UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MODELAÇÃO MATEMÁTICA TRIDIMENSIONAL PARA A
PROTEÇÃO DAS CAPTAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

MARA AKIE IRITANI

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças	
Examinadores:	Prof. Dr. Celso de Oliveira Loureiro	
	Prof. Dr. Chang Hung Kiang	
	Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata	
	Dr. Rodrigo César de Araújo Cunha	

SÃO PAULO
1999

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005318

**MODELAÇÃO MATEMÁTICA TRIDIMENSIONAL
PARA A PROTEÇÃO DAS CAPTAÇÕES DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA**

Mara Akie Iritani

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

1998

A meus pais

AGRADECIMENTOS

A autora gostaria de deixar registrado seu profundo agradecimento a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, ao Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças por sua orientação e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho, e também durante toda a minha vida profissional até o momento.

Ao Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (IG/SMA), na pessoa da Diretora Geral, a Sra. Márcia Maria Nogueira Pressinotti, pelo suporte, pela infra-estrutura e pela liberação para dedicação exclusiva à tese durante a fase de finalização.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, em particular ao Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada, pela infra-estrutura fornecida e oportunidade de realização deste estudo. E aos professores Dr. Uriel Duarte, Dr^a Annkarin Aurélia Kimmelman e Silva, Dr^a Dorothy C. P. Casarini, Dr. Alberto Pacheco e Dr. José Milton B. Mendes pelos cursos ministrados e pelo estímulo ao trabalho.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), na pessoa do Sr. João Carlos Simanke de Souza, pelo apoio no estudo e pelo fornecimento dos dados dos poços.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, regional de Caçapava, nas pessoas do Eng^o Luiz Antonio R. Ferro e do Eng^o Eduardo Roston, pelo apoio e pelo fornecimento dos dados dos poços.

À Waterloo Hydrogeologic Inc. (WHI), nas pessoas do Dr. Nilson Guiguer, Dr. Robert Cleary e Dr. Thomas Franz, pelo apoio, discussões e doação dos aplicativos matemáticos utilizados neste estudo.

À Canadian International Development Agency (CIDA) pelo apoio financeiro ao estudo.

À CAPES pelo fornecimento de bolsa de estudo nas etapas iniciais deste estudo.

À Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), regional de Taubaté, na pessoa da Eng^a Maria Judith M. S. Schmidt, pela ajuda no levantamento das indústrias.

À Prefeitura Municipal de Caçapava, nas pessoas do Sr. Washington e do Arquiteto Clóvis, pelo apoio e pelo fornecimento de dados.

Às empresas de perfuração que atuam na região, principalmente à Hidrogesp, regional de São José dos Campos, pelo fornecimento de todas as fichas completas de poços perfurados no município.

Ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), pelo fornecimento de dados do cadastro estadual de poços tubulares.

À Miriam Gutjahr pela tradução do resumo.

A Ricardo Hirata pelo apoio e discussões para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo e geólogo Alexandre Magno de Souza Maximiano pela ajuda nos trabalhos de campo, de digitalização e edição do trabalho.

À geógrafa Elisabete Sousa Maia pelo ajuda no levantamento dos dados, nos trabalhos de campo e de digitalização dos mapas.

Aos geólogos Dennis D. German e Daniel Gomes Caminero pelo apoio e discussões durante a modelação matemática. E também a Karen Nova e a Sergei Shmakov pelo apoio na resolução dos "bugs" dos programas utilizados.

Aos funcionários do Instituto Geológico, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. E também a todos os funcionários da Waterloo Hydrogeologic Inc., pelo apoio fornecido durante meu período no Canadá.

Cabe um agradecimento especial aos meus amigos que sempre me apoiaram mesmo nos momentos mais críticos de finalização da tese.

A Geraldo Hideo Oda, Luciana M. R. Ferreira e, em especial, a Seiju Hassuda, pelas discussões, críticas, revisões do texto e apoio no desenvolvimento dos trabalhos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ANEXOS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. Introdução	1
2. Objetivo	3
3. A Proteção da água subterrânea no Estado de São Paulo	3
4. Proteção de Poços e Outras Captações	5
4.1. Terminologia e critérios para a delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações	5
4.2. Classificação dos métodos para delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações	10
5. Modelação matemática	19
5.1. Princípios básicos	20
5.1.1. Equação de fluxo da água subterrânea	20
5.1.2. Condições iniciais	25
5.1.3. Condições de contorno	25
5.1.4. Caminhamento de partículas	26
5.2. Procedimentos da modelação matemática	29
5.2.1. Modelo conceitual	29
5.2.2. Escolha do aplicativo matemático	30
5.2.3. Elementos do modelo matemático	30
5.2.4. Calibração do modelo	38
5.2.5. Análise de sensibilidade	39
6. Aplicação da modelação matemática tridimensional no município de Caçapava	40
6.1. Caracterização da área	40
6.1.1. Localização	40
6.1.2. Geologia regional	40
6.1.3. Hidrogeologia regional	46
6.2. Metodologia	49
6.2.1. Levantamento das informações existentes	51

6.2.2. Definição das unidades hidroestratigráficas	55
6.2.3. Testes de bombeamento	55
6.2.4. Avaliação dos níveis de água dos poços	60
6.2.5. Determinação do escoamento básico e da taxa de recarga	60
6.2.6. Modelação matemática	66
6.2.7. Avaliação dos resultados e dos riscos associados às áreas de captura	66
6.3. Modelo conceitual	66
6.3.1. Unidades hidroestratigráficas	66
6.3.2. Determinação dos parâmetros hidráulicos	78
6.3.3. Uso da água subterrânea	90
6.3.4. Fluxo da água subterrânea	94
6.3.5. Monitoramento dos poços da SABESP	96
6.3.6. Balanço hídrico	100
6.3.7. Disponibilidade hídrica	107
7. Modelo matemático de água subterrânea	108
7.1. Escolha do aplicativo matemático	108
7.2. Discretização da área modelada	110
7.3. Definição das unidades hidráulicas e seus parâmetros hidrogeológicos	112
7.4. Definição das condições de contorno	119
7.5. Poços de bombeamento	123
7.6. Parâmetros de calibração	125
7.7. Calibração do modelo matemático	132
7.8. Análise de sensibilidade	135
8. Avaliação dos resultados do modelo matemático	137
8.1. Avaliação do fluxo da água subterrânea calculado pelo modelo matemático	137
8.2. Zonas de Contribuição	147
8.3. Zonas de Transporte	156
8.4. Riscos associados às zonas de transporte	161
8.5. Medidas preventivas	164
8.6. O modelo matemático como ferramenta do gerenciamento	167
9. Limitações	167
9.1. Limitações do programa MODFLOW	167
9.2. Limitações da modelação matemática	168
9.3. Limitações do modelo matemático desenvolvido	169

10. Viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional em função da qualidade dos dados existentes	170
11. Alcance da aplicação da modelação matemática tridimensional	173
12. Considerações finais	177
13. Conclusões e recomendações	184
Referências Bibliográficas	187

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 4.1. Traçado da Zona de Transporte (ZT) de uma captação (modificado de Lerner 1992)	7
Figura 4.2. Delimitação da Zona de Contribuição (ZC) através da identificação das fronteiras de fluxo (USEPA 1987)	8
Figura 4.3. Relação entre a Zona de Contribuição (ZC) e a Zona de Influência (ZI) em aquíferos com superfície potenciométrica inclinada (Witten et al. 1995)	9
Figura 4.4. Zona de Contribuição definida com base no método analítico de "Fluxo Uniforme". Vista em seção vertical (A) e em planta (B) (Morrissey 1989)	15
Figura 4.5. Efeito da heterogeneidade do aquífero na direção de fluxo da água subterrânea (USEPA 1991a)	16
Figura 5.1. Representação do volume elementar de um aquífero (Fetter 1988)	21
Figura 5.2. Representação da malha de diferenças finitas e elementos (Anderson & Woessner 1992)	24
Figura 5.3. Exemplo de condições de contorno (Cleary 1989)	26
Figura 5.4. Localização dos pontos para o cálculo de v_x e v_y por interpolação linear para determinação do caminhamento de partículas e das linhas de trajetória (modificado de Anderson & Woessner 1992)	28
Figura 5.5. Ilustração de algumas condições de contorno utilizadas pelo programa MODFLOW. Situação real (a) e situação simulada (b) (McDonald & Harbaugh 1988)	32
Figura 5.6. Ilustração da condição de contorno "rio" utilizada no programa MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988)	34
Figura 5.7. Ilustração da condição de contorno "dreno" utilizada no programa MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988)	35
Figura 5.8. Ilustração da condição de contorno "carga hidráulica genérica" utilizada no programa MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988)	36
Figura 5.9. Determinação da taxa de bombeamento em cada camada do modelo considerando um poço atravessando diversas camadas	37
Figura 6.1. Localização do município de Caçapava	40
Figura 6.2. Domínios estruturais da região do Vale do Paraíba segundo IPT (1990)	41
Figura 6.3. Evolução da nomenclatura litoestratigráfica das unidades sedimentares da Bacia de Taubaté (IPT 1990)	43
Figura 6.4. Coluna estratigráfica das unidades da Bacia de Taubaté (Mancini 1995)	45
Figura 6.5. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté (Fernandes 1993)	47
Figura 6.6. Mapa potenciométrico da Bacia de Taubaté (DAEE 1977a)	50
Figura 6.7. Metodologia empregada na aplicação da modelação matemática tridimensional no município de Caçapava	52

Figura 6.8.	Localização dos poços do município de Caçapava	53
Figura 6.9.	Localização das indústrias e áreas com tanques para armazenamento de combustíveis cadastrados no município de Caçapava	56
Figura 6.10.	Curva-padrão de Neuman (Freeze & Cherry 1979)	59
Figura 6.11.	Elementos de uma bacia hidrográfica (Ramos 1989)	61
Figura 6.12.	Componentes do escoamento total (Ward & Robinson 1990)	61
Figura 6.13.	Hidrograma total e a separação do escoamento subterrâneo pelo método gráfico de união do início da ascensão e do final da recessão (Ward & Robinson 1990)	62
Figura 6.14.	Método das equações de Meyboom para determinação do escoamento básico (modificado de Meyboom 1961)	63
Figura 6.15.	Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos no município de Caçapava	65
Figura 6.16.	Mapa geológico do município de Caçapava	67
Figura 6.17.	Modelo conceitual da disposição das unidades hidroestratigráficas da região estudada	68
Figura 6.18.	Mapa de contorno estrutural do topo do Embasamento Cristalino na porção sul do município de Caçapava	70
Figura 6.19.	Seção geológica A-A' e a definição das camadas do modelo matemático	71
Figura 6.20.	Seção geológica B-B' e a definição das camadas do modelo matemático	72
Figura 6.21.	Seção geológica C-C' e a definição das camadas do modelo matemático	73
Figura 6.22.	Seção geológica D-D' e a definição das camadas do modelo matemático	74
Figura 6.23.	Seção geológica E-E' e a definição das camadas do modelo matemático	76
Figura 6.24.	Intepretação dos testes de bombeamento pelo método de Neuman utilizando o programa Aquifer Test	80
Figura 6.25.	Intepretação dos testes de bombeamento pelo método de Theis (a) e Cooper-Jacob (b) utilizando o programa Aquifer Test	81
Figura 6.26.	Influência do material ao redor do poço no teste de bombeamento (Butler 1990)	82
Figura 6.27.	Relação dos dados de capacidade específica e transmissividade com as retas teóricas para aquíferos livre e confinado	88
Figura 6.28.	Correlação da capacidade específica com a transmissividade obtida a partir dos testes de bombeamento calculados pelo método de Neuman	89
Figura 6.29.	Distribuição dos valores de condutividade hidráulica calculados pela equação de correlação entre a capacidade específica e a transmissividade	91
Figura 6.30.	Distribuição da vazão de exploração dos poços no município de Caçapava	93
Figura 6.31.	Mapa potenciométrico da porção central do município de Caçapava do período de 1950 a 1970 e de 1970 a 1984	95

Figura 6.32. Mapa potenciométrico da porção central do município de Caçapava do período de 1987 a 1997	97
Figura 6.33. Tempo de funcionamento dos poços de abastecimento da SABESP (h/dia)	98
Figura 6.34. Variação do nível da água dos poços de abastecimento da SABESP	99
Figura 6.35. Variação da vazão dos poços de abastecimento da SABESP	101
Figura 6.36. Método gráfico para determinação do escoamento básico (a) pela união dos pontos de início da ascensão e final da recessão e (b) através da utilização das equações de Meyboom	103
Figura 7.1. Área considerada para a modelação matemática	111
Figura 7.2. Discretização da grade do modelo matemático utilizada na situação 'sem bombeamento' e 'com bombeamento'	113
Figura 7.3. Visualização do topo e da base das camadas e a discretização da grade do modelo matemático no eixo z	114
Figura 7.4. Superfície das camadas do modelo matemático	115
Figura 7.5. Distribuição das unidades hidráulicas nas Camadas 1 e 2 do modelo matemático	117
Figura 7.6. Condições de contorno do modelo matemático	120
Figura 7.7. Distribuição das taxas de recarga utilizadas no modelo matemático	122
Figura 7.8. Dados de entrada para os poços de bombeamento	124
Figura 7.9. Poços de bombeamento considerados ativos no modelo matemático simulado na situação 'com bombeamento'	126
Figura 7.10. Poços utilizados como pontos de observação do nível d'água, (a) na situação 'sem bombeamento' e (b) na situação 'com bombeamento'	127
Figura 7.11. Zonas específicas para o cálculo do balanço hídrico através do programa ZONEBUDGET no modelo matemático	129
Figura 7.12. Calibração do modelo matemático - Situação 'sem bombeamento' e 'com bombeamento'. Carga hidráulica observada x Carga hidráulica calculada pelo modelo	134
Figura 8.1. Mapa potenciométrico calculado pelo modelo matemático na situação 'sem bombeamento'	138
Figura 8.2. Mapa potenciométrico calculado pelo modelo matemático considerando a vazão real dos poços em funcionamento em maio/1996	139
Figura 8.3. Zona de Contribuição (ZC) dos poços de abastecimento do município de Caçapava	141
Figura 8.4. Influência da transmissividade do aquífero e da vazão bombeada na forma das áreas de captura dos poços considerando um aquífero homogêneo, isotrópico com superfície potenciométrica inicialmente horizontal	140
Figura 8.5. Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SA18 e SA19 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	143

Figura 8.6.	Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas no poço SA13 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático.	144
Figura 8.7.	Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SA21A e SA22 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	144
Figura 8.8.	Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas no poço SAVM1 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	145
Figura 8.9.	Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SACV1, SACV2 e SACV3 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	145
Figura 8.10.	Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SAGU2, SAGU5 e SAGU6 nas Camadas 1, 2 e 3 do modelo matemático	146
Figura 8.11.	Interferência na Zona de Contribuição de poços próximos (SA24 e SA25)	148
Figura 8.12.	Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SA20 e SA21 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	149
Figura 8.13.	Zonas de Transporte de 50 anos formadas pelas partículas colocadas na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	151
Figura 8.14.	Zonas de Transporte de 50 anos para os poços em Caçapava Velha formadas pelas partículas colocadas na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	152
Figura 8.15.	Zonas de Transporte de 50 anos para os poços de Guamirim formadas pelas partículas colocadas na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático	153
Figura 8.16.	Zona de Transporte para 10 e 50 anos de tempo de trânsito	155
Figura 8.17.	Avaliação do risco de contaminação associado à Zona de Transporte para 10 anos de tempo de trânsito	158
Figura 8.18.	Avaliação do risco de contaminação associado à Zona de Transporte para 50 anos de tempo de trânsito	159
Figura 8.19.	Utilização de poços "sentinelas" para monitorar a qualidade da água subterrânea nas zonas de transporte	163
Figura 8.20.	A superfície potenciométrica sob a influência do funcionamento dos poços SA26, SA27 e SAGU7	165
Figura 8.21.	Influência de dois novos poços de bombeamento na superfície potenciométrica	166
Figura 11.1.	Esquema de priorização para a definição de áreas de proteção de captações de água subterrânea	178

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 4.1. Fatores que afetam a escolha do critério para a delimitação do Perímetro de Proteção de Poços e Outras Captações	11
Tabela 4.2. Algumas das vantagens e desvantagens na escolha de cada critério para delimitação do Perímetro de Proteção de Poços e Outras Captações	12
Tabela 4.3. Conceitos de vulnerabilidade utilizados em alguns trabalhos recentes	18
Tabela 6.1. Postos pluviométricos e fluviométricos do município de Caçapava	54
Tabela 6.2. Parâmetros hidráulicos calculados a partir de testes de bombeamento utilizando os métodos de Theis, Cooper-Jacob e Neuman	83
Tabela 6.3. Intervalo de valores de coeficiente de armazenamento específico (S_s) (Domenico 1972 <i>apud</i> Anderson & Woessner 1992)	85
Tabela 6.4. Valores de porosidade total e porosidade específica para rochas sedimentares (Morris & Johnson 1967)	86
Tabela 6.5. Coeficiente de correlação entre a capacidade específica dos poços e a transmissividade calculada pela interpretação dos testes de bombeamento	87
Tabela 6.6. Perfil dos usuários da água subterrânea e a situação dos poços	92
Tabela 6.7. Volume explorado pelos poços atualmente ativos em maio/1996 de acordo com a classe de proprietários	92
Tabela 6.8. Volume de exploração dos poços da SABESP por região	94
Tabela 6.9. Valores médios de escoamento básico e taxa de recarga obtidos por métodos gráficos clássicos	104
Tabela 6.10. Relação do deflúvio total e do escoamento básico dos córregos Caçapava Velha e Divisa	105
Tabela 6.11. Balanço hídrico da bacia do córrego Caçapava Velha	105
Tabela 6.12. Índices de perda calculados com base nos dados de SABESP (1995) para o período de junho/92 a maio/93	106
Tabela 7.1. Parâmetros hidráulicos adotados no modelo matemático	118
Tabela 7.2. Valores de condutância (m^2/d) utilizados na condição de contorno de carga hidráulica genérica	121
Tabela 7.3. Valores de escoamento básico utilizados na calibração do modelo no cenário 'sem bombeamento'	128
Tabela 7.4. Taxas de bombeamento dos poços particulares utilizados na calibração do modelo matemático na situação 'com bombeamento'	130
Tabela 7.5. Taxas de bombeamento dos poços de abastecimento público utilizados como pontos de observação na calibração do modelo matemático na situação 'com bombeamento'	131
Tabela 7.6. Resíduos calculados entre as cargas hidráulicas observadas e determinadas pelo modelo matemático	133

Tabela 7.7.	Balanço total de água no modelo matemático	133
Tabela 7.8.	Comparação entre os valores de escoamento básico calculados pelo modelo matemático e obtidos dos dados fluviométricos	135
Tabela 7.9.	Análise de sensibilidade do modelo matemático construído	136
Tabela 8.1.	Área total (m ²) das Zonas de Transporte definidas para cada poço de abastecimento	154
Tabela 11.1.	Comparação entre as áreas dos perímetros de proteção dos campos de poços de São José dos Campos, utilizando os métodos geométrico (raio fixo calculado), analítico (fluxo uniforme) e numérico (modelação matemática bidimensional) (Hirata 1994)	175
Tabela 11.2.	Comparação entre as Zonas de Transporte de 10 anos calculadas pelo método geométrico (raio fixo calculado) e pelo método numérico (modelação matemática tridimensional) no município de Caçapava	175

LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Cadastro de poços tubulares profundos do município de Caçapava	195
Anexo 2. Cadastro das indústrias potencialmente contaminantes do município de Caçapava	199
Anexo 3. Cadastro das áreas com tanques de armazenamento de combustíveis e outros líquidos perigosos do município de Caçapava	200

RESUMO

Este trabalho objetivou mostrar a viabilidade de utilização da modelação matemática tridimensional como uma metodologia a ser aplicada para a definição das Zonas de Contribuição das captações de água subterrânea.

A área piloto escolhida foi o município de Caçapava, localizado na porção leste do Estado de São Paulo, sendo 99% abastecido por água subterrânea.

