7651.240	601.00
117	204.650	7660.470	590.00
118	205.920	7656.920	534.00
119	209.820	7658.680	514.50
120	211.720	7653.220	595.00
121	207.180	7660.620	535.00
123	206.592	7656.729	536.00
124	208.630	7654.830	563.30
125	210.850	7661.500	538.00
126	204.890	7653.680	601.00
127	207.350	7651.790	563.00
129	209.300	7656.260	570.00
130	206.610	7654.280	525.00
131	205.030	7656.220	552.00
133	212.500	7658.070	548.00
134	213.730	7652.045	590.00
135	205.731	7659.960	563.00
136	205.310	7654.400	604.00
137	207.100	7661.620	525.00
138	204.460	7657.340	620.00
139	212.530	7652.690	583.00
140	212.690	7654.110	580.00
141	210.250	7659.860	535.00
142	205.839	7652.487	547.00
143	207.590	7655.430	536.00
145	208.890	7662.660	519.00
146	207.170	7660.670	546.00
147	205.850	7655.810	528.00
148	216.020	7654.260	590.00
149	213.180	7656.060	560.00
150	212.781	7651.596	565.00
151	206.242	7651.353	580.00
152	210.070	7652.220	550.00
153	206.702	7654.424	539.00
154	202.930	7655.360	550.00
155	206.830	7659.790	560.00
156	212.110	7653.630	518.00
157	205.900	7655.460	534.00
158	206.170	7658.300	597.00
159	215.325	7657.377	573.00
160	216.083	7657.141	590.00
161	208.790	7651.400	638.00
162	210.780	7663.350	551.00
163	204.040	7652.516	612.00
164	214.930	7655.020	565.00
165	207.172	7660.655	544.00
166	206.760	7648.525	557.00
167	214.811	7660.613	525.00
168	210.350	7655.680	593.00
169	214.890	7653.834	583.00
170	212.360	7658.520	578.00
171	203.836	7660.428	638.00
172	203.689	7653.390	565.00
173	213.419	7650.595	577.00
174	209.771	7661.898	528.00
175	204.813	7656.931	580.00
176	216.600	7657.300	580.00
177	206.200	7661.343	550.00
178	204.953	7654.779	550.00
179	208.300	7659.440	525.00
180	213.650	7654.060	563.00
181	213.220	7659.650	542.00
183	203.630	7658.900	638.00
184	208.380	7653.330	618.00

## APÊNDICE B – Dados de Nível Estático para Krigagem

Poco	UTM EW	UTM NS	Cota_boca	Prof_NE	Cota_NE
2	208480.00	7646750.00	644.20	110.00	534.20
3	207410.00	7646310.00	570.00	39.15	530.85
22	205500.00	7659040.00	540.00	81.75	458.25
28	208400.00	7656300.00	522.30	63.63	458.67
37	206550.00	7653160.00	532.00	66.00	466.00
50	209500.00	7654030.00	534.00	43.00	491.00
50A	208540.00	7656170.00	522.70	12.75	509.95
54	210310.00	7656480.00	547.00	75.54	471.46
57	205870.00	7659140.00	541.00	57.00	484.00
58	210770.00	7656110.00	544.50	54.44	490.06
60	206280.00	7655860.00	537.00	38.00	499.00
64	209500.00	7658900.00	524.00	44.00	480.00
65	208030.00	7657510.00	520.00	61.00	459.00
68	209820.00	7653190.00	533.00	53.00	480.00
72	209310.00	7655400.00	528.00	66.50	461.50
79	207070.00	7657160.00	534.00	81.00	453.00
84	205300.00	7656690.00	575.00	129.34	445.66
86	211780.00	7655420.00	567.00	15.20	551.80
87	207840.00	7656960.00	520.60	73.30	447.30
89	212860.00	7655110.00	564.00	28.00	536.00
90	210110.00	7658230.00	518.00	33.00	485.00
91	210520.00	7656530.00	537.50	61.00	476.50
92	206520.00	7653080.00	531.00	53.00	478.00
93	209770.00	7654850.00	564.00	79.00	485.00
95	206100.00	7653020.00	536.00	70.00	466.00
96	209240.00	7655100.00	527.00	75.50	451.50
97	204610.00	7659530.00	562.00	95.30	466.70
98	207280.00	7655800.00	526.00	85.44	440.56
100	209690.00	7658750.00	514.50	18.17	496.33
101	208400.00	7658330.00	514.00	57.65	456.35
102	209860.00	7661880.00	527.00	85.00	442.00
103	208670.00	7660840.00	519.00	38.53	480.47
104	208290.00	7653350.00	617.00	157.10	459.90
106	209530.00	7660000.00	535.00	57.42	477.58
107	213650.00	7654060.00	564.00	57.93	506.07
108	208400.00	7661060.00	527.30	48.60	478.70
109	215860.00	7655510.00	599.00	54.30	544.70
112	208690.00	7663350.00	519.00	27.24	491.76
114	217160.00	7654820.00	590.00	30.00	560.00
115	210890.00	7654040.00	567.00	69.00	498.00
116	210800.00	7651240.00	601.00	67.00	534.00
118	205920.00	7656920.00	534.00	85.00	449.00
119	209820.00	7658680.00	514.50	37.20	477.30
120	211720.00	7653220.00	595.00	72.00	523.00
123	206620.00	7656650.00	546.00	101.50	444.50
124	208630.00	7654830.00	563.30	117.96	445.34
125	210850.00	7661500.00	538.00	33.70	504.30
126	204890.00	7653680.00	601.00	138.00	463.00
127	207350.00	7651790.00	563.00	87.50	475.50
129	209300.00	7656260.00	570.00	120.10	449.90
130	206610.00	7654280.00	525.00	85.00	440.00
131	205030.00	7656220.00	552.00	113.56	438.44
133	212500.00	7658070.00	548.00	28.57	519.43
134	213730.00	7651950.00	590.00	74.22	515.78
135	205730.00	7659990.00	563.00	98.31	464.69
136	205310.00	7654400.00	604.00	153.46	450.54