O entendimento do sistema hidrogeológico, obtido através da interpretação dos dados geológicos, hidrológicos e dos poços existentes, permitiu a construção do modelo conceitual da área modelada, que foi, então, traduzido para uma forma matemática, dando origem ao modelo matemático.

Na área foram identificados dois tipos de aquíferos: o Sedimentar e o Cristalino. O Aquífero Sedimentar foi subdividido nas unidades hidrogeológicas Superior, de menor produtividade, e Inferior, principal aquífero da área.

O fluxo regional da água subterrânea é em direção ao rio Paraíba, com as drenagens secundárias atuando como áreas de descarga local. Os mapas potenciométricos construídos para diferentes períodos mostraram que a superfície potenciométrica, a partir da década de 80, vem se alterando formando um extenso cone de depressão causado pela concentração de poços de grande vazão (acima de $1000 \text{ m}^3/\text{d}$) na porção sul da zona urbana.

O balanço hídrico calculado para as bacias hidrográficas dos córregos Caçapava Velha e Divisa forneceram valores de escoamento básico de $7.193 \text{ m}^3/\text{d}$ e $17.147 \text{ m}^3/\text{d}$, respectivamente.

A partir deste modelo conceitual da área, foi construído o modelo matemático utilizando o programa tridimensional de diferenças finitas MODFLOW (desenvolvido por McDonald & Harbaugh 1988). A área modelada concentrou-se apenas na porção sul do município, em função da distribuição das informações existentes.

A calibração do modelo matemático foi efetuada considerando dois cenários. Na situação 'sem bombeamento' foi simulada a superfície potenciométrica sem a interferência de poços, utilizando os níveis de água de poços antigos e o valor do escoamento básico dos córregos Caçapava Velha e Divisa como parâmetros de calibração. A outra situação simulada foi 'com bombeamento', onde utilizou-se para a calibração, os níveis dinâmicos dos poços de abastecimento e de alguns poços particulares isolados.

A definição das Zonas de Contribuição dos poços de abastecimento, considerando a taxa de bombeamento medida em maio/1996, foi obtida utilizando-se o programa MODPATH (desenvolvido por Pollock 1989). As Zonas de Contribuição definidas apresentam uma interferência entre si devido à proximidade dos poços, sendo que abrangem grande parte da

porção sul do município, adotando-se, portanto, os tempos de trânsito de 10 e 50 anos para a avaliação do risco de contaminação.

Apenas os poços SA13, SA20, SA21, SA23, SA24 e SAVM1 apresentam maiores riscos de contaminação provenientes de áreas com tanques de armazenamento de combustíveis, de uma indústria e por acidentes na ferrovia ou na rodovia, devendo ser implantados poços de monitoramento para avaliar a qualidade da água subterrânea.

A aplicação da modelação matemática tridimensional, utilizando dados existentes, mostrou-se viável para a definição da Zona de Contribuição das captações de água subterrânea, permitindo considerar as heterogeneidades do meio e mudanças nos cenários de bombeamento, além de possibilitar a avaliação de diferentes tempos de trânsito para a delimitação dos Perímetros de Proteção. A modelação matemática permite uma maior precisão na determinação da Zona de Contribuição quando comparado a outras metodologias mais simples, promovendo uma proteção mais eficaz da água subterrânea.

Portanto, a modelação matemática tridimensional é uma ferramenta que deve ser aplicada em outros locais para fins de delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações e também para subsidiar o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

ABSTRACT

The present work had the purpose of demonstrating the viability of using the three-dimensional mathematical modeling as a methodology to be applied for the definition of Zone of Contribution of groundwater sources.

The chosen area was the Municipality of Caçapava on the East region of São Paulo State, supplied with 99% of groundwater.

The understanding of the hydrogeologic system, acquired through the interpretation of geological and hydrological data and from the existing wells, allowed the construction of the conceptual model of the area, what was converted into a mathematical form originating the three-dimensional mathematical model.

Two types of aquifers were identified in the area: the Sedimentary and the Crystalline. The Sedimentary Aquifer was subdivided into the Superior hydrogeologic unit of lower productivity and the Inferior hydrogeologic unit, the main aquifer in the area.

The regional flux of groundwater is toward Paraíba river, with the secondary drainage acting as areas of local discharge. The potentiometric maps built for different periods showed that the water table, from the years 80, are being altered forming a large cone of depression, caused by the concentration of wells of high pumping rate (above 1000 m³/d) in the South area of urban zone.

The calculated water balance for the hydrographical basins of Caçapava Velha and Divisa streams supplied baseflow values of 7193 m³/d and 17147 m³/d, respectively.

From the conceptual model of the area, a mathematical model was constructed using the three-dimensional finite difference computer code MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988). The model domain is concentrated only in the South area of the Municipality of Caçapava due to the distribution of the existing data.

The calibration of the mathematical model was done considering two situations. In the 'pre-stressed' situation it was simulated a water table without the interference of wells, using the water level of old wells and the baseflow values of Caçapava Velha and Divisa streams as calibration parameters. The other setting was called 'stressed' situation, and the dynamic level of supplying wells and some isolated wells were used for the calibration.

Considering the pumping rate measured in May/1996, the definition of the Zones of Contribution for the supplying wells was obtained through the use of MODPATH computer code (Pollock 1989). The defined Zones of Contribution spread over a large area in the South of model domain and show an interference between themselves due to wells proximity. To risk assessment of groundwater contamination, it was adopted Zones of Transport of 10 and 50 years.

Only the wells SA13, SA20, SA21, SA23, SA24 and SAVM1 showed higher contamination risks originated from storage tanks areas, from an industry and from railway and road accidents, making necessary to install monitoring wells to assess the groundwater quality.

The three-dimensional mathematical modeling application, using existing data, showed its viability for the definition of the Zones of Contribution of groundwater supplies. This tool permits to consider the heterogeneities of the hydrogeological system and changes in the pumping rates. It also allows the assessment of the different time-of-travel for delineation of Protection Areas. The mathematical modeling is more accurate in the Zone of Contribution delineation when compared to other simpler methodologies, promoting a more effective protection of groundwater.

The three-dimensional mathematical modeling is a tool that should be applied in other areas with the purpose of delimiting Wellhead Protection Areas and also to subsidize the management of groundwater resources.

1. Introdução

A água subterrânea, nas últimas décadas, tem ganhado importância no abastecimento público graças ao menor custo de exploração, principalmente em regiões com bons aquíferos, onde a viabilidade econômica leva à perfuração de poços tubulares.

Tomando o Estado de São Paulo como um exemplo, nota-se que, o uso da água subterrânea para fins de abastecimento público vem crescendo. Em 1990, 60,5% dos municípios paulistas utilizavam a água subterrânea como fonte principal ou complementar no abastecimento (São Paulo 1990). Em 1997, esta porcentagem subiu para 71,6% dos municípios paulistas (CETESB 1997), chamando a atenção para a importância da proteção deste recurso. Este panorama mostra a tendência ao crescimento da utilização da água subterrânea para o abastecimento público, levado pela viabilidade econômica, pela excelente qualidade deste recurso e pela falta de água superficial em algumas regiões. Rebouças (1998) estima que, no Brasil, existam 100.000 poços ativos e que a disponibilidade de água subterrânea de boa qualidade para consumo é cerca de 5000 m³/habitante/ano.

Este fato leva à necessidade urgente de medidas de proteção dos aquíferos, de forma geral, e principalmente das captações importantes. Witten et al. (1995) chamam a atenção para a vantagem econômica da prevenção contra a contaminação frente à recuperação de uma área contaminada. A descontaminação chega a ser 100 vezes mais custosa que a adoção de medidas preventivas, sendo que alguns aquíferos podem nunca mais ter sua qualidade natural recuperada (Bredehoeft, 1992).

Uma das estratégias de proteção atualmente existente é a implantação de perímetros de proteção das captações, estabelecida por lei e aplicada em diversos países, cada qual seguindo seus critérios de acordo com o seu cenário específico (Boulding 1995; Schleyer et al. 1992; Lallemand-Barrès 1989). Muitas vezes, a legislação nacional leva um período para ser implantada no nível estadual ou municipal, o que leva muitas localidades a estarem, atualmente, em fase de implantação dos perímetros de proteção como nas municipalidades de Waterloo (Hodgins 1996) e Halton (Holysh 1995), no Canadá.

Atualmente, no Brasil, as captações de águas minerais, destinadas à comercialização e ao uso público também deverão ser protegidas através da implantação de perímetros de proteção (Portaria DNPM nº 231 de 07/08/98).

O Estado de São Paulo refere-se à figura do perímetro de proteção das captações no seu Decreto nº 32.955/91, que regulamenta a Lei Estadual nº 6.134/88, definindo três áreas de proteção que devem ser estabelecidas com base em estudos hidrogeológicos pertinentes.

Apesar de estarem definidas na legislação estadual, estas áreas de proteção ainda não estão sendo implantadas, pois ainda não está claro quais são as metodologias existentes e quais devem ser aplicadas a cada cenário. Sabe-se que as metodologias mais simples

necessitam de menos informações técnicas sobre o sistema hidrogeológico, entretanto é comprovada sua baixa precisão na definição das áreas de captura, não constituindo uma efetiva proteção da captação. Os métodos mais elaborados, como o da modelação matemática, apesar de necessitar de mais dados, apresenta uma melhor precisão na delimitação dos perímetros de proteção, otimizando os esforços para a verdadeira área de contribuição das captações.

Dessa forma, este trabalho vem subsidiar o processo de definição dos perímetros de proteção de poços e outras captações, mostrando, a viabilidade técnica da aplicação da modelação matemática tridimensional, utilizando e organizando os dados já existentes, e indicando as informações mínimas necessárias para sua aplicação.

Na primeira parte deste trabalho é realizada uma breve introdução teórica sobre os critérios e metodologias utilizados para a definição dos perímetros de proteção de captações de água subterrânea, para ilustrar os conceitos utilizados neste trabalho. Em seguida, enfocando o objetivo final deste estudo, são descritos os princípios básicos, descrevendo os elementos e as etapas que compõem o processo da modelação matemática. Na segunda parte do trabalho, é apresentada a aplicação no município de Caçapava, área adotada como piloto, ilustrando passo a passo, a modelação tridimensional, desde o entendimento do modelo conceitual até a definição das zonas de contribuição das captações de água subterrânea utilizando o modelo matemático construído. A partir das áreas de captura definidas para as captações, faz-se uma avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas frente às atividades antrópicas já instaladas. Na parte final do trabalho é realizada uma avaliação dos alcances e limitações da modelação tridimensional proposta, e sua viabilidade de aplicação em outras localidades.

Este trabalho fez parte de um projeto maior desenvolvido conjuntamente pelo Instituto Geológico (IG/SMA), pela empresa Waterloo Hydrogeologic Inc. (WHI) e pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), contando com o apoio financeiro do governo canadense, através de sua agência financiadora, a Canadian International Development Agency (CIDA).

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi mostrar a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional para a delimitação das Zonas de Contribuição das captações de água subterrânea, como metodologia para a definição dos perímetros de proteção.

Dessa forma, objetivou-se mostrar quais os dados importantes devem ser levantados para a aplicação da modelação matemática e como interpretar o sistema hidrogeológico de forma a traduzi-lo para a linguagem matemática. Mostra-se também, as etapas que devem ser seguidas no processo da modelação matemática, adequando as informações existentes às necessidades do programa aplicado.

A partir do modelo matemático desenvolvido, procurou-se mostrar seu alcance em definir as zonas de captura das captações de água subterrânea e a facilidade de avaliar cenários futuros, facilitando o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

3. A proteção da água subterrânea no Estado de São Paulo

O município de Caçapava foi escolhido como área piloto por encontrar-se em uma das áreas críticas do Estado de São Paulo (Vale do Paraíba), do ponto de vista do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas.

Apesar de ainda não existir um programa efetivo de proteção deste recurso implantado no Estado de São Paulo, diversos estudos e trabalhos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos, que permitiram traçar diretrizes e prioridades para a proteção da qualidade da água subterrânea.

Um dos estudos mais importantes é o "Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo" (Hirata et al. 1997), que definiu, com base nas características intrínsecas dos aquíferos e das atividades antrópicas instaladas, as áreas com maior risco potencial de contaminação das águas subterrâneas. As áreas críticas definidas abrangeram as regiões do Vale do Paraíba, da Grande São Paulo, Campinas, Ribeirão Preto/Franca e o afloramento do Aquífero Botucatu, hoje denominado de Aquífero Guarani.

A partir deste estudo no nível estadual, vários trabalhos direcionados às áreas críticas foram desenvolvidos de forma a subsidiar o gerenciamento e proteção das águas subterrâneas. Como exemplo, tem-se as avaliações hidrogeológicas desenvolvidas pelo Instituto Geológico na região de Campinas (IG 1993 e 1995), a priorização de áreas potencialmente contaminadas na Grande São Paulo (Hassuda 1997), determinação de estratégias de proteção em São José dos Campos (Hirata 1994) e definição de áreas para disposição de resíduos sólidos na Região Metropolitana de Campinas (IG/SMA em andamento).

Estes foram projetos regionais enfocando a proteção do aquífero, ou ainda, voltado às fontes potenciais de contaminação. Em Cleary (1992) e Hirata (1994) esta questão de proteção de uma captação específica de água subterrânea é abordada através da utilização dos perímetros de proteção.

Outros estudos regionais, fornecendo informações complementares para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos foram desenvolvidos, como por Campos (1993) ou estão em fase de desenvolvimento, como a Carta Hidrogeológica do Estado de São Paulo (IG/DAEE/IPT/CPRM em andamento).

Em termos de legislação específica, as águas subterrâneas possuem um mecanismo para sua proteção garantida pela lei estadual nº 6.134/88, regulamentada pelo decreto nº 32.955/91. Na regulamentação desta lei são definidas as áreas de proteção das captações objetivando "conservar, proteger e manter o equilíbrio natural das águas subterrâneas, dos serviços de abastecimento de água". Estas áreas de proteção foram classificadas e definidas, segundo este decreto como:

- Área de Proteção Máxima: que compreende a zona de recarga de aquíferos vulneráveis ou essenciais ao abastecimento público;
- Área de Restrição e Controle: onde deve haver restrições à exploração da água subterrânea e controle das fontes potenciais de contaminação; e
- Áreas de Proteção de Poços e outras Captações: voltadas à proteção imediata da captação, principalmente para a proteção sanitária.

O fato das áreas de proteção não serem rigidamente definidas, com exceção da Área de Proteção de Poços e outras Captações que já define o critério de 10 metros e 50 dias de tempo de trânsito, permite que sejam adaptáveis aos cenários específicos, podendo utilizar a metodologia mais apropriada às características do meio e aos recursos disponíveis.

São inúmeros os critérios e metodologias utilizados em outros países para a delimitação dos perímetros de proteção de poços, sendo que no presente trabalho são ilustrados alguns deles. Entretanto, a modelação matemática apresenta, comparativamente, os melhores índices de precisão e adaptabilidade ao contexto hidrogeológico existente (ITGE 1991). E, apesar da modelação matemática implicar em maiores custos de aplicação, este é amortizado por sua eficiência na definição da zona de contribuição dos poços, otimizando as ações preventivas e de controle da contaminação (ITGE 1991).

Dessa forma, este trabalho vem mostrar a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional para a definição da zona de contribuição e chamar a atenção para a urgente necessidade de proteção das obras de captação de água subterrânea, de forma a minimizar os riscos à saúde humana e também otimizar esforços.

4. Proteção de Poços e Outras Captações

Neste item é realizada uma breve introdução teórica sobre os critérios e ferramentas utilizadas para a proteção das captações de água subterrânea, de forma a ilustrar os conceitos de Zona de Contribuição (ZC), Perímetro de Proteção de Poços e Outras Captações (PPP) e Zona de Transporte (ZT) citados neste trabalho.

4.1. Terminologia e critérios para a delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações

A proteção da água subterrânea pode ter dois enfoques. O primeiro é a proteção geral de um aquífero importante, controlando as fontes potenciais de contaminação existentes e controlando o processo de uso do solo em toda a sua extensão. O segundo enfoque, o qual é abordado neste estudo, é a proteção pontual, voltada a uma captação de água subterrânea. Sob este ponto de vista, adota-se medidas de controle e prevenção da poluição na área que contribui para a captação, denominada de Zona de Contribuição ou Área de Captura.

Assim, para uma efetiva proteção da qualidade da água captada é necessário proteger a **Zona de Contribuição (ZC)**, que constitui a área de recarga de uma captação específica.

Como, em geral, a Zona de Contribuição abrange grandes áreas, são definidas regiões menores, contidas dentro da ZC, de forma a viabilizar medidas de proteção mais rígidas quanto mais próximo da captação. Estas áreas no entorno da captação que serão os alvos das medidas de proteção são denominadas de **Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações (PPP's)**.

Este conceito de perímetro de proteção das captações surgiu primeiramente na Europa, onde diversos países como Alemanha, França, Bélgica e Dinamarca, dependem fortemente da água subterrânea para o abastecimento público. Segundo Margat (1989), do volume captado de água subterrânea, mais de 60% é destinado ao uso doméstico. Este quadro levou a preocupações em proteger as águas subterrâneas de forma efetiva, entretanto otimizando custos e esforços, surgindo, então, o conceito de perímetro de proteção das captações. A sua eficiência levou outros países como EUA e Canadá a adotarem esta estratégia de proteção.

No Brasil, esta medida também deve ser adotada tendo em vista o potencial de crescimento na utilização da água subterrânea para o abastecimento público. Segundo Rebouças (1998), os recursos hídricos subterrâneos podem resolver a maioria dos problemas de abastecimento no Brasil, uma vez que 80% das cidades brasileiras são de pequeno e médio porte e, felizmente, 95% do território brasileiro apresenta condições favoráveis ao armazenamento de água subterrânea. Este autor estima que existam cerca de 100.000 poços ativos no Brasil, explorando um total da ordem de 2 bilhões de m³ de água por ano.

No Estado de São Paulo, este recurso é essencial ao abastecimento, sendo que em 1990, 60% dos núcleos paulistas eram total ou parcialmente abastecidos por água subterrânea (São Paulo 1990), subindo este percentual para 72% em 1997 (CETESB 1997). Muitos municípios ampliaram a exploração de água subterrânea, frente às vantagens econômicas e de qualidade da água, como é o caso de Caçapava. Neste município, em 1977, a água subterrânea perfazia 73% do volume total de água produzido (DAEE 1977a), totalizando um volume explorado de aproximadamente 2.800.000 m³/ano. Atualmente, o abastecimento público é 99% suprido por água subterrânea, explorando cerca de 6.800.000 m³/ano.

Este quadro mostra a necessidade de medidas efetivas de proteção da água subterrânea, principalmente visando a proteção das captações destinadas ao abastecimento público, através da delimitação da Zona de Contribuição e dos Perímetros de Proteção.

Uma analogia com a Área de Proteção de Mananciais (APM), utilizada para proteger as captações de água superficial, facilita o entendimento da importância da definição da Zona de Contribuição para a delimitação dos PPP's. O controle e restrição das atividades potencialmente contaminantes na bacia de contribuição da captação faz parte do processo de prevenção da poluição e manutenção da qualidade do recurso.

Apesar da semelhança de objetivo, estas duas áreas de proteção apresentam uma diferença na questão dos parâmetros considerados para a sua delimitação. Na APM, o traçado restringe-se ao limite da bacia hidrográfica a montante da captação (sistema estacionário), onde apenas a topografia do terreno controla o fluxo da água superficial e o contorno da área a ser protegida. O volume captado e o tempo não influenciam nos seus limites.

Para a proteção das captações de água subterrânea, o sistema não pode ser considerado como estacionário a longo prazo, pois, os limites da área a ser protegida são definidos em função das taxas de bombeamento, da recarga/infiltração e da interferência antrópica no meio (Delin & Almendinger 1993).

Para a delimitação da Zona de Contribuição das captações, as características intrínsecas do aquífero devem ser levadas em consideração, pois, estas influenciam as direções do fluxo da água subterrânea e conseqüentemente, o formato da ZC.