137	207100.00	7661620.00	525.00	45.87	479.13
139	212530.00	7652690.00	583.00	77.37	505.63
140	212690.00	7654110.00	580.00	66.10	513.90
141	210250.00	7659860.00	535.00	63.00	472.00
142	205790.00	7652320.00	547.00	77.00	470.00
143	207590.00	7655430.00	536.00	94.20	441.80
145	208890.00	7662660.00	519.00	26.00	493.00
146	207170.00	7660670.00	546.00	68.33	477.67
147	205850.00	7655810.00	528.00	88.00	440.00
149	213180.00	7656060.00	560.00	53.60	506.40
151	206530.00	7651430.00	570.00	102.10	467.90
152	210070.00	7652220.00	550.00	47.00	503.00
153	206640.00	7654470.00	539.00	92.60	446.40
154	202930.00	7655360.00	570.00	79.00	491.00
155	206830.00	7659790.00	560.00	77.36	482.64
156	212110.00	7653630.00	580.00	93.90	486.10
157	205900.00	7655460.00	534.00	92.35	441.65
158	206170.00	7658300.00	597.00	143.22	453.78
159	216320.00	7657350.00	573.00	44.08	528.92
161	208790.00	7651400.00	638.00	145.82	492.18
162	210780.00	7656530.00	551.00	46.68	504.32
165	207172.00	7660655.00	544.00	76.10	467.90
166	206400.00	7648300.00	600.00	99.75	500.25
168	210350.00	7655680.00	593.00	29.50	563.50
171	203930.00	7660318.00	638.00	165.17	472.83
172	204740.00	7653390.00	565.00	98.15	466.85
173	213419.00	7646742.00	577.00	55.84	521.16
179	208300.00	7659440.00	525.00	55.33	469.67
183	203630.00	7658900.00	638.00	173.86	464.14

## APÊNDICE C – Dados de Nível Estático para MEB

ID	mês	dia	ano	NE					
2	11	17	95	110.00	109	10	05	95	48.00
3	05	10	94	39.13	109	02	18	99	54.30
3	10	26	95	39.15	111	05	23	98	55.34
22	10	18	90	65.00	112	12	11	95	10.80
22	12	12	96	81.75	112	04	10	97	27.24
28	09	28	95	61.00	114	08	17	95	30.00
28	12	03	96	62.11	115	10	03	95	69.00
28	05	24	98	63.63	116	12	06	95	67.00
35	04	27	95	83.00	116	07	27	99	81.70
35	09	17	96	86.92	117	10	30	95	99.00
35	04	14	98	88.66	118	09	15	93	98.46
50	11	22	95	43.00	118	06	06	95	85.00
5	01	15	2001	12.75	119	11	14	95	37.20
54	10	20	95	21.00	119	10	10	96	37.20
54	09	17	96	75.74	120	11	22	95	72.00
54	01	08	97	75.54	121	12	13	96	70.87
58	08	05	98	54.44	123	09	17	96	102.50
64	11	23	95	44.00	123	09	23	96	101.50
65	10	17	95	61.00	124	12	05	95	98.00
68	12	08	95	43.00	124	12	30	97	117.96
68	04	29	98	53.00	125	10	19	95	40.00
79	03	06	95	81.00	125	02	25	98	33.70
84	11	09	95	125.00	126	12	20	95	138.00
84	03	02	98	129.34	127	12	18	95	81.00
86	09	19	97	15.20	127	08	12	97	87.08
87	10	16	95	54.00	127	01	09	98	87.50
87	04	06	98	73.30	129	10	06	95	121.00
89	01	05	95	28.00	129	04	08	98	120.10
90	10	04	95	33.00	130	12	22	95	85.00
91	10	19	95	61.00	131	12	11	95	105.00
92	12	19	95	53.00	131	07	24	98	113.56
93	09	27	95	79.00	133	08	03	95	75.82
96	06	01	95	74.00	133	06	24	98	28.57
96	12	12	95	74.00	134	12	19	95	69.00
96	04	03	97	75.50	134	12	13	96	72.62
97	04	26	95	93.00	134	07	13	98	74.22
97	06	13	97	93.65	135	11	06	95	89.00
97	03	23	98	95.30	135	08	21	96	92.50
98	01	11	96	67.00	135	01	07	99	98.31
98	08	28	97	85.44	136	07	04	90	137.29
99	08	15	95	58.00	136	05	18	97	153.46
99	11	12	97	69.10	137	06	28	90	34.83
101	10	31	95	61.00	137	07	27	95	42.00
101	06	27	97	57.65	137	12	03	96	45.87
102	01	19	96	19.85	138	08	18	90	158.30
102	09	30	98	85.00	138	08	18	90	158.30
103	05	16	94	33.00	139	01	15	91	48.00
103	08	01	96	42.00	139	12	03	96	77.50
103	04	09	97	37.54	139	03	03	97	77.37
103	03	27	98	38.53	140	10	15	91	38.00
104	03	18	99	157.10	140	10	12	98	65.20
105	01	19	96	38.00	140	05	30	99	66.10
105	02	12	97	39.52	141	06	07	91	45.50
106	09	20	95	51.00	142	06	04	91	68.13
106	06	01	96	60.00	143	08	21	91	82.00
106	11	17	98	57.42	143	01	25	98	82.00
107	09	28	95	38.00	143	03	18	99	94.20
107	11	12	97	56.72	145	03	13	92	26.00
107	06	29	98	54.95	145	06	18	96	26.00
107	05	06	2001	57.93	146	06	18	96	68.33
108	12	05	95	26.00	147	04	25	92	77.20
108	07	16	97	48.60	147	09	17	96	77.20
					147	11	07	2000	88.00
					148	09	17	96	37.26

148	06	30	98	75.00	157	06	06	95	87.00
149	02	11	94	32.00	157	07	14	95	87.00
149	09	17	96	34.45	157	10	03	95	87.00
149	03	04	98	53.60	157	11	25	97	94.73
150	12	18	95	50.00	157	09	29	98	92.35
150	09	19	96	50.00	158	08	01	95	135.00
150	09	05	97	53.20	158	09	17	96	135.00
151	09	07	94	103.30	158	09	25	98	143.22
151	05	16	99	102.10	159	07	30	97	44.08
152	09	01	94	47.48	161	03	31	96	140.00
152	09	04	95	47.00	161	07	24	96	140.00
153	09	22	94	88.10	161	05	04	98	145.82
153	12	18	95	88.00	162	11	04	96	46.68
153	07	27	98	92.60	163	12	13	96	140.00
154	12	10	94	76.92	163	01	04	98	142.24
154	03	07	95	79.00	163	01	18	98	142.21
154	01	12	96	49.00	164	12	03	96	51.71
155	07	22	95	66.00	164	12	31	96	42.25
155	11	27	95	71.00	165	08	25	97	76.10
155	09	17	96	66.00	166	12	05	97	99.75
155	05	23	97	77.36	168	07	17	98	29.50
156	03	27	95	84.00	171	04	17	99	165.17
156	10	05	95	84.00	172	12	21	98	98.15
156	12	12	95	84.00	173	12	38	98	55.84
156	01	28	97	107.75	149	09	26	2000	55.33
156	02	18	97	93.90	183	04	25	2001	173.86

## APÊNDICE D – Dados de Nível Dinâmico para MEB

	Data			ND m	Q m <sup>3</sup> /h						
	mês	dia	ano								
						28	7	14	97	68.36	37.61
						28	2	3	98	69.24	38.34
						28	2	5	98	69.23	39.68
						28	3	16	98	68.49	38.54
						28	5	26	98	66.01	37.65
						28	6	24	98	65.99	36.27
						28	9	18	98	63.98	24.05
						28	9	22	98	67.03	30.67
						28	10	19	98	67.39	30.21
						28	10	23	98	64.31	36.44
						28	1	19	99	64.11	36.15
						28	3	26	99	64.27	36.13
						28	5	26	99	64.37	34.49
						35	4	14	97	92.72	39.41
						35	5	8	97	93.01	72.00
						37	9	12	94	74.42	52.00
						50	6	15	93	74.42	175.25
						50	3	16	93	74.82	162.36
						50	6	17	93	75.27	159.78
						50	6	23	93	75.34	161.72
						50	8	2	93	74.66	165.47
						50	4	29	94	73.74	158.00
						50	9	13	94	73.03	143.00
						50	11	21	94	72.13	136.99
						50	11	22	94	70.00	139.43
						50	9	6	95	73.41	130.01
						50	3	26	96	71.37	143.32
						50	5	14	96	71.00	121.70
						50	7	2	96	71.35	121.50
						50	9	11	96	71.96	131.38
						50	9	23	96	71.54	128.80
						50	10	31	96	71.54	125.50
						50	10	21	97	71.70	126.38
						50	5	15	97	71.70	120.22
						50	5	16	97	71.66	137.49
						50	9	15	97	72.77	130.12
						50	10	2	97	72.66	127.04
						50	12	18	97	72.87	125.06
						50	2	4	98	72.88	120.22
						50	4	27	98	72.17	120.88
						50	7	28	98	72.01	121.03
						50	9	29	98	71.44	106.25
						50	11	11	98	71.05	106.96
						50	12	18	98	71.15	105.00
						50	3	23	99	71.30	109.55
						50	4	9	99	74.08	110.30
						50	4	14	99	71.25	108.04
						50	5	24	99	71.37	108.56
						50	6	15	99	71.32	109.59
						54	9	3	96	84.77	59.14
						54	9	18	96	82.54	45.14
						54	12	2	96	86.64	54.11
						54	1	13	97	81.42	34.83
						54	1	14	97	81.46	36.05
						54	2	3	97	78.92	25.17
						54	10	10	97	83.13	36.61
						54	10	14	97	83.32	40.80
						58	1	31	95	100.85	79.94
						58	5	18	95	95.11	75.30
						58	8	14	95	93.83	72.54
						58	4	8	96	91.62	70.00
						58	6	5	96	86.35	60.35

58	7	26	96	84.05	59.31	79	11	10	93	96.00	131.56
58	9	18	96	83.70	57.70	79	1	12	94	96.20	128.82
58	12	2	96	83.70	57.09	79	4	26	94	96.60	124.00
58	11	13	97	83.75	60.02	79	8	10	94	96.27	121.00
58	3	21	97	83.70	58.90	79	11	28	94	97.21	123.00
58	7	16	97	83.91	58.43	79	5	31	95	97.40	119.50
58	2	9	98	86.59	58.32	79	7	26	95	97.80	119.28
58	6	17	98	85.42	58.85	79	3	27	96	98.90	115.98
58	9	1	98	88.89	61.46	79	4	1	96	98.40	115.81
64	10	5	94	74.11	138.00	79	6	13	96	99.66	115.00
64	1	3	95	74.64	137.47	79	8	8	96	99.50	115.01
64	5	15	95	74.62	134.40	79	1	28	97	99.60	113.25
64	8	24	95	74.80	133.62	79	3	20	97	99.91	113.50
64	1	23	96	73.36	140.47	79	10	24	97	102.26	111.28
64	4	17	96	70.60	135.90	79	1	13	98	102.86	111.41
64	7	17	96	71.40	135.70	79	4	23	98	100.99	109.12
64	8	3	96	74.59	148.84	79	8	31	98	101.59	108.74
64	8	7	96	74.97	149.09	79	12	10	98	100.89	108.55
64	8	16	96	75.07	150.13	79	3	23	99	100.40	108.26
64	10	4	96	76.84	150.78	79	6	17	99	101.13	108.49
64	1	8	97	76.83	146.27	84	9	13	93	146.90	80.81
64	3	24	97	77.48	146.59	84	10	19	93	146.85	83.87
64	6	3	97	77.18	142.24	84	9	14	94	149.90	75.00
64	9	9	97	79.99	147.40	84	7	13	95	144.99	64.95
64	11	7	97	80.59	144.17	84	4	14	96	145.39	62.90
64	2	11	98	80.32	139.96	84	1	28	97	146.90	67.89
64	7	24	98	79.28	139.82	84	10	15	97	147.00	61.30
64	12	9	98	80.03	143.15	84	12	13	98	195.49	61.62
64	3	23	99	79.76	144.30	84	3	2	98	149.73	74.97
64	6	25	99	80.55	139.77	84	6	2	98	147.41	67.52
65	6	6	94	89.01	253.30	84	7	24	98	147.80	66.34
65	3	8	95	88.05	220.06	84	12	7	98	147.26	65.77
65	5	11	95	89.00	235.50	84	3	23	99	147.14	64.25
65	7	25	95	88.80	225.29	84	7	7	99	196.90	62.38
65	10	17	95	88.70	221.00	86	9	29	97	61.31	35.49
65	3	27	96	88.10	219.27	86	10	1	97	59.33	35.61
65	4	1	96	88.18	215.18	86	1	23	98	61.60	36.38
65	6	11	96	88.27	203.05	86	1	26	98	64.83	34.58
65	7	1	96	88.04	208.40	86	1	28	98	60.27	31.92
65	9	26	96	88.43	203.36	86	2	9	98	66.27	32.35
65	10	23	96	87.60	193.91	86	2	25	98	68.18	35.95
65	1	8	97	86.80	177.05	86	7	10	98	80.47	31.49
65	9	2	97	86.17	177.05	86	9	2	98	32.13	35.95
65	10	24	97	87.41	168.39	86	10	9	98	44.68	31.49
65	1	13	98	87.48	166.73	86	3	10	99	70.82	35.95
65	4	23	98	85.96	170.14	86	6	28	99	66.45	33.89
65	9	4	98	86.62	163.56	87	5	11	95	97.90	257.00
65	2	18	99	84.83	167.97	87	6	11	96	96.56	229.40
65	5	5	99	85.74	163.67	87	7	1	96	96.85	229.71
65	6	17	99	91.07	161.35	87	9	26	96	97.00	223.85
68	7	29	93	79.98	301.56	87	10	5	96	95.85	234.10
68	9	14	93	77.40	299.43	87	10	7	96	96.63	231.40
68	5	5	94	76.82	298.02	87	1	8	97	96.30	226.20
68	8	17	94	76.90	289.00	87	5	6	97	96.52	214.80
68	9	12	94	76.85	295.00	87	10	24	97	98.52	210.73
68	9	26	94	76.30	275.00	87	11	10	97	97.50	215.12
68	9	28	94	80.72	317.25	87	1	13	98	99.14	204.15
68	1	13	95	80.93	314.97	87	4	13	98	96.17	226.89
68	5	17	96	78.03	299.32	87	9	4	98	95.34	201.18
68	7	2	96	77.98	295.82	87	2	18	99	92.75	192.52
68	9	25	96	82.45	292.48	87	4	5	99	95.24	206.18
68	1	8	97	78.00	297.51	87	6	17	99	94.02	196.76
68	4	24	97	81.90	286.79	89	7	13	95	97.33	68.85
68	12	17	97	79.09	274.56	89	8	5	95	96.22	65.80
68	4	27	98	81.67	267.24	89	6	25	96	90.62	57.92
68	4	29	98	83.23	291.78	89	9	6	96	90.59	57.31
68	6	15	99	85.05	267.86	89	11	26	96	89.11	52.81
79	7	15	93	96.70	131.56	89	1	22	97	97.95	61.83
79	8	4	93	96.48	130.12	89	5	9	97	92.15	52.86