Os perímetros de proteção visam adotar medidas mais rígidas de controle e prevenção da poluição nas áreas mais próximas das captações, de forma a otimizar os esforços e os custos. Dessa forma, é necessário que o perímetro de proteção contenha toda ou parte da Zona de Contribuição de uma captação. O critério mais adequado para a delimitação destes perímetros é o **tempo de trânsito**, que é o tempo que uma partícula de água leva para partir de um determinado ponto dentro da Zona de Contribuição e atingir a captação (Figura 4.1). A área limitada por uma isócrona é denominada de **Zona de Transporte (ZT)**. Sob este ponto de

vista, a Zona de Contribuição pode ser considerada uma Zona de Transporte para um tempo de trânsito infinito.

A **capacidade de assimilação** é um critério que pode ser utilizado em situações específicas, considerando os processos de atenuação da concentração do contaminante no aquífero, como diluição, dispersão, adsorção, biodegradação e precipitação química. A escolha deste critério considera que um determinado contaminante existente na Zona de Contribuição atingirá a captação a níveis aceitáveis de concentração, determinado pelo órgão de controle, ou ainda, o tempo de chegada da substância à captação será suficiente para a tomada de medidas de controle ou contenção da contaminação. A área delimitada por este critério é denominado de Zona de Atenuação (ZA). Este é um critério pouco prático de ser utilizado devido à dificuldade de caracterização física e química do aquífero, além da modelação de cenários com múltiplos contaminantes existentes, o que frequentemente ocorre.

Em aquíferos fraturados ou cársticos, onde o fluxo da água subterrânea é fortemente afetado pelos condicionantes geológicos, o critério utilizado pode ser as **fronteiras de fluxo**.

Este critério é baseado na identificação dos divisores de água subterrânea e das feições físicas e hidrológicas que controlam o fluxo subterrâneo, determinados a partir de um mapeamento hidrogeológico.

A Figura 4.2 ilustra as fronteiras de fluxo que podem ser utilizadas para a delimitação da ZC.

Outros critérios são utilizados para a determinação de perímetros de proteção mas a sua precisão em proteger a Zona de Contribuição de uma captação diminui, como é o caso do critério de **rebaixamento** do nível da água causado pelo bombeamento de um poço. A área afetada pelo bombeamento, formando o cone de depressão é denominada de **Zona de Influência (ZI)**. Ela apenas será coincidente com a Zona de Contribuição quando o nível potenciométrico for horizontal, entretanto, este cenário é incomum, ocorrendo, em geral, superfícies potenciométricas inclinadas, como mostra a Figura 4.3, o que promove a proteção de área a jusante que não vai contribuir para a captação e deixa de proteger partes da Zona de Contribuição.

Figura 4.3 - Relação entre a Zona de Contribuição (ZC) e a Zona de Influência (ZI) em aquíferos com superfície potenciométrica inclinada (Witten et al. 1995)

O mais simples dos critérios adotados, mas que apresenta pouca precisão, é a **distância**, que consiste em adotar um raio ao redor da captação para a delimitação do perímetro de proteção. Este tipo de critério, apesar de sua fácil aplicação, protege áreas desnecessárias e deixa de proteger áreas que contribuem para a captação.

Muitas localidades utilizam estes critérios de forma combinada para a definição das diferentes categorias de perímetros de proteção como é o caso de alguns estados americanos como Geórgia e Idaho (Boulding 1995), na Alemanha (Schleyer et al. 1992) e na Grã-Bretanha (Adams & Foster 1992).

No Estado de São Paulo, de acordo com o decreto 32.955/91, que regulamenta a lei estadual 6.134/88, deve-se utilizar os critérios de distância e tempo de trânsito para a definição da Área de Proteção de Poços e Outras Captações. Na Área de Proteção Máxima, compreendendo a área de recarga de aquíferos vulneráveis, associa-se o critério de fronteiras de fluxo. Para a Área de Restrição e Controle não há nenhuma referência que possa identificar o critério que deva ser considerado, podendo-se adotar um zoneamento intermediário entre as duas áreas de proteção definidas acima, de forma a otimizar as ações de prevenção da poluição e controle das atividades de risco.

A Tabela 4.1 mostra alguns fatores que afetam a escolha do critério para a delimitação dos perímetros de proteção das captações, sendo que neste trabalho, sugere-se o tempo de trânsito como o melhor critério a ser adotado. Em aquíferos heterogêneos como os fraturados e cársticos deve-se associar o mapeamento hidrogeológico para determinação das fronteiras de fluxo.

A Tabela 4.2 mostra algumas vantagens e desvantagens, do ponto de vista técnico, que envolvem a escolha destes critérios.

4.2. Classificação dos métodos para delimitação dos Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações

A delimitação do Perímetro de Proteção de Poços e Outras Captações (PPP) pode ser efetuada utilizando diferentes métodos, que variam em complexidade, precisão e também em custos. Os métodos mais complexos, como através da utilização da modelação matemática, fornecem maior confiabilidade no traçado da Zona de Contribuição por permitir considerar as heterogeneidades encontradas no meio físico, necessitando-se, por outro lado, de uma quantidade maior de informações e um conhecimento técnico mais especializado sobre o assunto.

Segundo USEPA (1994), os métodos mais utilizados de delimitação de PPP podem ser agrupados, segundo sua abordagem, em quatro grupos, que aumentam em complexidade de aplicação, mas também na confiabilidade para a determinação da Zona de Contribuição da captação. Estas abordagens são: geométrica, analítica, física e numérica.

- entender, tridimensionalmente, a dinâmica de sistemas complexos de fluxo de água subterrânea;
- determinar a Zona de Contribuição de poços, fundamental para o zoneamento de proteção de captações;
- planejar e otimizar sistemas de abastecimento de água através da determinação das melhores localizações dos poços;
- otimizar sistemas de rebaixamento de lençol freático na construção civil e minerações;
- avaliar as direções preferenciais do caminhamento de contaminantes;
- avaliar alternativas de contenção e remediação de locais contaminados.

Apesar dos resultados dos modelos matemáticos serem questionáveis em alguns casos, ainda assim, constituem a melhor ferramenta existente para a compreensão do sistema real e para previsão e comparação de alternativas ou cenários futuros.

Deve-se lembrar que, quanto melhor a qualidade dos dados de entrada e a compreensão do modelo conceitual do sistema, melhor serão os resultados da modelação matemática.

Um modelo matemático é descrito pelas equações que governam o sistema, no caso deste estudo, a equação fundamental de fluxo de água subterrânea, e também pelas condições iniciais e de contorno.

5.1.Princípios básicos

5.1.1.Equação de fluxo da água subterrânea

A equação diferencial parcial tridimensional, aplicada a um modelo matemático, que governa o fluxo da água subterrânea, considerando-se um meio heterogêneo, anisotrópico e em estado transiente, é derivada através da combinação matemática da equação de balanço de água e da lei de Darcy (Anderson & Woessner 1992 e Cleary 1989).

Considerando-se um volume elementar representativo de um aquífero, com os eixos do sistema de coordenadas coincidentes com as principais direções do tensor de condutividade hidráulica, isto é, x , y e z colineares a K_x , K_y e K_z , respectivamente, e considerando a água com uma densidade constante, a equação fundamental de fluxo de água subterrânea é representada pela equação abaixo (Cleary, 1991).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

onde:

h = carga potenciométrica [L]

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} são os valores de condutividade hidráulica ao longo das coordenadas x , y e z , respectivamente [L/T]

S_s = coeficiente de armazenamento específico [1/L]

t = tempo [T]

W = representa fontes ou sumidouros de água [L^3/TL^3]

Anderson & Woessner (1992) ilustram como a equação fundamental de fluxo de água subterrânea foi derivada a partir da combinação do balanço de água e da lei de Darcy. Primeiramente, considera-se um volume elementar representativo de um aquífero, com volume igual a $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ (Figura 5.1), onde o seu tamanho é suficientemente grande para representar as propriedades do meio poroso, mas, por outro lado, suficientemente pequeno para não refletir grandes mudanças na carga hidráulica.

O balanço de água dita que a diferença entre o fluxo de saída de água e o fluxo de entrada de água no volume elementar deve ser igual a mudança no armazenamento.

Dessa forma, considerando-se os fluxos de entrada e saída nos três eixos de coordenadas têm-se:

$$\text{mudança no armazenamento} = \Delta V = q_{\text{OUT}} - q_{\text{IN}} - W$$

sendo que W é colocado para representar fontes ou sumidouros no sistema.

Assim,

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z - W (\Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

e

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Dessa forma, têm-se que:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W$$

Pela lei de Darcy,

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Assim, a combinação da lei de Darcy com a equação de balanço de água, fornece a equação fundamental de fluxo da água subterrânea, como mostrado no início deste item.

Caso não seja possível alinhar os principais tensores de condutividade hidráulica com as coordenadas do sistema, é necessário considerar as componentes cruzadas deste parâmetro na equação diferencial parcial, como segue.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \\ & W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned}$$

Neste estudo, foi considerado um sistema tridimensional, heterogêneo e anisotrópico, com os eixos do sistema de coordenadas coincidentes com o tensor de condutividade hidráulica. Outros cenários, considerando sistemas bidimensionais ou unidimensionais, homogêneos ou isotrópicos podem ser encontrados em Bear (1979), Freeze & Cherry (1979), Fetter (1988), Cleary (1989), Anderson & Woessner (1992).

Quando considera-se situações simplificadas, de homogeneidade e isotropia, em uma ou duas dimensões, é possível resolver a equação de fluxo de forma analítica. Entretanto, métodos numéricos permitem maior amplitude de cenários a serem simulados e maior versatilidade na representação do sistema real pois permitem discretizar a equação diferencial parcial nas variáveis de espaço (x , y , z) (Cleary 1989).

Os métodos numéricos mais utilizados na modelação matemática são o de diferenças finitas, utilizado neste estudo, e elementos finitos. O *método de elementos finitos* é uma representação discretizada sobre uma área (Cleary 1989) sendo que a variação da carga hidráulica dentro do elemento é definido pela interpolação da carga nos nós. O elemento finito é, em geral, definido por triângulos (Figura 5.2d), que podem ser refinados nas áreas de maior interesse, como áreas com alto gradiente hidráulico, permitindo um melhor ajuste ao formato da área. Entretanto, é um método mais difícil de ser manuseado, sendo, ainda, pouco utilizado para a modelação matemática de fluxo de água subterrânea. O *método de diferenças finitas* é uma representação discretizada em um ponto (Figura 5.2) (Cleary 1989), isto é, a carga hidráulica é definida no nó da malha e é extrapolada para toda a área que envolve o nó. Este método, empregado nos programas de fluxo mais utilizados atualmente, tem a grade ou malha do modelo definida por linhas e colunas, apresentando um ajuste mais grosseiro ao formato da área modelada. Por outro lado, sua facilidade de utilização para entrada de dados e análise dos resultados do modelo matemático faz com que seja o método mais empregado no momento para a simulação de fluxo da água subterrânea. Quando as direções principais de condutividade hidráulica variam em todo o aquífero, não podendo ser ajustadas aos eixos das coordenadas, deve utilizar-se o método de elementos finitos.

A escolha de qualquer um dos métodos influencia a estrutura da grade do modelo, que pode, então, ser discretizada em elementos finitos ou em uma grade de diferenças finitas, como mostra a Figura 5.2.

O programa MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988) utiliza uma grade de diferenças finitas, onde o nó da célula, isto é, o ponto onde o valor de um dado ou informação é posicionado, está localizado no centro da célula ou bloco, sendo por isso, chamado de diferenças finitas centrado no bloco (Figura 5.2b). Quando o dado é colocado na intersecção das linhas e colunas da malha que define a grade do modelo, têm-se uma abordagem de diferenças finitas com nós centrados na malha (Figura 5.2c). Para definir as fronteiras do domínio de um modelo matemático, por exemplo, através de rios e cargas constantes, as diferenças finitas centradas no bloco são, matematicamente, mais fáceis de serem manipuladas e resolvidas (Anderson & Woessner 1992), o que leva a maioria dos programas existentes a usarem este método, como no programa MODFLOW.

Figura 5.2 - Representação da malha de diferenças finitas e elementos finitos
(Anderson & Woessner 1992)

5.1.2. Condições iniciais

A condição inicial refere-se a distribuição tridimensional de carga hidráulica no domínio do modelo matemático no início da simulação, isto é, no tempo igual a zero.

Quando as medidas reais de carga hidráulica são conhecidas, estas podem ser utilizadas como condição inicial, otimizando a resposta do modelo nos primeiros passos de tempo de simulação, diminuindo o tempo para convergência dos cálculos. Isto implica em um fluxo inicial, com h (carga hidráulica) diferente para cada posição x, y, z . Entretanto, segundo Cleary (1989), esta informação é, na maioria das vezes, desconhecida na prática, o que leva grande parte dos modeladores a assumir uma carga hidráulica média e constante para todo o domínio do modelo, isto é, uma carga hidráulica h igual para qualquer posição x, y, z .

Em simulações em estado transiente, costuma-se utilizar as cargas hidráulicas simuladas em estado estacionário como condição inicial (Anderson & Woessner, 1992).

5.1.3. Condições de contorno

As condições de contorno são utilizadas para definir, com base no sistema hidrogeológico real, as fronteiras hidráulicas ou físicas que delimitam o domínio do modelo.

As barreiras físicas podem ser exemplificadas como corpos superficiais de água ou presença de rocha impermeável. As barreiras hidráulicas não são visíveis mas controlam o fluxo de água subterrânea no sistema e podem ser exemplificadas como os divisores de água ou as linhas de fluxo.

Estas condições de contorno são matematicamente classificadas em três tipos.

- Tipo 1 ou Dirichlet (Carga Hidráulica Especificada)

A condição de contorno tipo 1 é também denominada Dirichlet e representa uma fronteira com uma carga hidráulica especificada. Esta carga pode ser constante, como por exemplo um lago, ou função do tempo e do espaço como nos rios (Cleary 1989).

- Tipo 2 ou Neuman (Fluxo Especificado)

A condição de contorno tipo 2 ou Neuman refere-se a um fluxo de água subterrânea assinalada na fronteira de um modelo. A forma mais frequentemente usada é uma fronteira denominada comumente como "não fluxo", isto é, fluxo igual a zero simulando zonas impermeáveis ou divisores de água subterrânea. No programa MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988), é possível colocar recarga, considerada um fluxo diretamente especificada na primeira camada do modelo.

- Tipo 3 ou Cauchy (Fluxo Dependente da Carga Hidráulica)

Neste tipo de condição de contorno, o fluxo de água através de uma fronteira é calculado com base na diferença entre uma carga hidráulica especificada e a carga hidráulica calculada

pelo modelo (Anderson & Woessner 1992). A forma mais comum de utilização deste tipo de condição de contorno é para definir a drenança de um corpo de água superficial.

A Figura 5.3, elaborada por Cleary (1989), ilustra a aplicação destes três tipos de condição de contorno.

Todos estes tipos de fronteiras descritos acima podem também ser utilizados como condições internas de contorno, de forma a simular qualquer feição que afete o sistema hidrogeológico do local, como lagos, barragens e rios internos ao domínio do modelo.

5.1.4. Caminhamento de partículas

A técnica de caminhamento de partículas é utilizada para a determinação das linhas de fluxo ou linhas de trajetórias, sendo útil para o entendimento do sistema de fluxo da água subterrânea e também para determinar as direções preferenciais de evolução de uma pluma de contaminação.

Neste trabalho, o caminharmento de partículas foi utilizado para a determinação da zona de contribuição de poços de abastecimento, de forma a identificar as áreas mais vulneráveis a serem protegidas para garantir a qualidade da água subterrânea.

Esta técnica consiste em acompanhar o caminharmento de partículas imaginárias, de tamanho infinitamente pequeno, colocadas no sistema de fluxo de água subterrânea, movimentando-se em função apenas de processo advectivo. Esta movimentação das partículas é calculada, em um domínio contínuo, com base nas velocidades da água subterrânea, sendo que estas velocidades são calculadas a partir de cargas hidráulicas obtidas em modelo numérico de fluxo. Dessa forma, os programas utilizados para a determinação das linhas de trajetórias utilizando o caminharmento de partículas são denominados de pós-processadores dos modelos de fluxo de água subterrânea.

As soluções analíticas para o caminharmento de partículas são restritas a modelos bidimensionais em estado estacionário, enquanto soluções numéricas permitem uma maior amplitude de cenários. Entretanto, este caminharmento de partículas pode apenas ser calculado utilizando-se programas matemáticos específicos (Anderson & Woessner 1992).

A determinação da distribuição de velocidades, necessárias para o caminharmento de partículas, é calculada a partir de cargas hidráulicas obtidas nos modelos numéricos. Estas velocidades são calculadas com base nas taxas de fluxo entre uma célula e outra em uma grade de diferenças finitas (Figura 5.4). Assim, calcula-se a velocidade inicial onde se encontra a partícula e a posição e a velocidade que esta deixa as células por onde caminha. Para isso, existem técnicas de interpolação aplicadas ao caminharmento de partículas como linear e bilinear, mais frequentemente utilizadas, e distância reversa e bicúbica. A interpolação linear, aplicada pelo programa MODPATH (Pollock 1989), utilizado neste trabalho, calcula a velocidade em cada eixo, v_x , v_y e v_z , independentemente. Assim, a interpolação linear para v_x é uma função das mudanças de velocidade somente na direção x (Figura 5.4) e pode ser calculada por (Anderson & Woessner 1992):

$$v_x = (1 - f_x) v_{x(i-1/2, j)} + f_x v_{x(i+1/2, j)}$$

$$f_x = (x_p - x_{i-1/2, j}) / \Delta x_{i,j}$$

onde x_p é a coordenada x da partícula. Esta mesma equação é usada para determinar v_y e v_z .

As linhas de trajetória percorridas pelas partículas são solucionadas por (Anderson & Woessner 1992):

$$dx/dt = v_x ,$$

$$dy/dt = v_y ,$$

$$dz/dt = v_z ,$$

cujas soluções semi-analíticas são dadas por:

$$x_p = x_1 + (1/A_x)[(v_x) \exp(A_x \Delta t) - (v_x)_1]$$

onde

$$A_x = [(v_x)_2 - (v_x)_1]/\Delta x_{i,j}$$

Os parâmetros $(v_x)_1$ e $(v_x)_2$ representam as velocidades nos limites da célula no eixo x, e os termos x_1 e x_p representam, respectivamente, a coordenada da face da célula e a coordenada da partícula no eixo x, como mostra a Figura 5.4.

Pollock (1989) usa a equação abaixo para calcular o tempo (Δt_x) que a partícula leva, por exemplo no eixo x, para se movimentar de x_p até a face da célula (x_2) por onde esta partícula vai sair e passar para a célula vizinha.

$$\Delta t_x = (1/A_x) \ln(v_{x2}/v_x)$$

onde v_x é a componente de velocidade da partícula.

Esta solução semi-analítica amolda-se melhor para cenários em estado estacionário, onde a velocidade é constante no tempo. O programa MODPATH (Pollock 1989), um pós-processador desenvolvido para delinear as linhas de trajetórias utilizando as saídas de carga hidráulica, em estado estacionário, do programa MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988), usa a interpolação linear e uma solução semi-analítica para movimentar as partículas. Apesar de desenvolvido para ler e processar diretamente os arquivos gerados pelo MODFLOW, este

programa pode ser modificado para aceitar dados de distribuição de carga hidráulica gerados por qualquer outro programa tridimensional de fluxo, que utilize diferenças finitas centradas no bloco. Entretanto, não calcula as linhas de trajetórias a partir de modelos gerados por diferenças finitas centradas na malha ou por elementos finitos (Walton 1992).

5.2.Procedimentos da modelação matemática

A modelação matemática consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real. O objetivo desta modelação matemática é, então, compreender melhor o sistema e prever situações futuras, algumas vezes do passado, para direcionar as ações de decisão. Para a construção de um modelo matemático que represente um sistema real, neste caso, de fluxo de água subterrânea, os procedimentos são: desenvolvimento do modelo conceitual, que envolve todo o levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real; seleção do programa a ser utilizado segundo as necessidades e os dados existentes; tradução do modelo conceitual para a linguagem matemática, construindo-se os diversos bancos de dados para a entrada das informações no programa selecionado; e calibração do modelo matemático construído de forma a diminuir as incertezas inerentes a uma representação simplificada (modelo matemático) de um sistema real, em geral, complexo.