89	7	3	97	90.88	51.59	93	1	12	94	108.51	104.37
89	7	10	98	90.42	50.72	93	2	22	94	111.14	116.47
89	10	14	98	92.35	46.65	93	5	24	94	108.17	107.00
89	3	4	99	90.94	45.83	93	10	19	94	108.76	107.00
89	6	10	99	94.06	48.18	93	1	12	95	106.29	86.14
90	6	23	87	84.00	132.08	93	5	26	95	104.17	81.82
90	12	29	94	74.68	115.36	93	9	5	95	105.04	90.69
90	7	11	95	66.40	98.44	93	9	27	95	103.37	85.20
90	10	4	95	70.22	109.00	93	6	13	96	107.35	92.19
90	1	24	96	68.80	106.97	93	9	9	96	105.00	87.73
90	4	17	96	62.73	96.93	93	11	25	96	106.18	88.07
90	7	2	96	64.10	102.72	93	1	22	97	103.15	80.45
90	12	5	96	65.32	102.78	93	3	13	97	100.81	14.58
90	2	4	97	66.24	101.41	93	3	17	97	102.87	56.59
90	6	3	97	67.50	103.00	93	4	20	98	104.15	19.04
90	10	8	97	68.84	102.54	93	9	21	98	108.10	66.78
90	4	26	99	67.55	104.25	93	2	8	99	106.31	54.77
91	12	7	87	88.00	88.00	93	5	26	99	103.00	51.58
91	6	22	93	99.35	67.67	93	5	31	99	106.89	56.47
91	10	6	93	95.93	69.74	96	11	19	87	91.15	98.06
91	12	17	93	97.00	66.47	96	6	3	96	89.69	90.00
91	2	2	94	95.50	64.47	96	9	11	96	100.10	86.31
91	4	28	94	95.83	64.00	96	11	25	96	99.55	88.80
91	8	22	94	95.28	66.00	96	1	22	97	99.93	90.11
91	12	6	94	94.53	62.51	96	5	6	97	99.81	84.29
91	10	19	95	94.90	67.30	96	9	15	97	101.60	85.72
91	2	12	96	94.41	85.95	96	11	12	97	84.29	84.29
91	5	13	96	94.00	62.75	96	1	28	98	102.08	85.49
91	9	6	96	94.88	61.54	96	9	16	98	100.11	82.42
91	9	18	96	93.60	64.62	96	2	10	99	100.77	79.70
91	11	28	96	94.19	57.40	97	1	20	93	104.00	98.13
91	1	13	97	92.89	60.81	97	10	19	94	107.03	111.00
91	7	16	97	91.82	56.43	97	11	14	94	106.89	97.28
91	10	10	97	93.26	51.16	97	12	7	94	106.82	113.11
91	12	30	97	92.88	55.94	97	7	3	95	106.40	113.00
91	2	9	98	92.56	59.35	97	10	29	96	108.70	116.62
91	6	4	98	91.83	52.68	97	6	16	97	110.61	113.84
91	9	15	98	91.70	55.97	97	3	25	98	109.03	89.37
91	2	5	99	92.29	51.54	97	3	30	98	110.00	90.17
91	5	24	99	91.20	45.47	97	5	7	98	109.98	92.69
92	12	9	87	89.00	357.00	98	11	4	87	94.60	99.62
92	10	17	94	95.06	321.00	98	4	8	96	97.55	43.00
92	7	4	95	92.80	290.64	98	7	3	96	98.41	60.71
92	8	15	95	92.50	287.19	98	9	13	96	100.90	69.31
92	4	11	96	91.30	271.07	98	2	4	97	98.52	61.27
92	4	22	96	92.31	303.77	98	6	18	97	100.91	70.05
92	4	23	96	94.89	299.17	98	9	2	97	99.49	62.38
92	4	24	96	95.50	302.93	98	11	17	97	98.20	52.03
92	4	26	96	95.95	312.24	98	11	18	97	100.09	57.48
92	6	24	96	96.12	311.12	98	11	19	97	99.62	53.69
92	7	5	96	96.20	307.43	98	11	21	97	100.74	59.10
92	10	10	96	94.78	302.45	98	2	2	98	100.05	57.57
92	1	15	97	94.77	292.81	98	2	19	98	89.31	51.03
92	6	4	97	95.48	297.63	98	9	9	98	101.39	62.42
92	8	6	97	96.39	279.40	98	11	18	98	100.45	59.60
92	10	20	97	96.02	275.24	98	3	9	99	100.70	59.51
92	1	15	98	95.52	265.73	98	6	16	99	99.60	56.55
92	4	16	98	94.46	262.74	99	11	3	87	71.62	114.01
92	8	12	98	91.77	239.58	99	8	15	95	76.76	59.33
92	9	24	98	98.10	286.15	99	4	11	96	75.44	62.00
92	2	17	99	97.52	290.17	99	4	15	96	72.60	58.17
92	3	9	99	102.49	242.44	99	7	5	96	73.75	57.20
92	3	19	99	102.32	243.39	99	10	11	96	73.83	53.50
92	4	6	99	103.10	245.23	99	11	13	96	73.40	58.52
92	7	15	99	102.45	240.89	99	2	17	97	72.65	45.99
93	6	14	93	112.75	116.47	99	5	12	97	70.28	33.25
93	6	24	93	105.30	96.37	99	8	7	97	71.22	30.06
93	6	28	93	108.58	101.17	99	10	30	97	71.16	24.90
93	9	14	93	109.00	105.26	99	9	22	98	73.04	22.32