5.2.1. Modelo conceitual

O modelo conceitual consiste em compreender o sistema hidrogeológico em questão com base na interpretação e análise semi-qualitativa dos dados (Walton 1992) de forma a identificar as unidades hidroestratigráficas e suas características hidráulicas e o sistema de fluxo da água subterrânea. Este modelo conceitual norteará a definição do domínio do modelo, do tipo de aquífero a ser modelado, das condições iniciais e de contorno, e das fontes e sumidouros de água no sistema.

A interpretação de mapas e perfis litológicos e perfilagens geofísicas de poços para a confecção de seções geológicas, combinada com a análise das propriedades hidráulicas, direcionam a definição das unidades hidroestratigráficas a serem utilizadas na modelação matemática, caracterizando-as em extensão, continuidade lateral e espessura.

Os modelos numéricos requerem a definição de condições de contorno, onde são especificadas as cargas hidráulicas ou taxas de fluxo, para a delimitação da área modelada. Anderson & Woessner (1992) sugerem que, sempre que possível, sejam adotadas como condições de contorno, fronteiras hidráulicas naturais, representadas por alguma feição física como contatos geológicos, rios e divisores de água.

A compreensão do sistema de fluxo da água subterrânea é obtida através da avaliação dos mapas potenciométricos, podendo-se identificar as áreas de recarga e descarga da região de interesse e as feições que afetam, hidraulicamente, o sistema avaliado, inclusive, a influência antrópica como poços, drenos e tanques que podem funcionar como consumidores (sumidouros) ou fornecedores (fontes) de água.

5.2.2. Escolha do aplicativo matemático

A seleção do aplicativo matemático a ser empregado depende de vários fatores como o objetivo do trabalho, o problema a ser resolvido com o modelo matemático, a complexidade do modelo conceitual, tempo e recursos disponíveis. Estes fatores vão influenciar na decisão das opções entre um modelo analítico ou numérico, bi ou tridimensional, diferenças finitas ou elementos finitos, de fluxo de água subterrânea ou transporte de massa.

Diversos programas são encontrados no mercado, entretanto, é aconselhável optar por um aplicativo que seja amplamente utilizado em diversos cenários compatíveis e que tenha um manual bem detalhado, com documentação completa e suporte técnico ao usuário. Além disso, o programa deve calcular o balanço de água, pois, como as equações resolvidas se baseiam em conservação de massa, valores semelhantes entre os volumes de água que entram ou saem do sistema indicam que o programa calculou corretamente as equações que compõem o modelo matemático (Anderson & Woessner 1992).

Considerando o objetivo deste trabalho, de verificar a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional para a determinação das zonas de contribuição de poços, selecionou-se o aplicativo desenvolvido pelo U. S. Geological Survey, denominado MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988) para fluxo de água subterrânea, associado com o MODPATH (Pollock 1989) para definição das linhas de trajetória.

5.2.3. Elementos do modelo matemático

Para a construção do modelo matemático é necessário traduzir o modelo conceitual da área, definido com base nos dados hidrogeológicos e hidrológicos, para a linguagem do programa escolhido. Assim, a discretização da malha, a delimitação das condições de contorno e das condições iniciais devem ser introduzidas adequadamente de forma que o aplicativo matemático escolhido para a construção do modelo matemático represente as condições reais do sistema hidrogeológico.

Os elementos para a definição do modelo matemático são:

- discretização da grade do modelo
- delimitação das condições de contorno externas e internas
- definição dos poços de injeção/extração e de observação

- definição das condições iniciais

- Grade do modelo

No método das diferenças finitas, a área modelada é discretizada por uma grade ou malha, desenhada por linhas, colunas e camadas, que definem o conjunto de células onde serão colocadas as condições de contorno e também serão calculadas as cargas hidráulicas e velocidades da água subterrânea. Antes da discretização da malha é necessário definir o domínio do modelo, isto é, a área, dentro de sua região de interesse, que será modelada.

A grade discretizada no modelo pode ser refinada nas áreas de maior interesse ou onde existem altos gradientes hidráulicos, como ao redor de poços, para aumentar a definição e precisão no cálculo das cargas hidráulicas e velocidades.

No MODFLOW é possível definir uma grade com espaçamento irregular, em todos os eixos (x, y e z).

Com a grade discretizada na horizontal e na vertical, é necessário definir as propriedades hidráulicas de cada unidade hidrogeológica, para sua representação no modelo matemático. O MODFLOW aceita condições heterogêneas e anisotrópicas, sendo então necessário introduzir as condutividades hidráulicas das unidades para os três eixos de coordenadas (K_x , K_y , K_z) e os parâmetros de armazenamento (S_s , S_y , n_{ef} e n).

- Condições de contorno

As condições de contorno que podem ser introduzidas no MODFLOW são: "não fluxo", carga hidráulica constante, fronteira de carga hidráulica genérica, rio, dreno, parede impermeável, recarga e evapotranspiração. Com exceção da fronteira de "não fluxo", estas condições de contorno podem ser variáveis no tempo, permitindo, por exemplo, representar a variação sazonal de recarga ou evapotranspiração.

Estas condições de contorno são utilizadas para delimitar o domínio do modelo mas também podem ser colocadas como condições de contorno internas para representar, por exemplo, rios ou lagos na área modelada.

Para a seleção das condições de contorno é necessário compreender e estimar o provável sistema de fluxo da água subterrânea, identificando as feições físicas ou hidrogeológicas que deverão atuar como fronteiras ao domínio do modelo.

A condição de contorno Tipo 1 ou de carga especificada é representada no MODFLOW por Carga Constante, onde pode-se especificar um valor de carga hidráulica, célula a célula, para cada passo de tempo simulado. Esta carga hidráulica permanecerá constante no intervalo de tempo especificado, não apresentando nenhuma resistência para fornecimento ou retirada

de água do sistema. Este tipo de fronteira pode simular rios ou lagos, por exemplo, como mostra a Figura 5.5.

A condição de fronteira de fluxo especificado (Tipo 2 ou Neuman) é utilizada para simular fronteiras onde existe uma taxa de fluxo de água que entra ou sai do sistema. A recarga simulada por MODFLOW é considerada uma condição de contorno de fluxo (volume de água infiltrada em um período de tempo) podendo ser especificada com valores distintos célula a célula e para cada intervalo de tempo. Uma condição de contorno Tipo 2 geralmente utilizada é a fronteira denominada "não fluxo", assinalando-se células onde não passa um fluxo de água subterrânea, sendo usada para simular, por exemplo, divisores de água ou barreiras impermeáveis. Em MODFLOW, esta condição é definida no modelo matemático especificando-se as células denominadas inativas (Figura 5.5).

A fronteira de fluxo dependente da carga hidráulica é representada no MODFLOW por diversas condições de contorno, a saber: rio, dreno, fronteira de carga hidráulica genérica ('general head boundary') e evapotranspiração. Neste tipo de condição de contorno, o fluxo

depende da diferença entre a carga hidráulica especificada e a carga hidráulica calculada pelo modelo.

No módulo de evapotranspiração do MODFLOW, simula-se a evapotranspiração enquanto o nível da água no sistema, calculado pelo modelo, estiver acima da carga hidráulica especificada pelo usuário, denominada de "profundidade de extinção" (McDonald & Harbaugh 1988).

Para os módulos de rio, dreno e fronteira de carga hidráulica genérica, McDonald & Harbaugh (1988) introduziram o conceito de condutância, que representa a resistência do meio à entrada ou saída de água através de qualquer uma dessas condições de contorno. A condutância é o produto da condutividade hidráulica multiplicada pela área atravessada pelo fluxo, dividido pela distância percorrida entre a carga hidráulica especificada e a calculada pelo modelo.

Nos módulos de rio e dreno, a condutância representa a resistência do material na base de um rio ou de um dreno, que dificulta ou facilita a entrada/saída de água para o modelo (Figura 5.6). A condutância (C_{rio}) [L^2/T] em um rio é calculada por:

$$C_{rio} = \left(\frac{K'WL}{M} \right)$$

Onde (Figura 5.6):

K' = condutividade hidráulica do material na base do rio [L/T]

W = largura do rio [L]

L = comprimento da célula [L]

M = espessura do material na base do rio [L]

Enquanto a carga hidráulica calculada no modelo estiver acima da base do rio, há uma saída de água através desta fronteira. Em caso contrário, isto é, se a carga hidráulica calculada pelo modelo estiver abaixo da base do rio, há uma contribuição, entrada de água, do rio para o sistema, como mostra a Figura 5.6c.

No caso da condição de contorno dreno (Figura 5.7), o comportamento é semelhante, entretanto não há contribuição de água do dreno para o sistema caso a carga hidráulica calculada pelo modelo estiver abaixo da base do dreno, sendo útil para simular drenagens intermitentes ou a interferência de poços na drenagem local. A condutância do dreno é calculada da mesma forma que para a condição de contorno rio, considerando a condutividade hidráulica e espessura do material na base do dreno, a largura do dreno e o comprimento da célula.

A fronteira de fluxo dependente de uma carga hidráulica genérica é ilustrada na Figura 5.8. O fluxo através da fronteira Q_b é calculado com base na diferença entre a carga hidráulica do aquífero no domínio do modelo e a carga hidráulica genérica, multiplicada pela resistência

- (a) representação conceitual de um rio
 (b) elementos para o cálculo da condutância do material existente na base do rio
 (c) fluxo através da camada da base do rio

Figura 5.6 - Ilustração da condição de contorno "rio" utilizada no programa MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988)

(a) condição de contorno "dreno" simulando um dreno coberto

(b) condição de contorno "dreno" simulando um rio

Figura 5.7 - Ilustração da condição de contorno "dreno" utilizada no programa MODFLOW (McDonald & Hargauth 1988)

que a água sofre para entrar ou sair do sistema, isto é, a condutância. A fronteira de carga hidráulica genérica funciona como uma fonte infinita de água, com carga constante dentro dos períodos de tempo especificados pelo usuário do programa. A resistência sofrida para a água sair ou entrar do sistema é representada pela condutância, que é o produto da condutividade hidráulica pela área atravessada pelo fluxo, dividido pela distância entre a fronteira e a carga genérica. A condutividade hidráulica refere-se ao material existente entre a fronteira do modelo e a carga hidráulica genérica, assumida a determinada distância do domínio modelado.

- Poços de injeção/extração e de observação

A água pode entrar ou sair do sistema modelado através das fronteiras e também através dos poços de injeção ou extração. As fontes ou sumidouros, que simulam estes poços de injeção/extração, são representados pelo termo $W(x, y, z, t)$ na equação de fluxo da água subterrânea.

Os poços de bombeamento inseridos no MODFLOW devem especificar a vazão bombeada em cada camada atravessada pelos filtros, proporcionalmente à transmissividade da camada. Isto deve-se ao fato do MODFLOW assinalar o poço no centro da célula, considerando que o filtro se estende por toda a camada. Assim, o MODFLOW não aceita um poço aberto em mais de uma camada do modelo. Para contornar este problema, pode-se simular um grupo de poços simples, cada um com filtro em uma camada, simulando um poço

com filtro em multicamadas (Figura 5.9). Para calcular a vazão de cada um dos poços simples, usa-se a relação com a transmissividade de cada camada (McDonald & Harbaugh 1988):

$$\frac{Q_n}{Q_w} = \frac{T_n}{\sum T}$$

onde n é o número da camada do modelo.

Facilitando a entrada de dados, o programa Visual MODFLOW permite inserir o perfil real do poço de bombeamento, sendo que posteriormente o programa faz os cálculos para simular um grupo de poços simples e inserir os dados no MODFLOW.

-Condições iniciais

Após traduzidas as características reais do sistema hidrogeológico para o formato da linguagem matemática do programa, através da definição da grade, das condições de contorno

externas e internas e da discriminação das fontes e dos sumidouros de água, é necessário indicar as condições iniciais para que a equação de fluxo de água subterrânea possa ser resolvida, pois o programa necessita de pelo menos um nó com carga hidráulica conhecida para poder calcular para o restante da área.

A condição inicial mais utilizada é uma carga hidráulica média discriminada para todo o sistema modelado. Como muitas vezes a carga hidráulica não é conhecida, um valor médio estimado para a área é adotado. Para otimizar o tempo de simulação no processo de calibração, é usual utilizar as cargas hidráulicas calculadas pelo próprio modelo matemático na simulação anterior.

5.2.4. Calibração do modelo

O processo de calibração consiste em ajustar o modelo matemático simulado ao sistema hidrogeológico observado. Neste processo, os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno são ajustados para que as cargas hidráulicas simuladas pelo modelo matemático sejam semelhantes às aquelas observadas no sistema real. O processo de calibração mais comum é de 'tentativa e erro', onde os parâmetros são ajustados manualmente através de simulações sucessivas e comparação entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas (Anderson & Woessner 1992). Quando a diferença entre a carga hidráulica calculada e observada atingir um valor aceitável, previamente definido, o modelo será considerado calibrado. Este valor aceitável é também chamado de "critério de calibração" e a diferença entre as cargas hidráulicas é tratada como "resíduo". Há três maneiras mais comuns para calcular a média das diferenças entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas no domínio do modelo. A média dos resíduos (denominado nos programas como ME - 'mean error') é simplesmente a média da diferença entre as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo (h_{calc}) e observadas (h_{obs}). Esta média do resíduo é calculado por:

$$ME = 1/n \sum_{i=1}^n (h_{obs} - h_{calc})_i$$

onde n é o número de valores de calibração.

Este cálculo da média do resíduo considera os valores positivos e negativos, enquanto que a média do resíduo absoluto (referenciado como MAE - 'mean absolute error' nos programas existentes) considera o valor absoluto da diferença entre a carga hidráulica observada e a calculada. Esta média absoluta é obtida por:

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n | (h_{obs} - h_{calc})_i |$$

O desvio padrão, isto é, a raiz quadrada da média dos quadrados do resíduo, é um dos critérios de calibração mais utilizados, sendo denominado nos programas pela sigla RMS ('root mean squared'), e é calculado por:

$$RMS = [1/n \sum_{i=1}^n (h_{obs} - h_{calc})_i^2]^{0,5}$$

A magnitude do resíduo aceitável depende da variação de carga hidráulica dentro do domínio do modelo. Assim, considerando um lugar plano onde a variação do nível da água não supera 5 metros, uma diferença entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas de 1 metro é um valor inaceitável. Por outro lado, se a variação for da ordem de centenas de metros, esta diferença é insignificante.

Dessa forma, adota-se também um outro critério relativo à diferença de carga hidráulica total (ΔH) no domínio do modelo, denominado neste trabalho de 'porcentagem de resíduo' e representado por:

$$\% \text{resíduo} = RMS/\Delta H$$

sendo que, assume-se um valor inferior a 10% como aceitável (Guiguer, comunicação verbal).

5.2.5. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade objetiva mostrar as incertezas do modelo calibrado advindas das estimativas feitas para os parâmetros hidráulicos, condições de contorno e intervenções no sistema natural como os poços de bombeamento (Anderson & Woessner 1992).

Esta análise de sensibilidade consiste em variar, sistematicamente, os valores dos parâmetros hidráulicos e das condições de contorno para verificar o seu efeito nas cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático. Dessa forma, identificam-se os parâmetros mais sensíveis e seus efeitos no modelo calibrado.

6. Aplicação da modelação matemática tridimensional no município de Caçapava

6.1. Caracterização da área

6.1.1. Localização

O município de Caçapava localiza-se no Vale do Paraíba, na região leste do Estado de São Paulo, a 110 km a leste da capital paulista. A área está compreendida entre as coordenadas 22° 58' e 23° 15' de latitude Sul e 45° 35' e 45° 50' de longitude Oeste (414 km a 440 km E e 7430 a 7458 km N, em coordenadas UTM) (Figura 6.1). O município possui 378 km² e as principais vias de acesso são as Rodovias Presidente Dutra/Airton Senna da Silva e Carvalho Pinto.

Figura 6.1 - Localização do município de Caçapava

As porções norte e sul do município são representadas pelas serras do Palmital e do Jambeiro respectivamente, que alcançam na área de interesse, altitudes em torno de 1.000 metros. O município de Caçapava limita-se ao norte com o município de Monteiro Lobato e ao sul com os municípios de Jambeiro e Redenção da Serra. A oeste, Caçapava limita-se com o município de São José dos Campos e a leste com Taubaté.

O principal corpo d'água é o rio Paraíba, que corta o município de oeste para leste em sua porção central. As menores cotas topográficas são encontradas na várzea do rio Paraíba, em torno de 540 metros.

6.1.2. Geologia regional

O Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini 1989), com direção geral ENE, estende-se desde o Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Paraná. As depressões formadas deram origem às diversas bacias sedimentares, tendo sido preenchidas por

sequências vulcano-sedimentares. No Estado de São Paulo, estas bacias continentais, de idade cenozóica, são denominadas Bacia de Taubaté e Bacia de São Paulo.

O Embasamento Cristalino destas bacias é constituído por rochas metamórficas (principalmente gnaisses, milonitos e xistos diversos), ígneas (granitos) e migmatitos com estruturas variadas, ocorrendo ocasionalmente intrusões básicas e alcalinas na forma de diques e sills nos arredores da Bacia de Taubaté (Riccomini et al.1987).

Segundo IPT (1990), o principal domínio litológico em contato com a face norte da Bacia de Taubaté na região entre Caçapava e Pindamonhangaba é o Complexo Paraíba do Sul. Já ao sul da bacia e ao norte da falha do Buquira ocorre o Complexo Embu e, na região sul de Caçapava têm-se rochas granitóides da Suíte Jambeiro, como mostra a Figura 6.2.

O Complexo Paraíba do Sul agrupa rochas predominantemente gnáissicas e migmatíticas, fortemente deformadas. As unidades compostas pelos gnaisses, xistos e quartzitos e pelos biotita gnaisses, localmente migmatizados ocorrem principalmente a norte da falha de Jundiuvira. O embasamento da porção nordeste da Bacia de Taubaté é formada predominantemente pelas unidades litoestratigráficas compostas por migmatitos estromatíticos e gnaisses e migmatitos blastomiloníticos. Na porção sul da Bacia de Taubaté, na região de Jacareí, ocorre também o Complexo Paraíba do Sul, composto principalmente por biotita gnaisses bandados e migmatitos fortemente deformados.

O Complexo Embu, descrito por IPT (1990), engloba rochas metamórficas de médio a alto grau, compostas por xistos diversos associados a gnaisses e a migmatitos, ocorrendo, subordinadamente, corpos de anfibolitos. O contato com o Complexo Paraíba do Sul, considerado seu embasamento, é em geral discordante ou tectônico. O Complexo Embu ocorre ao norte e ao sul da Bacia da Taubaté, com migmatitos apresentando maior expressão em área na porção norte. Os gnaisses e xistos apresentam maior predominância na porção ao sul da bacia.

Entre o sul da Bacia de Taubaté e o norte da zona de cisalhamento Taxaquara têm-se a Suíte Granítica Jambeiro, inserida no Complexo Paraíba do Sul (IPT 1990), onde destaca-se, ao sul de Caçapava, o Granito Serra do Jambeiro. Esta unidade constitui-se de um batólito alongado segundo a direção NE, possuindo cerca de 6 km de largura por 30 km de extensão, constituído por biotita granito, gnáissico, com foliação milonítica/gnáissica.

Os sedimentos terciários que preenchem a Bacia de Taubaté eram, até a alguns anos atrás, referidos pela classificação adotada por Hasui & Ponçano (1978), de Grupo Taubaté, subdividido em duas formações, Tremembé e Caçapava. Mais tarde, Vespucci (1984) definiu a Formação Jacareí, acrescentando-a ao Grupo Taubaté. Entretanto, Riccomini (1989) propôs uma nova classificação litoestratigráfica, única para as bacias sedimentares de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda, pertencentes ao Rift Continental do Sudeste do Brasil, baseando-se na caracterização dos sistemas deposicionais. A Figura 6.3, elaborada por IPT (1990), resume a evolução da coluna litoestratigráfica da Bacia de Taubaté.