99	2	17	99	72.62	23.32	103	10	8	98	88.60	214.58
99	4	6	99	72.57	22.32	103	10	8	98	88.90	121.72
100	7	7	87	64.00	102.31	103	3	15	99	92.41	239.74
100	8	3	96	66.33	56.86	103	3	15	99	93.20	115.38
100	8	15	96	65.16	55.42	103	6	18	99	95.94	107.10
100	9	25	96	64.94	56.14	105	9	2	87	71.80	203.02
100	11	7	96	72.47	57.81	105	5	13	94	74.73	108.00
100	12	26	96	72.62	57.27	105	9	5	94	66.12	93.50
100	1	2	97	72.60	56.49	105	11	16	94	77.51	122.48
100	2	20	97	76.60	66.17	105	6	27	95	76.31	123.48
100	3	24	97	77.00	66.12	105	9	6	95	66.34	94.12
100	6	2	97	77.18	66.10	105	5	6	96	68.60	113.69
100	10	7	97	79.04	66.17	105	9	6	96	60.00	86.00
100	1	15	98	80.07	64.42	105	10	8	96	61.61	88.70
100	2	11	98	79.21	64.89	105	10	9	96	62.30	90.91
100	5	4	98	78.85	65.11	105	1	29	97	62.47	96.56
100	1	4	99	76.76	61.81	105	2	13	97	63.25	63.25
100	3	29	99	77.53	61.42	105	2	20	97	62.57	96.12
100	6	23	99	78.59	61.67	105	10	9	97	66.83	105.32
101	7	7	94	74.15	151.00	105	12	27	97	67.20	107.52
101	7	12	94	74.12	139.00	105	4	1	98	66.12	105.85
101	11	14	94	75.02	194.86	105	8	25	98	47.29	47.45
101	12	22	94	81.81	247.13	105	8	26	98	47.69	46.47
101	5	9	95	80.76	271.28	105	8	31	98	48.80	46.34
101	7	15	96	76.00	76.93	105	12	15	98	49.98	51.49
101	8	21	96	77.72	243.04	105	3	23	99	74.00	64.30
101	9	3	96	81.52	266.27	106	10	22	87	74.00	105.99
101	10	1	96	81.16	264.22	106	12	25	88	69.40	118.62
101	2	18	97	81.55	250.33	106	7	20	93	69.63	103.47
101	5	30	97	82.12	272.31	106	5	27	94	73.69	94.00
101	5	31	97	79.51	233.13	106	7	26	94	72.15	90.00
101	6	2	97	76.99	210.46	106	11	4	94	78.39	106.64
101	7	3	97	69.20	138.60	106	7	28	95	59.89	41.00
101	8	5	97	69.92	155.34	106	7	31	95	69.20	81.36
101	8	25	97	76.63	205.23	106	8	16	95	72.73	82.50
101	9	15	97	80.18	193.15	106	9	20	95	72.40	81.78
101	4	7	98	77.71	188.83	106	1	24	96	69.30	64.56
101	3	30	99	78.44	190.42	106	8	12	96	72.38	76.52
101	6	7	99	78.50	180.17	106	9	28	96	74.30	79.44
102	2	10	94	72.65	150.03	106	10	15	96	72.50	73.54
102	5	11	94	73.15	147.00	106	1	27	97	71.50	71.93
102	9	9	94	72.64	141.00	106	6	16	97	69.36	71.73
102	12	8	94	73.84	134.98	106	2	26	98	73.04	72.23
102	6	27	95	71.80	138.49	106	10	7	98	93.60	80.72
102	9	6	95	71.20	136.04	107	3	23	95	99.04	45.28
102	9	12	95	71.40	139.55	107	5	23	95	96.25	44.50
102	5	6	96	71.06	137.05	107	9	28	95	96.57	46.30
102	11	7	96	70.96	133.37	107	11	14	97	94.47	33.37
102	1	29	97	70.80	132.54	107	7	1	98	93.87	33.66
102	10	9	97	71.28	124.35	108	7	11	95	76.80	129.51
102	12	27	97	70.93	123.59	108	8	20	96	77.00	129.33
102	4	2	98	69.49	120.00	108	7	18	97	105.84	22.59
102	9	2	98	66.02	121.28	108	7	18	97	105.84	103.28
102	2	3	99	65.23	117.18	108	7	21	97	79.18	113.25
102	5	5	99	70.48	106.08	108	8	27	97	79.22	108.25
103	3	24	93	97.00	105.75	108	11	10	97	81.87	108.01
103	3	26	93	95.11	132.26	108	12	4	97	78.75	92.90
103	12	13	93	84.09	91.46	108	2	17	98	79.74	98.59
103	5	19	94	74.67	185.61	108	10	15	98	89.61	96.82
103	5	19	94	94.04	132.29	108	10	22	98	90.93	116.71
103	7	29	94	94.04	194.24	108	11	19	98	94.30	125.97
103	10	17	96	94.08	196.01	108	11	19	98	93.04	121.39
103	1	9	97	93.59	134.72	108	11	26	98	86.24	105.50
103	1	9	97	93.59	194.24	108	11	26	98	85.52	103.62
103	8	27	97	95.73	240.70	108	3	16	99	83.91	88.44
103	12	4	97	94.75	170.01	108	6	29	99	85.90	88.44
103	3	30	98	95.70	184.60	109	8	25	94	61.44	21.00
103	6	18	98	95.73	205.99	109	6	26	95	65.02	26.50
103	6	18	98	95.75	151.80	109	10	5	95	65.71	27.66