Atualmente, a classificação aceita e utilizada é aquela adotada por Riccomini (1989), que reconheceu cinco sistemas deposicionais, relacionando-os às unidades litoestratigráficas, a saber:

- leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados, associados à Formação Resende;
- lacustre, representado pela Formação Tremembé;
- fluvial meandrante das bacias de São Paulo, Resende e porção oeste da Bacia de Taubaté, representado pela Formação São Paulo;
- fluvial entrelaçado da Formação Itaquaquecetuba; e

RICCOMINI (1989)		
VERPUCCI (1984)	GRUPO TAUBATÉ FORMAÇÃO JACAREÍ FORMAÇÃO CAÇAPAVA	FORMAÇÃO TREMEMBÉ
HASUI & PONÇANO (1978)	GRUPO TAUBATÉ FORMAÇÃO CAÇAPAVA	FORMAÇÃO TREMEMBÉ
CARNEIRO et al. (1976)	FORMAÇÃO CAÇAPAVA	—
AB'SABER (1969)	GRUPO PARAÍBA DO SUL FORMAÇÃO PARATEÍ DO MEIO	FORMAÇÃO SÃO JOSÉ DOS CAMPOS FORMAÇÃO TREMEMBÉ
MEZZA- LIRA (1967/1968)	GRUPO TAUBATÉ FORMAÇÃO SÃO PAULO	FORMAÇÃO TREMEMBÉ
AB'SABER (1958)	FORMAÇÃO TAUBATÉ	—
SETZER (1955- 1956)	UNIDADE SUPERIOR QUATERNÁRIA	UNIDADE INFERIOR TERCIÁRIA
ALMEIDA (1955)	FORMAÇÃO SÃO PAULO	FORMAÇÃO TREMEMBÉ
MORAES REGO (1933)	CAMADAS SÃO PAULO	CAMADAS PARAÍBA DO SUL
WASH- BURNIE (1930)	SEÇÃO SUPERIOR (FLUVIAL E ARENOSA)	SEÇÃO INFERIOR (LACUSTRINA E PELÍTICA)
FLORENCE & PACHECO (1928)	CAMADAS PARAÍBA DO SUL	
MISSIS (1942)	SEDIMENTOS PLIOCÊNICOS NO VALE DO PARAÍBA	

Figura 6.3 - Evolução da nomenclatura litoestratigráfica das unidades sedimentares da Bacia de Taubaté (IPT 1990)

- fluvial meandrante da porção central da Bacia de Taubaté, definido como Formação Pindamonhangaba.

Na Bacia de Taubaté ocorrem apenas as formações Resende, Tremembé, São Paulo e Pindamonhangaba, esta última, subdividida, por Mancini (1995), nos membros Pararangaba e Presidente Dutra, cujas relações estratigráficas são ilustradas na Figura 6.4.

A Formação Resende ocorre predominantemente nas bordas norte e sul da bacia e é constituída por fácies proximal e distal denominadas de A e B por Riccomini (1989). A fácies proximal é representada por diamictitos e conglomerados com seixos, matacões e blocos com matriz lamítica. Na fácies distal ocorrem lamitos predominantemente arenosos com interdigitações de arenitos. Nesta formação Riccomini (1989) descreve ainda, crostas calcíticas associadas à fácies B e, ao sul do Maciço de Itatiaia, a ocorrência de um corpo tabular, de espessura decimétrica, siltico-arenoso rico em argila.

O sistema lacustre, representado pela Formação Tremembé, ocorre principalmente na porção central da Bacia de Taubaté. Esta formação é composta por argilas verdes, maciças, de espessura métrica, com intercalações ou associações de calcários dolomíticos e ritmitos formados por folhelhos e margas, e de arenitos grosseiros, conglomeráticos, com espessura decimétrica a métrica. Na borda norte da Bacia de Taubaté, próximo à Serra da Mantiqueira, ocorrem arenitos, de espessura centimétrica, com ocasionais conglomerados (Riccomini 1989).

A Formação São Paulo, que na Bacia de Taubaté ocorre em sua porção NW e central, é formada por arenitos de granulação média a grossa e arenitos grossos, conglomeráticos, com granodecrescência ascendente, chegando a siltitos e argilitos.

O sistema fluvial meandrante da porção central da Bacia de Taubaté é denominado de Formação Pindamonhangaba. Esta formação foi subdividida em dois membros, por Mancini (1995), a saber: o Membro Pararangaba e o Membro Presidente Dutra. O Membro Pararangaba, na região entre Jacareí e Pindamonhangaba, aflora principalmente ao longo da várzea do Rio Paraíba, sendo composto por conglomerados de matriz arenosa média a grossa. Para o topo, esta unidade grada para arenitos finos a médios e siltitos, ricos em matriz argilosa. Mancini (1995) estima uma espessura total para esta unidade, da ordem de 30 metros, encontrando em afloramento, espessura máxima da ordem de 4 metros. O Membro Presidente Dutra, com espessura total estimada de 40 metros e observada em afloramento da ordem de 8 metros (Mancini op. cit.), é composto por argilitos e siltitos, associados a arenitos finos e lamitos.

Os sedimentos quaternários, recentes, depositados principalmente ao longo do vale do rio Paraíba é formado por depósitos coluviais e de tálus, argilo-arenosos ou conglomeráticos e por depósitos aluviais arenosos. Segundo IPT (1990), na área entre São José dos Campos e Caçapava sobressai um material orgânico, com espessura da ordem de 1 metro, sobreposto a

Figura 6.4 - Coluna estratigráfica das unidades da Bacia de Taubaté (Mancini 1995)

Figura 6.4 - Coluna estratigráfica das unidades da Bacia de Taubaté (Mancini 1995)

uma argila maciça cinza a esbranquiçada de aproximadamente 2 metros de espessura. Abaixo destas argilas, têm-se a ocorrência de arenitos grossos a finos, esbranquiçados.

O arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté é compartimentado por altos e baixos estruturais, sendo que no município de Caçapava existe uma feição positiva, estudada através de métodos geofísicos por Fernandes (1993), como mostra a Figura 6.5. Este alto estrutural, denominado na literatura de Alto de Caçapava, chega a aflorar na porção central do município, como mostra o mapeamento geológico de Mancini (1995), separando os compartimentos tectônicos de São José dos Campos e Quiririm-Taubaté. A espessura de sedimentos chega a atingir 500 metros no compartimento Quiririm-Taubaté e cerca de 250 metros no compartimento São José dos Campos, como identificado por DAEE (1977a). Fernandes (1993), com base em dados geofísicos, estima espessuras da ordem de 600 m e 300 m, para estes compartimentos, respectivamente. Segundo seu levantamento, as maiores espessuras de sedimentos encontram-se na borda leste da Bacia de Taubaté, no compartimento tectônico de Aparecida-Lorena.

6.1.3. Hidrogeologia regional

O Aquífero Cristalino, de extensão regional, constituído por rochas do Embasamento Cristalino, é pouco explorado na região do Vale do Paraíba em função de sua produtividade relativamente menor em relação ao Aquífero Sedimentar.

Este aquífero, dada sua constituição litológica e estrutural, tem sua produtividade associada ao fraturamento da rocha e, por vezes, ao manto de intemperismo. De modo geral, sua produtividade é baixa, apresentando melhor resultado quando os poços estão associados às estruturas tectônicas. DAEE (1977a) reporta apenas dois testes de bombeamento em poços que exploram o Embasamento Cristalino, obtendo-se valores de transmissividade de $3,5 \times 10^{-4}$ m²/s e $8,1 \times 10^{-6}$ m²/s, o que resulta em valores de condutividade hidráulica de $4,3 \times 10^{-6}$ m/s e $1,1 \times 10^{-7}$ m/s. Outro estudo, englobando a Grande São Paulo, e também envolvendo o Embasamento Cristalino, mostrou transmissividades entre $4,6 \times 10^{-6}$ a $1,6 \times 10^{-4}$ m²/s (DAEE, 1975). A capacidade específica média deste aquífero, de acordo com DAEE (1975) e DAEE (1979), gira em torno de 0,3 m³/h/m ($8,3 \times 10^{-5}$ m³/s/m). IG (1995), avaliando o aquífero cristalino na região do entorno de Campinas, obteve valor médio de capacidade específica um pouco superior (0,56 m³/h/m ou $1,6 \times 10^{-4}$ m³/s/m), entretanto, os valores são muito variáveis. IG (1993) obteve uma variação entre 0,09 a 1,32 m³/h/m ($2,5 \times 10^{-5}$ a $3,7 \times 10^{-4}$ m³/s/m) no município de Campinas. DAEE (1981) mostra um intervalo com valores maiores, entre 0,02 a 7 m³/h/m ($5,6 \times 10^{-6}$ a $1,9 \times 10^{-3}$ m³/s/m), com uma mediana muito baixa, de 0,06 m³/h/m ($1,7 \times 10^{-5}$ m³/s/m), refletindo baixa produtividade para o Aquífero Cristalino.

Figura 6.5 - Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté (Fernades 1993)

Quando localizados em lineamentos de drenagem, associados às estruturas geológicas que controlam a circulação da água subterrânea, os poços apresentam valores mais elevados de capacidade específica como comprovam os estudos de DAEE (1981), IG (1993), IG (1995), Pereira (1996) e Oda (1998). Um estudo detalhado sobre o controle tectônico na produtividade dos poços foi efetuado por Fernandes (1997), mostrando a estreita relação da produtividade com as feições geológicas-estruturais.

A principal unidade aquífera existente na Bacia de Taubaté é o Aquífero Sedimentar do Vale do Paraíba, denominação dada por DAEE (1977a), sendo composto por sedimentos que preenchem a referida Bacia. Este aquífero possui um formato alongado na direção ENE-WSW e é heterogêneo devido ao caráter essencialmente lenticular das camadas arenosas e argilosas, sendo localmente contínuo. Em função dos ambientes de sedimentação, os compartimentos Jacareí-São José dos Campos e Aparecida-Lorena são mais arenosos, encontrando-se poços com vazão superior a 100 m³/h. Segundo estudos geofísicos de Fernandes (1993), a espessura destes sedimentos pode chegar a 300 metros no compartimento Jacareí-São José dos Campos e a 800 metros no compartimento Aparecida-Lorena.

Segundo DAEE (1977a), na região entre Pindamonhangaba e Taubaté predominam sedimentos mais argilosos, com poços bem menos produtivos. Entretanto, vazões da ordem de 20 a 30 m³/h são obtidas quando os poços exploram lentes arenosas interdigitadas no pacote argiloso. Fernandes (1993) estima que neste compartimento, os sedimentos atinjam cerca de 600 metros de espessura.

Ohara (1995), em um estudo de zoneamento geoambiental na região, sugere, como melhores áreas para a exploração de água subterrânea, as regiões entre Pindamonhangaba e Roseira; Eugênio de Melo-Piedade; Caçapava-Caçapava Velha e Caçapava Velha-Quiririm. Entretanto, neste trabalho aqui desenvolvido, a região de Caçapava Velha não mostrou boa produtividade em função da predominância de sedimentos mais finos, discordando dos resultados obtidos por Ohara (1995).

Os valores de transmissividades obtidos por DAEE (1977a) variaram entre 10 e 822 m²/d ($1,2 \times 10^{-4}$ e $9,5 \times 10^{-3}$ m²/s). Considerando-se a espessura do aquífero como a profundidade atravessada pelo poço, estimou-se uma variação da condutividade hidráulica, com base nestes dados, de $1,0 \times 10^{-6}$ a $6,5 \times 10^{-5}$ m/s. Os valores de coeficiente de armazenamento obtidos nestes testes de bombeamento conduzidos por DAEE (1977a) variaram entre 0,0007 a 0,1. Sedimentos correlatos da Bacia Sedimentar de São Paulo mostraram, segundo DAEE (1975), valores de transmissividade variando entre 15 e 70 m²/d ($1,7 \times 10^{-4}$ e $8,1 \times 10^{-4}$ m²/s).

Os valores de capacidade específica dos poços cadastrados por DAEE (1977a) no Aquífero Sedimentar variaram entre 0,2 e 14 m³/h/m ($5,6 \times 10^{-5}$ a $3,9 \times 10^{-3}$ m³/s/m) sendo que cerca de 50% deles apresentam valores acima de 1 m³/h/m ($2,8 \times 10^{-4}$ m³/s/m), mostrando uma

produtividade muito superior ao Aquífero Cristalino. Neste estudo, DAEE (1977a) ressalta a existência de poços mais produtivos localizados nas proximidades de São José dos Campos.

Este Aquífero Sedimentar é considerado um aquífero livre, apresentando localmente um caráter semi-confinado devido às intercalações de material fino e grosseiro, predominantes no pacote sedimentar. Como reflexo deste caráter de aquífero livre, as linhas equipotenciais acompanham o traçado da topografia, indicando como principal área de descarga regional do fluxo da água subterrânea, o rio Paraíba (Figura 6.6), sendo que a recarga ocorre em toda a extensão superficial do aquífero. Assim, as linhas equipotenciais são mais elevadas nas porções próximas à serra (altitude próxima a 600 metros), diminuindo em direção ao vale do rio Paraíba, atingindo altitudes da ordem de 520 metros. Os gradientes hidráulicos variam de 0,002 a 0,02 m/m (DAEE, 1977a).

O mesmo comportamento foi observado por Hirata (1994), onde a principal área de descarga regional é o rio Paraíba, sendo que as drenagens secundárias atuam como área de descarga local.

6.2. Metodologia

Neste item são descritas as etapas e metodologias utilizadas para a construção do modelo conceitual da área, efetuada através da interpretação dos dados geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos levantados. Cabe lembrar que este trabalho enfocou exclusivamente a interpretação de dados existentes, ressaltando a importância do tratamento e organização das informações já disponíveis, de forma a entender o sistema hidrogeológico, subsidiar o gerenciamento dos recursos hídricos e direcionar as necessidades de trabalhos futuros, de forma previamente organizada, otimizando os recursos financeiros e promovendo uma proteção efetiva da água subterrânea.

Para o entendimento e construção do modelo conceitual, foram primeiramente definidas as unidades hidroestratigráficas a partir da interpretação dos perfis construtivo e litológico dos poços e das perfilagens geofísicas existentes, associadas ao mapa geológico da área.

O parâmetro condutividade hidráulica foi obtido a partir da interpretação dos dados de testes de bombeamento levantados no cadastramento dos poços.

Para a avaliação do comportamento do fluxo da água subterrânea foram confeccionados mapas potenciométricos utilizando-se dados da época da perfuração dos poços, e para a definição do volume de água escoado para as drenagens, foram avaliados os dados hidrológicos para a estimativa do escoamento básico.

Estes dados, então, permitiram o entendimento da forma de ocorrência e comportamento do fluxo da água subterrânea. Com isso, passou-se à segunda fase do estudo que foi a modelação matemática, a qual permitiu definir as zonas de contribuição e transporte dos poços

LEGENDA

- linhas equipotenciais (m)
- rio Paraíba
- - - rod. Presidente Dutra
- área urbana
- Aquífero Sedimentar
- Embasamento Cristalino

Escala aproximada
0 7 14 21 28 km

Figura 6.6 - Mapa potenciométrico da Bacia de Taubaté (DAEE 1977a).

de abastecimento, indicando o risco potencial existente de contaminação da água subterrânea, frente às atividades antrópicas instaladas no município.

A Figura 6.7 resume a etapas executadas na aplicação da modelação matemática tridimensional no município de Caçapava.

6.2.1. Levantamento das informações existentes

Este estudo objetivou mostrar a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional, utilizando e organizando os diversos dados existentes, muitas vezes dispersos em diversos órgãos ou empresas, de forma a subsidiar o gerenciamento e a proteção das águas subterrâneas.

O estudo baseou-se praticamente nos dados de poços existentes no município, associados aos dados hidrológicos e geológicos existentes.

As informações geológicas foram obtidas através de levantamento bibliográfico (mapeamentos e estudos correlatos realizados na região da Bacia de Taubaté), adotando-se o mapa geológico de Mancini (1995) como base para o trabalho aqui desenvolvido.

O abastecimento público do município de Caçapava é gerenciado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que colaborou neste estudo, disponibilizando as informações dos poços e sobre o abastecimento da cidade.

O cadastro dos poços foi complementado com trabalho em campo e com visitas ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), à Prefeitura Municipal e às principais empresas de perfuração que atuam na região, que gentilmente forneceram todos os dados solicitados.

As informações levantadas foram: perfil construtivo, dados do nível d'água e vazão, perfil litológico, perfilagem geofísica e a planilha do teste de bombeamento.

No município de Caçapava foram cadastrados um total de 98 poços, até 1997, localizados ao sul do rio Paraíba e concentrados, principalmente, nas proximidades da zona urbana (Figura 6.8 e Anexo 1). Com relação à numeração, para os poços pertencentes à SABESP adotou-se para este estudo, a mesma numeração obedecida pela empresa, apenas precedidos do prefixo SA. Os poços da SABESP, que abastecem os bairros isolados de Caçapava Velha, Guamirim e Vila Mariana tiveram sua numeração acrescida dos prefixos SACV, SAGU e SAVM, respectivamente. Os poços particulares e pertencentes à Prefeitura Municipal tiveram suas numerações precedidas pelos prefixos PA e PF, respectivamente, para diferenciar os proprietários, pois os poços pertencentes à SABESP bombeiam grandes vazões, em geral, superiores a 1000 m³/d.

Dos poços cadastrados, 40 pertencem à SABESP, sendo que, muitos deles já foram soterrados, não existindo qualquer registro de dados, algumas vezes, apenas com localização

Figura 6.7 - Metodologia empregada na aplicação da modelação matemática tridimensional no município de Caçapava.

aproximada. Dessa forma, considerou-se apenas os poços com informações confiáveis, totalizando os 18 poços em atividade em 1996 e mais três poços perfurados a partir de 1997. Estes três poços novos (SA26, SA27 e SAGU7) foram considerados como desativados neste estudo pois, para fins de calibração do modelo matemático desenvolvido, utilizou-se dados anteriores à sua construção.

Os dados de monitoramento de vazão, tempo de funcionamento e nível d'água foram obtidos junto à SABESP, que monitorou seus poços durante o período de junho/94 a maio/96. Estes dados foram utilizados na construção e calibração do modelo matemático.

Os dados hidrológicos foram levantados junto ao DAEE e também através dos boletins pluviométricos e fluviométricos do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). No total foram cadastrados no município de Caçapava, cinco postos pluviométricos e três postos fluviométricos, sendo um no córrego Caçapava Velha, outro no córrego Divisa e um no rio Paraíba, como mostra a Tabela 6.1. A localização e a discussão sobre os dados hidrológicos levantados são mostradas mais adiante.

Tabela 6.1 - Postos pluviométricos e fluviométricos do município de Caçapava.

Tipo	Posto	Bacia hidrográfica	Latitude	Longitude	Período
Pluviométrico	E2-001	Divisa	23° 08'	45° 45'	1974-1996
	E2-002	Divisa	23° 13'	45° 44'	1974-1996
	E2-034	Caçapava Velha	23° 08'	45° 43'	1974-1996
	E2-048	Paraíba	23° 05'	45° 40'	1974-1996
	E2-113	Paraíba	23° 02'	45° 47'	1974-1996
Fluviométrico	2E-016	Caçapava Velha	23° 04' 16"	45° 40' 08"	1958-1995 *
	2E-021	Divisa	23° 07' 33"	45° 45' 36"	1970-1975
	23-45-1-PFR	Paraíba	23° 04' 48"	45° 42' 24"	1923-1928

Para fins de avaliação do risco de contaminação dos poços de abastecimento público, cadastrou-se no município as principais atividades que apresentassem algum potencial para contaminar o aquífero. Este levantamento incluiu as indústrias e as áreas com tanques de armazenamento de combustíveis e outros líquidos perigosos.

As indústrias foram cadastradas junto à Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que mantém um cadastro para acompanhamento das principais indústrias da região. As informações coletadas foram: tipo de atividade, porte da indústria, matéria-prima manuseada, produtos, resíduos ou efluentes produzidos. Com o auxílio dos técnicos da CETESB, foram selecionadas as empresas que manuseiam produtos perigosos e apresentam algum risco de contaminação para as águas

subterrâneas. Do universo de indústrias analisadas, foram selecionadas 17, localizadas principalmente ao longo da Rodovia Presidente Dutra (Figura 6.9), cujos dados pode, ser observados no Anexo 2.

O cadastramento das áreas com tanques de armazenamento de combustível e outros líquidos perigosos foi realizado com o auxílio dos técnicos da Prefeitura Municipal, sendo que foi levantado um total de 24 locais (Anexo 3), sendo a maioria deles de postos de serviço. Existem também, algumas garagens de empresas de ônibus que mantêm tanques para armazenamento de combustíveis. A maior parte destas áreas localiza-se na área urbana e ao longo da Rodovia Presidente Dutra, como mostra a Figura 6.9.

6.2.2. Definição das unidades hidroestratigráficas

Através da análise dos mapas geológicos e hidrogeológicos existentes, definiu-se as duas grandes unidades hidroestratigráficas principais para a área estudada: os aquíferos Cristalino e o Sedimentar.

Com base no mapa geológico de Mancini (1995), definiu-se um maior detalhamento hidrogeológico do aquífero sedimentar, considerando as diferentes formações geológicas, as quais apresentam constituição litológica distinta.

Em subsuperfície, a distinção destas unidades foi realizada através da perfilagem geofísica e do perfil litológico dos poços.

A perfilagem geofísica existente (γ , potencial espontâneo e resistividade aparente) permitiu diferenciar sedimentos mais finos na porção superior do aquífero sedimentar, caracterizados pela maior frequência de raios gama e menor resistividade aparente, com predominância de material mais grosseiro em profundidade.

A correlação dos diversos perfis litológicos e perfilagens dos poços permitiu confeccionar as seções geológicas e o Mapa de Contorno Estrutural do Topo do Embasamento Cristalino.

A disposição destas unidades hidroestratigráficas em subsuperfície serviram de base para a determinação das camadas do modelo matemático.

Um maior detalhamento das unidades hidroestratigráficas em subsuperfície foi obtido a partir da interpretação dos testes de bombeamento existentes, os quais permitiram o estabelecimento das características hidráulicas do aquífero sedimentar.

6.2.3. Testes de bombeamento

Segundo Kruseman & Ridder (1979), o teste de bombeamento pode ser classificado em dois tipos em função da resposta esperada. O primeiro, que visa a determinação das características hidráulicas de um aquífero, pode ser chamado de "teste do aquífero", uma vez que procura-se caracterizar o meio físico. O segundo tipo de teste é aquele chamado de "teste

Figura 6.9 - Localização das indústrias e áreas com tanques para armazenamento de combustíveis cadastrados no município de Caçapava

do poço", ou simplesmente, "teste de vazão", onde procura-se determinar apenas a capacidade produtiva do poço, para fins de dimensionamento do sistema de extração de água.

No teste do aquífero, as características hidráulicas são obtidas através de aplicação de fórmulas analíticas, utilizando-se a vazão, o rebaixamento medido no poço de observação e a distância radial entre este e o poço bombeado. No teste de vazão, os dados necessários são, apenas, a vazão e o rebaixamento medido no próprio poço. Frente ao maior custo de um teste de aquífero, e o objetivo da perfuração da maior parte dos poços existentes, que é o abastecimento e não a pesquisa ou estudo hidrogeológico, os testes de bombeamento levantados são, na realidade, testes de vazão.

Entretanto, segundo Kruseman & Ridder (1979), estes dados podem ser considerados para uma avaliação geral das características do aquífero. Neste trabalho, considerando a ênfase de trabalhar com dados existentes, utilizaram-se todos os testes de vazão levantados para a determinação das características hidráulicas do aquífero.

O cenário de um teste de bombeamento pode ser considerado como um fluxo em estado não estacionário, que começa no início do bombeamento e termina quando é atingido o equilíbrio.

O primeiro a resolver a equação de fluxo radial ao poço, utilizando uma analogia com o fluxo de calor em um condutor termal, foi Theis (1935 *apud* Fetter 1988), desenvolvendo uma solução em termos de rebaixamento.

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

sendo que u pode ser expresso por:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

onde

r = é a distância ao ponto de observação, radial ao poço [L]

h = carga hidráulica a um dado tempo t , após o início do bombeamento [L]

S = coeficiente de armazenamento [L^0]

T = transmissividade [L^2/T]

t = tempo [T]

Q = vazão constante bombeada [L^3/T]

h_0 = é a carga hidráulica antes do bombeamento, sendo que a diferença entre h_0 e a carga hidráulica (h) a um determinado tempo é denominado de rebaixamento (s).

A superposição da curva padrão de $W(u)$ versus $1/u$ com a curva formada pelos dados de tempo versus rebaixamento fornecem os parâmetros a serem aplicados à equação de Theis e obtenção das características hidráulicas do aquífero.

Esta solução pela equação de Theis assume que:

- o aquífero é homogêneo, isotrópico, confinado e infinito, com espessura uniforme em toda a área afetada pelo bombeamento;
- a superfície potenciométrica antes do início do bombeamento é horizontal;
- o poço é totalmente penetrante, com pequeno diâmetro e é bombeado a uma vazão constante durante todo o teste;
- pequeno diâmetro do poço podendo-se ignorar o armazenamento dentro deste;
- a água bombeada provém do armazenamento, sendo liberada instantaneamente após a queda da carga hidráulica.

Uma simplificação da equação de Theis foi desenvolvida por Cooper & Jacob (1946 *apud* Domenico & Schwartz 1998), resultando na equação:

$$s = \frac{2,3 Q}{4 \pi T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S}$$

O método de Cooper-Jacob, por ser uma simplificação do método de Theis, assume as mesmas condições para o sistema como listado anteriormente, somando a condição de que u deve ser inferior a 0,03 (Dawson & Istok 1991), o que implica em valores pequenos de distância ou grandes de tempo. Alguns autores são mais flexíveis quanto ao valor de u , aceitando o limite de 0,05 (Fetter 1988) enquanto outros são mais rígidos, adotando o limite de 0,01 (WHI s/ data).

Para aquíferos livres, considerando-se o estado não estacionário, o método mais usado é de Neuman (1975), cuja equação de fluxo é dada por:

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} W(u_A, u_B, \eta)$$

onde $W(u_A, u_B, \eta)$ é a função do poço para aquíferos livres.

$u_A = (r^2 S)/(4Tt)$ para os primeiros dados de tempo/rebaixamento

$u_B = (r^2 S_y)/(4Tt)$ para os últimos dados de tempo/rebaixamento

$$\eta = \frac{r^2 K_v}{b^2 K}$$

onde, os parâmetros utilizados, além daqueles já descritos anteriormente, são:

S_y = porosidade efetiva

K_v = condutividade hidráulica vertical

b = espessura saturada do aquífero antes do início do bombeamento

As curvas padrões de Neuman podem ser divididas em dois segmentos. As curvas tipo A (Figura 6.10) são destinadas à análise inicial do teste de bombeamento, quando a água é liberada instantaneamente do armazenamento por expansão da água e compressão do aquífero, comportando-se como um aquífero confinado e seguindo a curva de Theis. Com a continuação do bombeamento, a taxa de rebaixamento aumenta, e a água começa a ser liberada pela ação da gravidade. Esta fase é representada pelas curvas tipo B de Neuman, utilizando para a interpretação os dados mais tardios de tempo/rebaixamento.

Este método assume que:

- o aquífero é homogêneo, isotrópico, livre e infinito com espessura uniforme na área afetada pelo bombeamento
- o rebaixamento é bem menor que a espessura saturada do aquífero
- a superfície potenciométrica é horizontal antes do início do bombeamento
- a vazão de bombeamento é constante
- o poço é totalmente penetrante
- o diâmetro do poço é pequeno e o armazenamento dentro dele é desprezível

Os efeitos de um poço parcialmente penetrante causados no fluxo da água subterrânea durante um teste de bombeamento refletem nos resultados das curvas de tempo x rebaixamento, como mostrado por Neuman (1974), entretanto, considerando o longo intervalo de tempo de bombeamento, estes foram desconsiderados.

6.2.4. Avaliação dos níveis de água dos poços

Para avaliação do comportamento do fluxo da água subterrânea na área de interesse, foram confeccionados mapas potenciométricos a partir dos níveis de água medidos nos poços, na época da perfuração dos mesmos.

Os mapas potenciométricos foram construídos considerando os poços perfurados nos períodos de 1950 a 1970, 1971 a 1984 e 1987 a 1997. O mapa potenciométrico de 1950-1970 foi considerado como a superfície potenciométrica natural do aquífero, como se não houvesse a interferência antrópica.

Os mapas foram confeccionados para diferentes períodos de tempo pois observou-se um rebaixamento do nível da água na porção próxima da zona urbana de Caçapava onde concentram-se poços de grande vazão.

6.2.5. Determinação do escoamento básico e da taxa de recarga

Dentro do ciclo hidrológico, os processos de interesse para a hidrogeologia são aqueles referentes aos componentes subterrâneos, como o escoamento básico e a infiltração. O escoamento básico representa a descarga de água proveniente do aquífero para os corpos de água superficial, e a infiltração constitui a contribuição da precipitação ao reservatório subterrâneo, que em sua dinâmica, retornará na forma de escoamento básico, considerando um ambiente sem interferência.

Para a avaliação quantitativa dos componentes do ciclo hidrológico, dentro de um intervalo de tempo, é necessário considerar uma unidade de área onde a única entrada de água seja a precipitação. Para esta avaliação, ou seja, o balanço hídrico, a unidade considerada é a bacia hidrográfica (Figura 6.11), delimitada por divisores de água superficial.

O volume de água que escoar pela exutória da bacia é chamado de escoamento total ou deflúvio total, composto pela precipitação direta (Q_p) no corpo d'água, pelo escoamento superficial (Q_o), escoamento subsuperficial (Q_t) e o escoamento subterrâneo (Q_g), como mostra a Figura 6.12, sendo que a variação da vazão neste rio é uma resposta à precipitação.

Segundo Ward & Robinson (1990), a precipitação direta (Q_p) pode ser desprezada pois, em rios perenes, a área da superfície do corpo d'água é muito inferior em relação à área da bacia hidrográfica. Apenas em regiões com grandes áreas de lagos ou alagadiços, esta componente da precipitação direta pode apresentar grande influência no escoamento total.

O escoamento superficial (Q_o) é representado pela água que não conseguiu infiltrar-se no solo, escoando na superfície do terreno em direção ao canal da drenagem. A água que consegue se infiltrar mas, dada às características físicas do meio, se move horizontalmente nas porções superiores do solo não saturado ou acaba aflorando como fontes ou nascentes e se transformando em escoamento superficial, é denominada de escoamento subsuperficial (Q_t). Segundo Pinto (1976), é difícil a separação entre o escoamento superficial e subsuperficial.

A infiltração da água precipitada, alcançando o lençol freático, contribui para a reserva subterrânea, elevando o nível da água no aquífero e, conseqüentemente, o fluxo de contribuição para o rio. O escoamento subterrâneo (Q_g) é chamado, também, de escoamento básico ou fluxo de base do rio.

A representação gráfica do comportamento da vazão de um rio, ou deflúvio total, ao longo do tempo é feita através do hidrograma total (Figura 6.13). Após o início da precipitação ao tempo t_o , a vazão do rio aumenta, representando a ascensão do hidrograma, até atingir o valor máximo ao tempo t_B . Após o término da chuva, a vazão do rio decresce, sendo que o intervalo BC da Figura 6.13 é denominado de curva de depleção ou recessão.

Figura 6.13 - Hidrograma total e a separação do escoamento subterrâneo pelo método gráfico de união do início da ascensão e do final da recessão (Ward & Robinson 1990)

A separação dos diversos componentes do deflúvio total pode ser efetuada por diversos métodos, que Magalhães (1989) divide em clássicos, isotópicos e de modelagem determinística conceitual. Para o intuito deste trabalho, foram abordados apenas os métodos mais simples, para calcular, de forma genérica, o volume escoado para o rio, proveniente do aquífero adjacente.

Uma das formas mais simples de determinação do escoamento básico, pelo método clássico, é a análise gráfica arbitrária do hidrograma total da bacia de interesse. Segundo Chow (1964) e Martins (1976), separa-se o escoamento básico do escoamento superficial ligando-se, por uma linha reta, o início da ascensão do hidrograma ao final da recessão. A porção inferior do hidrograma é considerada como a contribuição do aquífero ao escoamento total do rio (Figura 6.13).

Quando o logaritmo do escoamento total é plotado em função do tempo, observa-se uma relação linear entre as duas variáveis, cuja linha reta que melhor se ajusta representa a curva de recessão da água subterrânea (Meyboom, 1961) como mostra a Figura 6.14. Nesta avaliação, assume-se que o escoamento básico começa quando o nível do rio fica abaixo do nível da água no aquífero, cessando quando iniciam-se as precipitações. Esta reta, então, representa o verdadeiro escoamento básico, assumindo-se que os incrementos em relação a ela são produzidos por chuvas ocasionais.

O escoamento básico potencial total (V_{tp}), definido por Meyboom (1961), é o volume que seria descarregado pelo aquífero caso houvesse uma depleção completa sem interrupção, desde o início da recessão até um tempo infinito. O valor deste escoamento básico potencial total pode ser calculado por (Fetter 1988):

$$V_{tp} = (Q_0 \cdot t_1) / 2,3$$

Onde

Q_0 = escoamento básico no início da recessão

t_1 = tempo necessário para o escoamento básico ir de Q_0 para $0,1 Q_0$

A diferença entre o escoamento básico potencial total (V_{tp}) e o volume que permanece no aquífero ao final da recessão, denominado escoamento básico potencial remanescente (V_t), representa o volume de água subterrânea escoado para o rio em um determinado ano hidrológico (Domenico & Schwartz 1998). Assim, para a determinação da parcela do escoamento básico potencial total que permanece no aquífero após um tempo t , ao final da recessão, utiliza-se a seguinte expressão:

$$V_t = V_{tp}/10^{(t/t_1)}$$

Ou seja:

$$V_t = ((Q_0 \cdot t_1)/2,3)/10^{(t/t_1)}$$

Segundo Meyboom (1961), a diferença entre o escoamento remanescente no aquífero após o final de uma dada recessão e o escoamento básico potencial total da próxima recessão representa o volume de água que foi adicionado ao reservatório subterrâneo durante este intervalo de tempo. Esta diferença é reconhecida como a recarga do aquífero ocorrida entre as recessões. Esta inferência toma por base a inexistência de grandes perdas de água subterrânea por usos diversos como poços, considerando que toda a descarga do aquífero seja feita através do escoamento básico.

Dessa forma, na área estudada, considerando as pressuposições acima expostas, foram selecionadas duas bacias hidrográficas, com dados hidrológicos, que apresentassem baixo índice de ocupação e, conseqüentemente, pequeno uso de água subterrânea, de forma a poder desprezar esta influência no escoamento básico e na recarga.

As bacias hidrográficas selecionadas para o estudo foram do córrego Caçapava Velha e do córrego Divisa (Figura 6.15), situadas, respectivamente, nas regiões sudoeste e sudeste do município, distantes dos poços de alta produtividade (vazões superiores a 1000 m³/d) destinados ao abastecimento público. Além disso, foram as duas únicas bacias hidrográficas no município que possuíam dados hidrológicos.

Os dados de monitoramento de vazão dos rios e também de pluviometria na região de interesse foram cadastrados junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo e também nos boletins fluviométricos e pluviométricos publicados (DAEE 1977b; 1988 e DNAEE 1970).

O período de monitoramento é diferente para as duas bacias hidrográficas. No córrego Caçapava Velha os dados de vazão foram monitorados por um longo período, de 1958 a 1995. Entretanto, o posto fluviométrico no córrego Divisa funcionou apenas durante o período de 1970 a 1975. Anos incompletos de monitoramento não foram considerados na avaliação do balanço hídrico.

O posto fluviométrico existente no rio Paraíba não foi utilizado para fins deste estudo pois sua bacia hidrográfica é muito extensa, estando sujeita às obras hidráulicas e captações de grande porte.

Figura 6.15 - Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos no município de Caçapava.

6.2.6. Modelação matemática

Esta etapa de trabalho seguiu os procedimentos da modelação matemática descritos de forma detalhada anteriormente, como: a escolha do aplicativo matemático, a definição e refinamento da área a ser modelada, definição das condições de contorno e dos parâmetros hidráulicos.

Após a entrada de dados, segue-se para a fase mais demorada, de calibração do modelo matemático, onde os parâmetros de entrada são mudados de forma que o sistema modelado represente o sistema real. A partir do modelo calibrado foi simulado o caminhamento de partículas para avaliação das zonas de contribuição e zonas de transporte dos poços de abastecimento.

6.2.7. Avaliação dos resultados e dos riscos associados às áreas de captura

O caminhamento de partículas simulado no modelo matemático avaliou as zonas de captura dos poços de abastecimento para tempo de trânsito de 10 e 50 anos. Estas zonas de transporte foram associadas ao cadastro das atividades antrópicas, permitindo uma avaliação do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas.

6.3. Modelo conceitual

6.3.1. Unidades hidroestratigráficas

Segundo o mapeamento geológico realizado por Mancini (1995), no município de Caçapava (Figura 6.16) afloram nas porções norte e sul do município, o Embasamento Cristalino, o qual possui um restrito testemunho da Formação São Paulo assentado na porção sul, referenciado por IPT (1990), como Bacia do Bonfim, a qual possui apenas cerca de 2 km². A Formação Resende ocorre, no município, sobre o embasamento, com maior expressão aflorante na porção sul. Já a Formação Tremembé apresenta uma área contínua de afloramento ao norte do rio Paraíba, entre a Formação Resende e os sedimentos quaternários. Algumas manchas de Formação Tremembé ocorrem no sul da área, principalmente na porção sudoeste do município. A Formação Pindamonhangaba, mais recente, sobrepõe-se aos sedimentos das formações Resende e Tremembé, aflorando em toda a porção centro-sul do município, e apenas ao sul do rio Paraíba. Preenchendo a planície de inundação do vale do rio Paraíba, têm-se os sedimentos recentes, que ocupam grande área do município, entretanto sua expressão em profundidade, é relativamente pequena. Segundo DAEE (1977a), sua espessura não deve ultrapassar uma dezena de metros. A Figura 6.17 ilustra o modelo conceitual adotado para a área, mostrando a distribuição destas formações em subsuperfície.

Considerando a constituição litológica de cada formação geológica na área, descrita por Mancini (1995), Riccomini (1989) e IPT (1990), foi possível identificar as diferentes unidades hidroestratigráficas existentes na área de estudo.

Primeiramente, as rochas existentes no município de Caçapava podem ser divididas em dois grandes grupos correspondentes aos aquíferos: cristalino e sedimentar.

- Aquífero Cristalino

O Aquífero Cristalino tem pequena expressão na área de estudo, pois aflora apenas nos extremos norte e sul do município, onde a declividade do terreno é acentuada e a taxa de ocupação é baixa. Apenas nestas porções, onde a profundidade do embasamento cristalino é pequena, os poços exploram conjuntamente os aquíferos Sedimentar e Cristalino, como na região de Guamirim, apresentando, portanto, baixa produtividade.

Este aquífero é composto por rochas do Embasamento Cristalino, constituído principalmente de gnaisses, migmatitos e xistos dos complexos Embu e Paraíba do Sul, aflorantes nas porções norte e sul de Caçapava. Na porção sul, inclui-se também nesta unidade aquífera, os granitos gnáissicos da Suíte Granítica do Jambeiro. Por ser de importância relativamente pequena na área de estudo e pouco explorado por poços profundos, este aquífero não foi diferenciado em outras unidades secundárias.

A circulação da água subterrânea neste aquífero faz-se principalmente por fraturas e fissuras abertas, e secundariamente, através do manto de intemperismo, que possui uma porosidade mista, entre a granular e fissural, caracterizando uma unidade com heterogeneidade acentuada.