109	4	2	96	64.94	25.43	115	5	10	94	87.60	36.32
109	6	14	96	65.89	25.60	115	5	10	94	87.57	183.00
109	8	13	96	68.06	30.55	115	7	28	94	91.28	27.47
109	10	30	96	67.28	28.58	115	7	28	94	93.02	212.00
109	9	8	97	68.87	30.97	115	8	8	94	93.02	41.13
109	11	25	97	66.85	27.40	115	10	3	95	93.70	33.38
109	3	4	98	66.06	25.80	115	1	26	96	93.43	291.01
109	7	16	98	65.32	26.51	115	4	18	96	94.95	255.95
109	1	5	99	67.12	26.53	115	4	18	96	94.95	32.74
109	2	19	99	65.11	23.82	115	10	21	96	95.00	244.58
109	5	12	99	31.00	22.16	115	10	21	96	95.00	31.60
111	1	21	97	74.87	110.87	115	6	12	97	92.89	225.56
111	5	28	97	75.72	112.48	115	6	12	97	92.89	24.47
111	10	24	97	71.63	114.00	115	6	17	97	92.05	220.50
111	12	18	97	72.28	113.68	115	6	17	97	92.05	28.08
111	3	5	98	72.58	115.89	115	6	23	97	94.77	248.57
111	4	15	98	71.59	115.22	115	6	23	97	94.77	37.45
111	5	19	98	71.34	117.83	115	6	25	97	95.20	243.54
111	5	22	98	70.78	112.19	115	6	25	97	95.00	32.96
111	5	25	98	67.09	92.25	115	10	3	97	96.85	240.62
111	6	22	98	67.44	89.50	115	10	3	97	96.85	28.82
111	6	23	98	67.83	91.78	115	12	10	97	96.76	239.38
111	6	26	98	67.78	90.71	115	12	10	97	96.85	24.05
111	7	2	98	67.72	90.07	115	2	20	98	96.13	244.48
111	8	3	98	61.43	45.63	115	2	20	98	96.16	26.82
111	8	14	98	62.23	49.24	115	2	20	98	96.15	20.24
111	8	20	98	61.88	50.21	115	7	15	98	96.54	239.74
111	8	21	98	62.58	51.92	115	7	15	98	96.54	20.24
111	9	3	98	62.51	50.37	115	12	17	98	98.06	231.85
111	12	22	98	63.11	52.11	115	12	17	98	98.06	18.09
111	1	11	99	62.84	54.06	115	3	26	99	96.20	220.96
112	8	19	95	49.35	79.08	115	3	26	99	96.20	17.62
112	10	1	96	42.75	56.50	115	4	12	99	96.78	222.72
112	10	18	96	46.90	67.91	115	4	12	99	96.78	18.05
112	1	20	97	39.25	42.56	116	6	1	95	92.50	100.20
112	2	5	97	37.59	38.27	116	6	9	95	96.70	67.45
112	4	23	97	41.25	83.47	116	6	12	95	96.38	127.35
112	4	16	97	41.20	88.48	116	7	25	95	97.30	129.35
112	4	16	97	40.98	84.27	116	8	30	95	95.47	116.64
112	9	17	97	42.59	76.67	116	4	2	96	96.32	119.33
112	2	18	98	42.95	79.72	116	6	3	96	97.40	117.24
112	2	18	98	42.66	77.69	116	9	27	96	96.35	108.46
112	1	25	99	44.78	83.95	116	10	16	96	95.83	105.02
112	1	25	99	44.79	83.37	116	1	2	97	95.85	206.46
112	3	25	99	42.30	75.51	116	6	26	97	95.67	100.22
112	6	24	99	43.09	72.84	116	7	18	97	95.84	99.25
112	6	24	99	42.85	71.97	116	8	19	97	97.06	98.82
114	1	21	94	55.57	86.67	116	10	23	97	96.68	94.25
114	5	4	94	55.58	69.00	116	1	16	98	96.46	89.35
114	9	5	94	56.14	65.00	116	1	29	98	96.53	91.01
114	10	10	94	55.76	66.00	116	4	1	98	94.74	86.42
114	1	5	95	54.43	66.56	116	7	21	98	95.33	84.43
114	8	17	95	54.64	62.72	116	2	12	99	94.16	78.03
114	2	21	96	53.10	58.65	116	3	17	99	94.19	77.42
114	5	3	96	53.43	57.02	116	4	9	99	94.74	76.71
114	7	4	96	53.12	56.14	116	7	21	99	93.47	75.24
114	11	1	96	53.20	56.38	118	6	27	94	105.39	39.93
114	1	23	97	52.75	55.63	118	11	17	94	105.99	37.08
114	7	14	97	51.45	52.10	118	3	13	95	109.68	89.50
114	9	26	97	52.20	51.34	118	6	6	95	103.76	76.46
114	11	6	97	51.29	49.75	118	6	10	97	104.92	90.98
114	3	3	98	49.79	49.33	118	6	12	97	104.75	79.38
114	7	16	98	50.26	56.76	118	7	22	97	104.96	69.46
114	7	23	98	51.23	58.19	118	10	23	97	106.26	78.12
114	9	29	98	53.02	57.79	118	1	8	98	105.65	91.06
114	10	1	98	52.98	58.57	118	1	29	98	106.42	61.56
114	10	6	98	53.40	58.80	118	6	3	98	106.44	65.20
114	10	26	98	53.71	60.99	118	7	28	98	108.06	86.37
114	3	3	99	53.75	61.00	118	2	22	99	105.85	75.19