O contorno estrutural deste aquífero é irregular e reflete a concepção tectônica da Bacia de Taubaté, que gerou altos e baixos estruturais no Embasamento Cristalino. Como reportado por Fernandes (1993), em Caçapava existe um alto estrutural, separando dois compartimentos tectônicos, o de São José dos Campos e Quiririm-Taubaté. O Embasamento Cristalino chega a aflorar na porção central do município de Caçapava, formando uma janela estrutural na unidade sedimentar, como mostra o mapa geológico (Figura 6.16) e o mapa de contorno estrutural do topo do embasamento cristalino (Figura 6.18). Na porção sul do município, próximo à área de afloramento do embasamento, o Aquífero Cristalino mergulha no sentido do vale do rio Paraíba com acentuada inclinação, chegando a cerca de 12%, como mostra a Figura 6.19. O mergulho do Embasamento Cristalino próximo à janela estrutural apresenta-se menos acentuado, em torno de 3 a 4% (Figura 6.19).

Apesar deste aquífero aflorar na porção central do município, em outras porções, como na região de Caçapava Velha, o topo do Embasamento Cristalino está bem profundo, apresentando uma maior regularidade no mergulho, como mostram as Figuras 6.20 a 6.22. A

Figura 6.18 - Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento cristalino na porção sul do município de Caçapava.

Figura 6.19 - Seção geológica A-A' e a definição das camadas do modelo matemático

Figura 6.20 - Seção geológica B-B' e a definição das camadas do modelo matemático

Figura 6.21 - Seção geológica C-C' e a definição das camadas do modelo matemático

Figura 6.22 - Seção geológica D-D' e a definição das camadas do modelo matemático

sua altitude nesta região é inferior a 350 metros (Figura 6.18), sendo que o estudo de Fernandes (1993) mostra que no compartimento tectônico de Quiririm-Taubaté, a oeste de Caçapava, a altitude do topo do Embasamento Cristalino pode ser inferior a 100 metros. O comportamento desta superfície ao norte do rio Paraíba não foi aqui definido devido à inexistência de dados de poços, entretanto, o estudo de Fernandes (1993) indica altitudes maiores, acima de 300 metros, e mais regular.

- Aquífero Sedimentar

O Aquífero Sedimentar é a principal unidade hidrogeológica da área de interesse, apresentando intensa exploração na porção ao sul do rio Paraíba. A espessura total de sedimentos apresenta-se muito variável, devido à presença do Alto Estrutural de Caçapava, onde o Embasamento Cristalino chega a aflorar. Os sedimentos na porção leste do município, entre os poços PA23, SA19 e SACV3, apresentam as maiores espessuras, estimando-se que são superiores a cerca de 300 metros, como mostram os Perfis 1 e 4 das Figuras 6.19 a 6.22. Na porção central da zona urbana, em função deste alto estrutural, os sedimentos apresentam pequenas espessuras, como no poço SA20, o qual atravessa apenas 80 metros no Aquífero Sedimentar (Figura 6.23). Na porção ao norte do rio Paraíba, não existem informações de poços para estimar a espessura de sedimento. Em São José dos Campos, a oeste de Caçapava, Hirata (1994), em seu mapa de isoespessura do Aquífero Sedimentar, mostrou que as espessuras dos sedimentos não atingem 300 metros.

O Aquífero Sedimentar caracteriza-se pela porosidade granular, apresentando-se heterogêneo devido à diferenciação litológica em profundidade e também em função da característica lenticular das camadas de material fino e grosseiro. Este aquífero apresenta continuidade lateral praticamente em toda a área, com exceção da porção central do município, na janela estrutural do Embasamento Cristalino.

Considerando-se as seções geológicas definidas e a geologia da área, distinguiu-se duas unidades hidrogeológicas neste Aquífero Sedimentar, com expressão regional: a Unidade Inferior, representada principalmente pela Formação Resende e a Unidade Superior, que, supõe-se ser predominantemente composta pela Formação Tremembé. A Formação Pindamonhangaba formaria uma terceira unidade hidrogeológica, mais recente, de menor expressão em função de sua pequena espessura, apresentando importância no processo de recarga dos aquíferos sotopostos e para a exploração por poços rasos.

A Unidade Hidrogeológica Inferior representada pela Formação Resende é o principal aquífero da área de interesse, apresentando espessura, em torno ou superior a 150 metros na porção sudoeste do município e também no sentido a São José dos Campos. A Formação Resende é composta predominantemente por lamitos fortemente arenosos, diamictitos e

Figura 6.23 - Seção geológica E-E' e a definição das camadas do modelo matemático

conglomerados, interdigitados por camadas de arenitos. Apresenta uma característica hidrogeológica favorável à circulação da água subterrânea, implicando na boa produtividade desta unidade aquífera em subsuperfície. No sentido a Taubaté, a unidade apresenta termos mais finos, os quais foram identificados nas perfilagens geofísicas, refletindo a menor produtividade dos poços, sendo portanto, aqui interpretados como uma Unidade Hidrogeológica Superior representada principalmente pela Formação Tremembé, como mostra a Figura 6.23.

A Unidade Hidrogeológica Inferior aflorante na porção sul e norte do município, está em contato direto com o Embasamento Cristalino, e constitui a unidade basal de todo o pacote sedimentar como mostra o modelo conceitual assumido para a área (Figura 6.17). Dada a relação estratigráfica entre a Formação Resende e a Formação Tremembé, como definida por Riccomini (1989) (Figura 6.4), esta unidade inferior interdigita-se com sedimentos mais finos da Formação Tremembé, por vezes, dificultando a sua diferenciação nos perfis geofísicos utilizados para a distinção em subsuperfície.

Estima-se que a base desta Unidade Inferior, que coincide com o topo do embasamento cristalino, atinja, na área de estudo, a altitude máxima de 250 metros, como mostra a Figura 6.18.

Sobrepostos a esta Unidade Inferior, identificou-se pelas perfilagens geofísicas, sedimentos mais finos, muitas vezes intercalados por sedimentos mais grosseiros, que foram interpretados como pertencentes, predominantemente, à Formação Tremembé, de constituição argilosa, com intercalações de ritmitos e arenitos grosseiros, compondo uma Unidade Hidrogeológica Superior, de menor condutividade hidráulica. Esta Unidade Superior estende-se por toda a porção média do município de Caçapava, apresentando em geral, espessuras inferiores a 80 metros. As menores espessuras são encontradas no sentido do limite oeste do município, enquanto que, seguindo para leste, para Taubaté, esta Unidade Superior espessa-se, predominando sobre os sedimentos mais grosseiros. Esta característica foi confirmada pela baixa produtividade dos poços em Caçapava Velha e em Taubaté (DAEE 1977a).

Na região de Caçapava Velha, os poços existentes mostraram um espessamento da Unidade Superior, ocorrendo inserida dentro do pacote mais arenoso, denominado neste trabalho de Unidade Inferior, como mostra a Figura 6.23.

Os sedimentos englobados na Formação Pindamonhangaba, com ocorrência apenas ao sul do vale do rio Paraíba e espessura de apenas algumas dezenas de metros, como mostra a Figura 6.23, podem ser agrupados em uma unidade hidrogeológica distinta, mais recente. Como apresentam pequena expressão em área e também pequena espessura (Figura 6.21) quando comparada às outras unidades hidrogeológicas, sua exploração restringe-se a poços rasos, em geral domésticos. Os poços profundos não exploram diretamente a água deste aquífero, pois, na maioria das vezes, o intervalo atravessado desta unidade é revestido com

tubo liso (tubo de boca) para promover a proteção sanitária da obra. A profundidade da base da Formação Pindamonhangaba foi inferida na interpretação das seções geológicas pois as medidas das perfilagens geofísicas começam, em geral, abaixo de 25 metros da superfície do terreno dada a existência do tubo de boca. Como esta formação apresenta pequenas espessuras, na maioria das vezes não pode ser detectada na perfilagem dos poços.

6.3.2. Determinação dos parâmetros hidráulicos

- a partir dos testes de vazão

No cadastramento dos poços profundos do município puderam ser resgatados os dados do teste de vazão de 29 poços. Estes testes foram executados após o término do poço, com a finalidade de dimensionar o equipamento e o regime de exploração, sendo que as medidas de rebaixamento foram efetuadas no próprio poço. Entretanto, segundo Kruseman & Ridder (1979), estes dados podem ser utilizados para uma avaliação geral das características hidráulicas do aquífero.

Os testes foram conduzidos pela própria empresa de perfuração, com tempo de bombeamento, em geral, de 24 horas, mantendo-se a vazão, na medida do possível, constante. Os testes de vazão escalonada e recuperação mostraram irregularidades nas medidas e tempo curto de monitoramento, dificultando sua utilização. Assim sendo, foram utilizados apenas, os dados dos testes de vazão, na fase de rebaixamento.

Considerando as características litológicas do aquífero, onde predominam intercalações de sedimentos finos e grosseiros, assumiu-se que o aquífero apresentaria um comportamento livre a semi-confinado. Entretanto, a configuração das curvas de tempo x rebaixamento mostraram, por vezes, uma tendência a um comportamento de aquífero livre, enquanto que em outros casos, as curvas adaptaram-se melhor à curva de Theis, para aquífero confinado. Assim, o método de Hantush, para aquífero semi-confinado, não foi utilizado na interpretação dos testes de bombeamento. Portanto, supõe-se aqui, que o aquífero tem um comportamento, em geral, livre a localmente confinado, apesar do tempo de bombeamento dos testes não ter sido suficiente para a confirmação destas características.

Para a interpretação destes testes de vazão utilizou-se um aplicativo matemático denominado AQUIFER TEST, desenvolvido por Waterloo Hydrogeologic Inc., que permite uma fácil entrada de dados e interpretação por diferentes métodos, inclusive Theis, Cooper-Jacob e Neuman, os quais foram considerados neste trabalho. Os dados necessários solicitados pelo programa são: os pares de tempo e rebaixamento, distância do ponto de observação, vazão bombeada (variável ou constante durante o tempo de duração do teste), características construtivas do poço (comprimento dos filtros, diâmetro do poço e da perfuração) e características do aquífero (espessura, nível estático). Como as medidas de rebaixamento

foram efetuadas dentro do próprio poço, adotou-se como distância do ponto de observação o valor de 0,10 m, valor próximo ao raio da maioria dos poços.

As curvas de tempo e rebaixamento mostraram que o período do teste de bombeamento foi curto para uma boa caracterização do comportamento do aquífero. Algumas curvas mostraram uma tendência de aquífero com comportamento livre, mostrando uma leve elevação dos pontos na parte final da curva, o que levou a interpretação do teste de bombeamento pelo método de Neuman (Figura 6.24). As demais curvas foram interpretadas pelos métodos de Theis e Cooper-Jacob, por serem mais adequados para esta situação (Figura 6.25).

Os valores de transmissividade obtidos pelos métodos de Theis e Cooper-Jacob mostraram-se, em geral, próximos, muitas vezes com valores semelhantes. A comparação entre as transmissividades calculadas por estes métodos mostraram que alguns valores obtidos pelo método de Cooper-Jacob são maiores que aqueles calculados pelo método de Theis. Esta diferença pode ser explicada pela influência das características construtivas e do material próximo ao poço, como mostrado por Butler (1990), onde as soluções de Theis e Cooper-Jacob fornecem resultados diferentes em sistemas heterogêneos pois cada metodologia enfatiza uma fase do teste de bombeamento.

Considerando um aquífero heterogêneo, com fluxo radial, Butler (1988) mostrou que a mudança do rebaixamento em uma porção do aquífero, a um dado tempo durante um teste de bombeamento, é controlada pelo material da área circular ao redor do poço. Esta área anelar que ele considera como responsável pela maior contribuição de fluxo, aumenta, afastando-se cada vez mais do poço a medida que o teste de bombeamento avança (Figura 6.26). Assim, a etapa inicial do teste de bombeamento reflete as características hidráulicas da porção do aquífero próxima ao poço e, sofrendo, também, influência das condições construtivas, como do material de preenchimento entre a perfuração e o revestimento, da perda de carga existente no próprio poço e da eficiência do desenvolvimento do poço.

As medidas de tempo e rebaixamento efetuadas após longo período do início do teste refletem, por sua vez, as características de maior porção do aquífero, compreendida dentro da zona de influência, sendo que, como o raio do cone de depressão está distante, sofre menor influência do material ao redor do poço. Segundo Butler (1990), aquíferos livres terão o mesmo tipo de comportamento que o aquífero confinado, entretanto, os efeitos do material próximo ao poço serão sentidos por um intervalo de tempo maior.

Este tipo de influência reflete-se nos parâmetros hidráulicos calculados pelos métodos de Theis e Cooper-Jacob. No método de Theis, o valor utilizado é o rebaixamento total, onde é considerada a influência de toda a área compreendida no cone de depressão final, principalmente do material próximo ao poço. No método de Cooper-Jacob, o valor utilizado é a diferença de rebaixamento (Δs), considerando-se principalmente a reta formada pelos dados medidos a um período de tempo mais longo do teste de bombeamento, quando o raio do cone

Método de NEUMAN

Transmissividade [m^2/s]: 5.73×10^{-5}

Coef. armazenamento 1.17×10^{-1}

Condut. hidráulica (K) [m/s]: 9.55×10^{-7}

Porosidade específica 1.17×10^2

Método de NEUMAN

Transmissividade [m^2/s]: 1.16×10^{-4}

Coef. armazenamento 5.70×10^{-1}

Condut. hidráulica (K) [m/s]: 7.36×10^{-6}

Porosidade específica 5.70×10^2

Figura 6.24 - Interpretação dos testes de bombeamento pelo método de Neuman utilizando o programa AquiferTest

(a)

Método de Theis

Transmissividade [m^2/s]: 3.06×10^{-3} Condut. hidráulica (K) [m/s]: 7.65×10^{-6}

(b)

Solução por COOPER & JACOB

Transmissividade [m^2/s]: 2.62×10^{-3} Condut. hidráulica (K) [m/s]: 6.26×10^{-6}

Figura 6.25 - Interpretação dos testes de bombeamento pelo método de Theis (a) e Cooper-Jacob (b) utilizando o programa AquiferTest

de depressão está bem afastado do poço, refletindo melhor as características do material longe do poço. Quando há uma diferença marcante do material próximo ao poço e afastado deste, há um reflexo na configuração dos dados de tempo e rebaixamento analisados pelo método de Cooper-Jacob.

Entretanto, neste estudo, os dados plotados em escala semilogarítmica apresentam boa configuração, mostrando nas porções finais, pouca variação em relação à reta (Figura 6.25b), refletindo que, apesar do aquífero se caracterizar pelas intercalações lenticulares, tem um comportamento uniforme, considerando-se o fluxo horizontal em todo o pacote sedimentar.

A variação das transmissividades encontradas por estes dois métodos (Tabela 6.2) variaram entre $3,16 \times 10^{-5}$ e $7,08 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (método de Cooper-Jacob), e entre $3,24 \times 10^{-5}$ e $3,06 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (método de Theis), mostrando concordância entre os valores calculados. As transmissividades e condutividades hidráulicas apresentam menores valores na porção sul e sudeste do município, enquanto na porção central, estes parâmetros mostram-se uma a duas ordens de grandeza maiores, indicando a melhor produtividade do aquífero nesta região.

Os valores de coeficiente de armazenamento calculados pelo método de Cooper-Jacob apresentaram grande variabilidade, com números irrealistas, longe do intervalo aceitável (0,005 a 5×10^{-5} , Freeze & Cherry 1979). O coeficiente de armazenamento calculado pelo método de

Tabela 6.2 – Parâmetros hidráulicos calculados a partir de testes de bombeamento utilizando os métodos de Theis, Cooper-Jacob e Neuman.

POÇO	Cooper & Jacob			Theis			Neuman			
	T (m ² /s)	K (m/s)	S	T (m ² /s)	K (m/s)	S	T (m ² /s)	K (m/s)	S	S _y
PA1	3,0E-03	5,6E-05	5,1E-03	2,9E-03	5,5E-05	6,6E-03	1,2E-03	2,2E-05	2,6E-01	26
PA10	1,3E-03	6,4E-05	6,1E-10	5,9E-04	2,9E-05	2,0E-03	1,7E-04	8,3E-06	5,4E-02	54
PA11	1,2E-03	3,3E-05	7,1E-02	1,2E-03	3,3E-05	4,6E-02	5,6E-04	1,6E-05	1,2E+00	11600
PA12	2,7E-03	6,8E-05	1,2E-02	2,7E-03	6,8E-05	1,2E-02				
PA13	8,4E-04	5,3E-05	5,1E-06	5,7E-04	3,5E-05	2,0E-03	2,0E-04	1,3E-05	4,4E-02	44
PA15	3,0E-03	6,2E-05	1,8E-04	2,3E-03	4,8E-05	7,9E-03	1,0E-03	2,1E-05	2,5E-01	25
PA17	2,9E-03	5,3E-05	3,5E-02	2,8E-03	5,4E-05	3,3E-02				
PA2	9,2E-04	4,6E-05	1,8E-03	9,8E-04	4,9E-05	8,5E-04				
PA25	3,4E-03	1,2E-04	3,1E-14	1,1E-03	3,8E-05	3,8E-03	4,9E-04	1,7E-05	3,8E-02	38
PA7	1,6E-03	4,6E-05	2,5E-05	1,1E-03	3,3E-05	3,8E-03	5,0E-04	1,5E-05	1,2E-01	12
SA14	2,6E-03	5,4E-05	6,6E-04	2,2E-03	4,5E-05	7,5E-03				
SA17	4,1E-03	4,8E-05	1,5E-06	2,0E-03	2,4E-05	8,8E-03	9,2E-04	1,1E-05	5,0E+01	5010
SA18	1,3E-03	2,9E-05	5,5E-05	7,8E-04	1,8E-05	1,0E-01	2,8E-04	6,4E-06	3,6E+00	3590
SA19	1,3E-03	3,0E-05	4,9E+00	1,3E-03	3,1E-05	4,6E+00	8,1E-04	1,9E-05	2,9E+00	292
SA20	5,6E-04	1,2E-05	3,1E-03	5,0E-04	1,1E-05	1,0E-02	1,1E-04	2,5E-06	8,1E-01	812
SA21	1,0E-03	6,5E-05	2,2E-02	7,4E-04	4,6E-05	2,5E-03	1,2E-04	7,4E-06	5,7E-01	570
SA21A	2,7E-03	7,1E-05	1,1E-02	2,7E-03	7,1E-05	1,1E-02	1,1E-03	2,8E-05	3,8E-01	38
SA22	2,5E-03	5,4E-05	3,9E-07	1,4E-03	3,1E-05	5,0E-03	6,2E-04	1,3E-05	1,4E-01	138
SA23	1,2E-03	2,6E-05	1,3E-01	1,3E-03	2,7E-05	7,7E-02				
SA24	2,8E-03	5,4E-05	6,1E-03	1,8E-03	3,5E-05	4,7E-03	8,1E-04	1,6E-05	1,5E-01	15
SA25	1,6E-03	3,5E-05	6,1E-04	1,4E-03	3,0E-05	3,6E-03				
SA26	4,5E-04	7,5E-06	3,5E-09	2,3E-04	3,8E-06	5,9E-04	5,7E-05	9,5E-07	1,2E-01	117
SA27	7,1E-03	1,6E-04	6,5E-10	3,1E-03	7,0E-05	7,9E-03	1,4E-03	3,1E-05	6,3E-02	63
SACV3	3,3E-04	6,5E-06	1,2E-01	3,4E-04	6,8E-06	9,0E-02	2,3E-04	4,5E-06	3,8E-03	4
SAGU2	3,5E-05	2,5E-06	6,5E-02	4,4E-05	3,2E-06	2,6E-02	5,6E-06	4,0E-07	5,1E-02	5
SAGU5	3,2E-05	7,4E-07	3,5E-03	3,2E-05	7,6E-07	2,8E-03	1,0E-05	2,4E-07	4,5E-02	5
SAGU6	7,7E-05	4,7E-06	8,7E-03	7,7E-05	4,7E-06	8,5E-03				
SAGU6	8,2E-05	5,0E-06	2,6E-02	8,3E-05	5,0E-06	2,5E-02				
SAGU7	1,7E-04	3,2E-06	3,0E-02	1,6E-04	3,2E-06	3,5E-02				
SAVM1*	6,7E-04	1,3E-05	1,1E-05	4,7E-04	8,9E-06	1,6E-03	3,6E-04	6,9E-06	8,3E-03	

SAVM1* = pelo método de Hantush

Theis mostrou menor variação, com valores, em geral, entre 6×10^{-4} e 0,01, entretanto, também com valores anômalos como no poço SA19. Estes erros decorrem da inexistência de um poço de observação (Xiang 1996), sendo necessário utilizar como r (distância ao ponto de observação), o próprio raio do poço de bombeamento.