119	7	8	87	50.00	33.40	123	9	6	96	102.50	153.90
119	7	17	87	78.10	40.14	123	9	9	96	113.43	153.43
119	7	22	87	77.80	115.59	123	9	24	96	120.70	231.54
119	11	25	87	82.50	100.60	123	11	27	96	121.45	229.45
119	5	5	89	86.00	106.06	123	1	15	97	121.41	227.14
119	4	25	94	91.00	105.00	123	4	25	97	120.84	222.42
119	9	2	94	91.30	102.00	123	6	9	97	120.00	218.08
119	1	2	95	96.12	94.32	123	6	11	97	120.45	218.87
119	3	9	95	89.45	92.00	123	1	22	98	122.70	220.94
119	5	15	95	83.82	96.35	123	5	13	98	121.21	223.88
119	9	18	95	56.70	33.29	123	6	3	98	121.02	221.38
119	9	19	95	61.97	60.33	123	7	24	98	121.70	221.26
119	1	23	96	62.68	58.85	123	10	26	98	121.91	216.70
119	10	4	96	78.27	72.71	123	2	19	99	121.38	216.17
119	10	8	96	82.15	82.21	124	3	7	94	133.70	229.72
119	2	4	97	84.13	86.40	124	11	3	94	114.19	113.26
119	6	3	97	86.00	88.64	124	3	1	95	137.55	118.89
119	11	7	97	89.08	95.77	124	5	6	96	136.96	108.65
119	2	5	98	89.27	99.13	124	7	9	96	137.30	107.37
119	6	18	98	88.94	89.70	124	11	4	96	138.57	195.60
119	1	4	99	88.39	91.25	124	1	14	97	137.45	192.63
120	7	8	93	98.45	72.56	124	1	8	98	139.91	225.03
120	7	14	93	97.66	71.00	124	4	17	98	139.43	220.82
120	7	29	93	99.80	77.86	124	9	3	98	138.35	220.55
120	10	5	93	104.46	86.72	125	8	31	93	84.03	134.18
120	11	29	93	110.43	98.58	125	12	9	93	88.96	136.59
120	2	22	94	115.83	112.73	125	2	10	94	82.20	133.24
120	3	8	94	116.11	113.15	125	5	30	94	82.07	126.00
120	8	30	94	113.22	112.00	125	11	23	94	81.44	121.53
120	12	1	94	111.03	109.12	125	2	6	95	80.80	125.20
120	3	10	95	109.06	101.59	125	5	24	95	79.76	125.81
120	5	15	95	117.00	98.80	125	10	9	95	79.38	124.62
120	7	11	95	85.80	38.61	125	1	24	96	83.14	136.56
120	8	16	95	95.04	66.29	125	11	25	96	81.77	131.93
120	8	17	95	111.90	112.54	125	2	13	97	81.34	128.25
120	3	4	96	108.20	99.49	125	12	27	97	68.30	99.35
120	5	16	96	107.90	94.18	125	2	25	98	83.33	126.33
120	7	30	96	107.65	92.39	125	2	26	98	83.54	137.54
120	11	1	96	106.37	87.84	125	12	14	98	90.72	138.70
120	1	21	97	105.86	88.14	125	3	24	99	83.98	141.21
120	6	24	97	105.81	84.31	126	8	4	87	153.10	194.96
120	11	6	97	106.98	84.53	126	5	3	94	160.81	150.00
120	1	29	98	107.79	84.05	126	10	6	94	160.95	145.00
120	4	14	98	106.38	81.49	126	1	9	95	160.59	141.77
120	8	25	98	103.95	79.31	126	7	17	95	160.00	141.11
120	11	3	98	104.30	78.68	126	9	8	95	161.28	146.40
120	2	11	99	103.10	79.40	126	1	25	96	162.50	149.93
120	4	8	99	103.23	69.72	126	10	14	96	162.10	133.75
120	4	26	99	102.00	68.49	126	3	12	97	162.31	130.81
121	9	10	96	75.30	52.26	126	8	11	97	167.40	137.40
121	10	1	96	76.35	57.85	126	4	3	98	163.92	133.43
121	11	18	96	75.80	51.91	126	8	4	98	162.58	135.65
121	12	9	96	76.77	58.35	126	1	28	99	164.00	125.89
121	1	27	97	77.05	58.35	126	4	13	99	164.48	120.03
121	6	9	97	78.12	60.05	126	7	23	99	163.72	116.40
121	7	18	97	77.85	60.18	127	7	21	87	71.95	80.61
123	8	3	87	102.75	229.55	127	8	24	87	72.00	78.78
123	10	13	87	102.50	235.23	127	11	5	87	74.32	104.50
123	8	23	93	110.30	172.24	127	11	24	87	77.23	140.26
123	12	8	93	111.07	163.38	127	1	28	88	102.50	149.56
123	1	13	94	109.96	165.46	127	8	20	93	104.32	310.53
123	1	24	94	109.44	163.69	127	10	15	93	103.18	290.92
123	3	7	94	110.05	164.00	127	12	8	93	104.00	288.57
123	5	27	94	109.78	161.00	127	12	10	93	100.52	258.90
123	5	31	94	116.73	239.00	127	1	17	94	98.79	254.95
123	4	15	96	119.80	220.94	127	2	18	94	98.24	257.94
123	5	28	96	119.30	219.24	127	5	23	94	99.08	276.00
123	8	23	96	229.26	211.74	127	8	17	94	99.57	264.00
123	8	30	96	119.18	208.01	127	12	28	94	13.58	229.50

127	7	13	95	97.40	225.21	130	8	28	98	102.11	50.74
127	8	11	95	97.43	212.15	130	2	10	99	102.69	55.75
127	4	22	96	97.30	216.84	131	1	29	93	119.80	243.53
127	6	17	96	98.73	211.74	131	5	20	93	122.61	238.30
127	7	4	96	99.15	208.54	131	6	1	93	122.64	239.58
127	9	29	96	99.57	212.09	131	6	29	93	122.60	241.61
127	1	7	97	99.75	213.49	131	9	15	93	123.08	240.97
127	8	14	97	109.37	299.94	131	10	25	93	121.50	242.25
127	8	20	97	109.57	302.71	131	12	15	93	123.64	236.28
127	10	30	97	110.02	302.26	131	1	13	94	121.60	239.58
127	2	9	98	110.24	303.93	131	8	8	94	126.29	270.00
127	2	17	98	105.87	274.82	131	8	12	94	122.46	203.00
127	7	6	98	105.91	266.03	131	10	4	94	122.51	203.00
127	10	23	98	106.83	256.25	131	11	11	94	127.00	283.99
127	3	8	99	106.79	256.37	131	2	16	95	126.49	279.25
127	4	6	99	106.90	250.46	131	2	16	95	126.48	279.25
127	5	20	99	105.95	248.01	131	5	16	95	125.30	282.82
129	1	27	93	150.60	173.29	131	8	8	95	126.28	258.10
129	3	16	93	151.11	177.13	131	7	20	98	128.86	225.63
129	9	16	93	148.45	181.47	131	7	24	98	129.19	226.79
129	11	11	93	153.20	166.93	131	10	19	98	129.12	222.22
129	11	16	93	161.38	194.90	131	12	28	98	128.67	219.28
129	12	3	93	163.28	197.02	131	1	27	99	125.69	218.08
129	1	4	94	161.95	198.43	133	8	30	94	75.62	322.00
129	1	19	94	161.40	197.02	133	11	9	94	75.82	326.16
129	2	22	94	160.72	194.09	133	4	4	95	78.00	348.36
129	5	19	94	159.35	186.00	133	6	27	95	78.70	348.61
129	7	20	94	151.90	159.00	133	7	28	95	79.06	345.40
129	8	29	94	152.82	159.00	133	8	3	95	78.98	346.50
129	11	8	94	152.94	159.24	133	2	13	96	80.10	345.49
129	11	16	94	161.10	185.54	133	2	28	96	79.90	339.74
129	12	1	94	158.97	174.00	133	5	16	96	79.64	337.97
129	2	15	95	159.25	172.00	133	8	22	96	82.03	333.60
129	10	6	95	158.60	185.87	133	11	6	96	82.10	328.90
129	2	29	96	160.00	177.18	133	1	27	97	83.12	333.83
129	5	14	96	160.67	172.85	133	4	23	97	75.34	291.57
129	8	12	96	158.12	172.24	133	4	30	97	77.64	303.23
129	11	6	96	157.80	169.34	133	6	12	97	86.87	342.45
129	1	13	97	157.27	165.92	133	12	2	97	88.44	332.73
129	10	15	97	156.70	158.36	133	12	9	97	89.80	335.35
129	4	13	98	159.45	176.75	133	4	14	98	87.19	326.94
129	8	28	98	157.63	161.77	133	5	12	98	73.26	267.03
129	1	22	99	159.35	160.80	133	6	2	98	78.04	284.77
129	4	14	99	159.29	159.37	133	6	15	98	73.42	267.02
129	6	23	99	158.60	158.95	133	6	29	98	75.97	280.03
130	4	29	96	103.84	58.59	133	7	14	98	78.27	286.42
130	7	4	96	103.70	57.60	133	12	17	98	82.29	284.77
130	10	14	96	103.58	55.40	133	1	21	99	83.33	290.56
130	1	30	97	102.70	55.00	133	2	5	99	82.91	281.85
130	10	17	97	104.56	53.23	133	2	25	99	83.72	288.53
130	12	29	97	104.17	52.78	133	3	2	99	82.03	285.82
130	3	27	98	102.67	52.22						

## **IX. ANEXOS**

### **ANEXO A – Dados da FIPAI**

A FIPAI (Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial), em seu Relatório Técnico do Projeto de Gestão de Qualidade de Águas Subterrâneas (volume I), em estudo solicitado pelo DAERP, compilou os dados dos poços, como dispostos a seguir.





## X. GLOSSÁRIO<sup>14</sup>

*Abstração*: ver exploração.

*Águas Subterrâneas*: águas que ocorrem natural ou artificialmente no subsolo, de forma suscetível de extração e utilização pelo homem.

*Aquífero Confinado*: aquele situado entre duas camadas de materiais confinantes, contendo água com pressão suficiente para elevá-la acima do seu topo ou da superfície do solo.

*Aquífero*: solo, rocha ou sedimento permeáveis, capazes de fornecer águas subterrâneas, naturais ou artificialmente captadas, classificado como poroso, fraturado ou cárstico.

*Capacidade Específica*: Volume de água libertado ou extraído por unidade de volume do aquífero e por unidade de variação da carga hidráulica correspondente.

*Contaminação*: forma de poluição em que o nível de concentração ou ausência/presença seja enquadrado fora dos limites estabelecidos legalmente.

*Depleção*: redução da reserva de água subterrânea, em consequência de extração efetuada em quantidade superior à alimentação do aquífero.

*Exploração*: em hidrogeologia, usado para definir a retirada de água de um aquífero, podendo ser medido pelo volume de água obtido, expresso geralmente em m<sup>3</sup>/ano. (sin. abstração)

*Poço Artesiano*: poço perfurado em aquífero cujo nível de água eleva-se acima da superfície topográfica (sin. poço jorrante).

*Poço ou Obra de Captação*: qualquer obra, sistema, processo, artefato ou sua combinação empregados pelo homem com o fim principal ou incidental de extrair água subterrânea.

*Poço Tubular*: poço de diâmetro reduzido e perfurado com equipamento especializado.

*Poluente*: toda e qualquer forma de matéria ou energia que, direta ou indiretamente, cause poluição das águas subterrâneas.

*Poluição*: qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas de um recurso natural, no caso, águas subterrâneas, que possa ocasionar prejuízo à saúde, à segurança e ao bem-estar das populações, comprometer seu uso para fins de consumo humano, agropecuários, industriais, comerciais e recreativos, e causar danos à flora e à fauna.

*Usuário*: o proprietário ou detentor de poço, sistema de poços ou de captação de águas subterrâneas.

---

<sup>14</sup> baseado nas definições legais do Decreto nº 32.955 (de 07/Fev/1991), Margat (1992) e Glossário Internacional de Hidrologia (<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/HINDPT.HTM>), com modificações