Os métodos de Theis e Cooper-Jacob não atentam para a resposta de drenagem atrasada, onde a água é liberada do aquífero pelo efeito da gravidade, com a existência da componente vertical de fluxo. Este comportamento faz com que a curva de dados de tempo x rebaixamento tenha um formato mais achatado na porção intermediária da curva, após decorrido um certo tempo do início do bombeamento, quando o efeito da compressão do aquífero e a expansão da água não tenham mais influência na liberação da água para o poço. Em seguida, os valores de tempo x rebaixamento voltam a seguir o formato da curva de Theis, e a componente de fluxo volta a ser horizontal, como no primeiro segmento da curva de dados.

O intervalo de tempo desta porção achatada da curva de dados é diretamente proporcional à distância de observação (r) e inversamente proporcional à espessura do aquífero (b) (Xiang 1996). Dessa forma, para os testes considerados, este valor é pequeno (inferior a 0,005), o que indica que a porção achatada da curva será longa, o que explica a razão dos dados dos testes não mostrarem o último segmento da curva, que indica um comportamento de aquífero livre (Figura 6.24).

Entre os testes de bombeamento cadastrados, 20 deles puderam ser interpretados pelo método de Neuman, os quais mostraram valores menores de transmissividade e condutividade hidráulica (Tabela 6.2) que aqueles obtidos pelos outros métodos. Os parâmetros calculados a partir dos métodos de Theis e Cooper-Jacob são superestimados em relação ao método de Neuman pois não consideram o efeito da drenagem do aquífero. Esta mesma diferença foi obtida por Xiang (1996), o qual concluiu que o método de Neuman representa melhor as características do aquífero, mesmo que as curvas de tempo x rebaixamento não tenham o formato em 'S', devido ao curto tempo do teste.

Os valores de transmissividade obtidos pelo método de Neuman variaram entre $5,59 \times 10^{-6}$ e $1,36 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, enquanto a condutividade hidráulica variou no intervalo de $2,41 \times 10^{-7}$ a $3,1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, mostrando-se, em média, 3 a 4 vezes inferiores aos valores obtidos pelos outros métodos. Entretanto, a disposição espacial destes parâmetros mostrou-se semelhante, com os valores mais baixos ocorrendo nas porções sul e sudeste do município.

Os valores dos parâmetros hidráulicos obtidos pela interpretação dos testes de bombeamento são mostrados na Tabela 6.2. Para a estimativa do coeficiente de armazenamento é necessária a medida do rebaixamento em poços de observação, dessa forma, os dados dos testes monitorados no próprio poço induzem em grandes erros nos valores calculados de coeficiente de armazenamento (Xiang 1996).

Segundo Freeze & Cherry (1979), o coeficiente de armazenamento (S) varia entre 5×10^{-5} a 5×10^{-3} . Pelos testes de bombeamento, os valores do coeficiente de armazenamento são discrepantes, entretanto, para o método de Theis, cujos valores foram menos irregulares, a mediana obtida foi de $7,9 \times 10^{-3}$, mostrando um valor acima do esperado.

Para a modelação matemática tridimensional, o parâmetro utilizado é o coeficiente de armazenamento específico (S_s), que é o coeficiente de armazenamento (S) dividido pela espessura do aquífero. A Tabela 6.3 ilustra o intervalo de valores para as diversas litologias. No modelo matemático deste estudo, adotou-se um coeficiente de armazenamento específico de 0,001 para todas as camadas aquíferas simuladas, com base no intervalo de valores indicado por Domenico (1972, *apud* Anderson & Woessner 1992).

Tabela 6.3 - Intervalo de valores de coeficiente de armazenamento específico (S_s) (Domenico 1972 *apud* Anderson & Woessner 1992).

Material	Coeficiente de armazenamento específico (S_s) (m^{-1})
Argila plástica	$2,0 \times 10^{-2}$ a $2,6 \times 10^{-3}$
Argila dura	$2,6 \times 10^{-3}$ a $1,3 \times 10^{-3}$
Argila medianamente dura	$1,3 \times 10^{-3}$ a $9,2 \times 10^{-4}$
Areia inconsolidada	$1,0 \times 10^{-3}$ a $4,9 \times 10^{-4}$
Areia consolidada	$2,0 \times 10^{-4}$ a $1,3 \times 10^{-4}$
Cascalho arenoso consolidado	$1,0 \times 10^{-4}$ a $4,9 \times 10^{-5}$
Rocha fissurada	$6,9 \times 10^{-5}$ a $3,3 \times 10^{-6}$
Rocha compacta	Menor que $3,3 \times 10^{-6}$

O intervalo comum da porosidade específica (S_y) para aquíferos sedimentares situa-se entre 0,01 e 0,3 (Driscoll 1989), e a porosidade total (n) varia entre 10% e 60% (Fetter 1988). Morris & Johnson (1967) reuniram os resultados de diversas análises e obtiveram valores para cada tipo de rocha, como mostra a Tabela 6.4. Para a área estudada, caracterizada pelas intercalações lenticulares de sedimento fino e grosso, adotou-se o valor de 40% para a porosidade total e 25% como porosidade efetiva (S_y) para todas as camadas aquíferas simuladas no modelo matemático. Para o parâmetro de porosidade efetiva para fluxo (n_{ef}), isto é, a porosidade do aquífero que está efetivamente disponível para o fluxo da água subterrânea, foi adotado com um valor de 25%.

Tabela 6.4 – Valores de porosidade total e porosidade específica para rochas sedimentares (Morris & Johnson 1967)

Material	Porosidade total (%)		Nº análises	Porosidade específica (%)		Nº análises
	Intervalo	Média		Intervalo	Média	
Argila	34,2 – 56,9	42	74	1,1 – 17,6	6	27
Silte	33,9 – 61,1	46	281	1,1 – 38,6	20	266
Areia fina	26,0 – 53,3	43	243	1,0 – 45,9	33	287
Areia média	28,5 – 48,9	39	127	16,2 – 46,2	32	297
Areia grossa	30,9 – 46,4	39	26	18,4 – 42,9	30	143
Cascalho fino (*)	25,1 – 38,5	34	38	12,6 – 39,9	28	33
Cascalho médio (*)	23,7 – 44,1	32	22	16,9 – 43,5	24	13
Cascalho grosso (*)	23,8 – 36,5	28	15	13,2 – 25,2	21	9
Argilito	41,2 – 45,2	43	4			
Siltito	21,2 – 41	35	7	0,9 – 32,7	12	13
Arenito fino	13,7 – 49,3	33	55	2,1 – 39,6	21	47
Arenito médio	29,7 – 43,6	37	10	11,9 – 41,1	27	10

(*) valor de porosidade total obtido para amostra deformada

- a partir da capacidade específica

Com base na equação de Theis, para fluxo em estado não estacionário, pode-se notar a relação entre a capacidade específica e a transmissividade, a qual pode ser útil nas investigações hidrogeológicas onde apenas um dos valores seja conhecido.

$$T = \frac{1}{4\pi} \frac{Q}{S} W(u)$$

Segundo Theis et al. (1963), a capacidade específica não pode ser considerada o critério único para a determinação da transmissividade, pois Q/s depende de outros fatores como o diâmetro e profundidade do poço, comprimento dos filtros e a eficiência do desenvolvimento do poço. Entretanto, estes autores afirmam a viabilidade de estimativa da transmissividade a partir da capacidade específica, ou vice-versa.

Theis et al. (1963) calcularam a relação da capacidade específica com a transmissividade a partir da simplificação da equação original de Theis, para estado transiente de fluxo, como mostrado a seguir.

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{Q}{4\pi s} (-0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt})$$

Mas esta relação pode, também, ser calculada pela equação utilizada no método de Cooper-Jacob (Driscoll, 1986).

$$T = \frac{2,3 Q}{4\pi s} \log \frac{2,25 Tt}{r^2 S}$$

Por estas equações observa-se que a transmissividade é diretamente proporcional à capacidade específica, onde grandes mudanças em Q/s implicam em grandes variações de T .

A transmissividade é, também, diretamente proporcional ao $\log t$, $\log 1/r^2$ e $\log 1/S$, entretanto, como estão em termo logarítmico, sua influência como multiplicador é pouco significativa. Assim, assumindo-se valores estimados de raio de observação (r), coeficiente de armazenamento (S), transmissividade (T) e tempo (t), pode-se calcular a relação entre a transmissividade e a capacidade específica.

Driscoll (1986) calculou esta relação como $T = 2000Q/s$ para aquíferos confinados e $T = 1500Q/s$ para aquíferos livres, considerando unidades americanas de medida e adotando um raio de 0,5 ft, durante o tempo de 1 dia, $T = 30.000 \text{ gpd/ft}$, $S = 1 \times 10^{-3}$ e $S_y = 7,5 \times 10^{-2}$.

Considerando unidades métricas e assumindo-se um tempo de 1 dia, para um raio de observação de 0,1 m, $T = 200 \text{ m}^2/\text{d}$ e $S = 1 \times 10^{-3}$, a relação obtida para a reta teórica é $T = 1,4Q/s$. Se considerar um aquífero livre, com $S_y = 0,075$, esta relação da reta teórica fica $T = 1,06Q/s$.

Apesar do uso freqüente desta relação definida com base nas equações de Theis e Cooper-Jacob, Razack & Huntley (1991) mostraram que a capacidade específica e a transmissividade apresentam uma melhor correlação através de uma análise empírica.

A capacidade específica e os valores de transmissividade calculados através dos testes de bombeamento mostraram uma boa correlação, superior a 89%, sendo que, considerando os valores de T obtidos na interpretação pelo método de Theis, esta correlação foi superior, de 93% (Tabela 6.5).

Concordando com os resultados do estudo de Razack & Huntley (1991), a correlação do logaritmo destes parâmetros mostrou-se melhor que a correlação linear, com um coeficiente superior a 94% (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 - Coeficiente de correlação entre a capacidade específica dos poços e a transmissividade calculada pela interpretação dos testes de bombeamento.

Método de determinação da transmissividade através do teste de bombeamento	Coeficiente de correlação entre $Q/s \times T$ (%)	Coeficiente de correlação entre $\log Q/s \times \log T$ (%)
Theis	93	98
Cooper-Jacob	89	96
Neuman	89	94

A comparação das retas teóricas com os dados de transmissividade obtidos nos testes de bombeamento, ilustrada na Figura 6.27 mostrou que os pontos, principalmente calculados pelo método de Theis, aproximam-se melhor da reta teórica calculada para aquífero livre ($T = 1,06Q/s$). Neste gráfico estão plotadas as transmissividades obtidas pelos testes de bombeamento, interpretados pelos métodos de Theis, Cooper-Jacob e Neuman e as retas

Q/s = capacidade específica

Transmissividade (T) calculada pelos métodos de Theis, Cooper-Jacob e Neuman

Retas teóricas para aquíferos livre ($T=1,06 Q/s$) e confinado ($T=1,4Q/s$)

Figura 6.27 - Relação dos dados de capacidade específica e transmissividade com as retas teóricas para aquíferos livre e confinado

teóricas. Os valores calculados pelo método de Neuman são cerca de três vezes menor que aqueles calculados pelos demais métodos devido ao efeito da drenagem por gravidade e estes dados estão abaixo da reta teórica calculada para aquíferos livres. Este fato mostra que a correlação empírica dos dados de Q/s e transmissividade, proposta por Razack & Huntley (1991), é a melhor forma de estimar os valores de T para os poços que não possuem a planilha do teste de bombeamento. Observa-se, ainda, que os dados em escala bilogarítmica apresentam uma melhor correlação.

Dada as características litológicas e o comportamento da maioria das curvas de tempo x rebaixamento dos testes de bombeamento, o aquífero foi considerado predominantemente livre, eventualmente confinado. Dessa forma, escolheu-se os valores de transmissividade calculados pelo método de Neuman, somando as informações de um total de 20 testes de bombeamento, para determinar a correlação com os valores de capacidade específica. A equação de correlação obtida entre estes dados foi $T = 0,8685 Q/s^{1,1123}$, mostrando um coeficiente de correlação de 94,4% (Figura 6.28). Hughson et al. (1996) mostraram que, para menos de 30 pares de dados de Q/s x T , a regressão loglinear é a metodologia mais apropriada para estimativas de transmissividade em locais sem informação, permitindo, em seguida, uma melhor interpolação espacial para a definição das linhas de isotransmissividade.

Calculando-se as transmissividades dos demais poços por esta relação empírica, os valores variam entre $1,42 \times 10^{-6}$ a $2,75 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e a condutividade hidráulica ficou entre $2,98 \times 10^{-8}$ a $1,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, sendo que os menores valores, inferiores a $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, são encontrados na porção sul e sudeste do município. Valores de condutividade hidráulica superiores a $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ predominam na porção centro-sul e sudoeste do município, indicando uma melhor produtividade do aquífero, refletindo-se na existência de poços de maior produtividade.

A Figura 6.29 ilustra esta distribuição da condutividade hidráulica. Cabe ressaltar que estas condutividades hidráulicas referem-se predominantemente à Unidade Hidrogeológica Inferior, representada pela Formação Resende, uma vez que a maior parte dos poços possui filtro atravessando esta unidade. Alguns poços, como no bairro de Guamirim, exploram conjuntamente o aquífero cristalino, onde o valor de condutividade hidráulica reflete estas duas unidades.

6.3.3. Uso da água subterrânea

O município de Caçapava é praticamente 100% abastecido por água subterrânea. Existe apenas uma pequena captação de água superficial na Serra do Palmital, explorando cerca de $8 \text{ m}^3/\text{h}$, o que perfaz apenas 1% do volume de água subterrânea total destinado ao abastecimento público.

O maior volume explorado de água subterrânea (83,43%) destina-se ao abastecimento público, que é gerenciado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que gentilmente colaborou neste projeto, fornecendo as informações disponíveis sobre os poços.

Dos poços existentes e cadastrados neste estudo, 43% encontram-se desativados, abandonados ou soterrados (Tabela 6.6). Os poços novos, pertencentes à SABESP, foram considerados 'desativados', isto é, como se não estivessem em funcionamento para este estudo, pois toda a modelação matemática realizada foi baseada nos dados de monitoramento de nível d'água anterior à construção destes poços.

Os maiores usuários da água subterrânea no município são as indústrias e a SABESP, que, juntas, detem 75% dos poços existentes (Tabela 6.6).

Dos 60 poços ativos estimou-se um volume total explorado de água subterrânea de aproximadamente $22.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Este valor foi baseado no valor médio dos volumes medidos ou monitorados dos poços da SABESP e de grandes consumidores, como algumas indústrias e clubes. Alguns dados foram obtidos no cadastro de indústrias existente na Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Para os usuários restantes, estimou-se o volume explorado com base no número de pessoas servidas e no tipo de atividade

desenvolvida. Do total de água explorado no município, a SABESP faz uso de 18.500 m³/d, o que perfaz cerca de 83% deste total explorado do aquífero. O segundo maior consumidor de água é o setor industrial, que utiliza cerca de 15% do volume bombeado pelos poços existentes no município (Tabela 6.7).

Tabela 6.6 - Perfil dos usuários da água subterrânea e a situação dos poços

PROPRIETÁRIO	ATIVO	DESATIVADO	SEM INF.	TOTAL
SABESP	18	22 (*)		40
Prefeitura	6			6
Indústrias	24	11		35
Comércio	5			5
Clubes	3	1		4
Particular	3	3	2	8
TOTAL	60	36	2	98

(*) os novos poços SA26, SA27 e SAGU7 foram considerados como desativados pois toda a modelação foi calibrada com dados de monitoramento de nível d'água anterior a construção destes poços

Tabela 6.7- Volume explorado pelos poços ativos em maio/1996 de acordo com a classe de proprietários.

PROPRIETÁRIO	VAZÃO (m ³ /d)	% VOLUME TOTAL	Nº DE POÇOS
SABESP (1)	18.459,42	83,43	18
Prefeitura (2)	105,00	0,47	7
Indústrias (1) (3)	3.431,13	15,51	24
Comércio (1) (4)	23,30	0,11	5
Clubes (1)	22,88	0,10	3
Particular (4)	83,54	0,38	3
TOTAL	22.125,27	100,00	60

(1) dados médios de monitoramento ou medição SABESP

(2) considerando um gasto de 15 m³/d por escola

(3) dados obtidos no cadastro de indústrias da CETESB

(4) estimado pelo número de pessoas residentes/usuários ou porte e tipo de atividade

Os poços que exploram as maiores vazões, superiores a 1000 m³/d, pertencem à SABESP e concentram-se na porção central da cidade, como mostra a Figura 6.30.

No município existem três bairros afastados, também abastecidos por poços administrados pela SABESP, entretanto, com baixas vazões de exploração, como mostra a Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Volume de exploração dos poços da SABESP por região.

REGIÃO	VOLUME EXPLORADO (m ³ /d)	% DO VOLUME TOTAL	Nº DE POÇOS
Central	17.830,38	96,6	12
Caçapava Velha	407,79	2,2	3
Guamirim	221,25	1,2	3

6.3.4. Fluxo da água subterrânea

O fluxo da água subterrânea no município de Caçapava tem se modificado ao longo do tempo devido ao bombeamento dos poços, que extraem grandes vazões para o abastecimento público. Estes poços, concentrados na parte sul da zona urbana provocam um grande cone de rebaixamento observado pelo nível estático dos poços perfurados recentemente. Isto não significa que está ocorrendo o esgotamento do aquífero, mas apenas um rearranjo do comportamento da superfície potenciométrica. Para uma melhor definição deste comportamento seria necessário observar o nível d'água no aquífero através da construção e do monitoramento de poços de observação, que também poderiam monitorar a qualidade da água subterrânea.

Esta mudança do fluxo subterrâneo foi observado através dos mapas potenciométricos confeccionados para diferentes períodos. O mapa potenciométrico construído com o nível estático dos poços antigos (Figura 6.31), perfurados entre 1950 e 1970, mostra que a principal área de descarga é o rio Paraíba, e as drenagens secundárias atuam como área de descarga local, concordando com o mapa potenciométrico do município vizinho de São José dos Campos, elaborado por Hirata (1994). O mapa de 1950-1970 apresenta poucos poços, concentrados na porção central do município, que mostram elevações do nível d'água da ordem de 540 a 570 metros.

O mapa potenciométrico elaborado para o período de 1970 a 1984 (Figura 6.31) mostra alguns pontos com um rebaixamento do nível d'água provavelmente como reflexo de poços já instalados. A curva equipotencial de 540 metros encontra-se mais afastada do rio Paraíba, em relação ao mapa potenciométrico de 1950-1970 mostrando a alteração do lençol freático. Mesmo assim, o rio Paraíba e as drenagens secundárias ainda atuam como área de descarga regional e local, respectivamente. Devido a pequena quantidade de poços e a inexistência de poços de observação, aumenta a probabilidade de interferência da fase de construção e

MAPA POTENCIOMÉTRICO (PERÍODO 1950 - 1970)

LEGENDA

	área urbana	nº do poço		elevação do nível estático (m)
	estrada			
	drenagem			
			540	curva equipotencial (m)

MAPA POTENCIOMÉTRICO (PERÍODO 1970 - 1984)

Escala

Figura 6.31 - Mapa potenciométrico da porção central do município de Caçapava do período de 1950 a 1970 e de 1970 a 1984.

completação do poço na medição do nível d'água. Isto é, não há garantias que o nível estático informado na ficha construtiva foi medido após a estabilização total do lençol freático depois da limpeza do poço.

O mapa potenciométrico elaborado para o período de 1987-1997 (Figura 6.32), considerando o nível estático dos poços recentes, mostra uma superfície potenciométrica formando um grande cone de rebaixamento na porção central do município, reflexo do bombeamento constante dos poços. Como muitos poços funcionam quase 24 horas/dia, não há tempo para a recuperação do aquífero, formando esta depressão na superfície potenciométrica. Nos bairros Vila Mariana, na porção centro-oeste, e Guamirim, no sudoeste, também observa-se um cone de rebaixamento causado pelos poços em funcionamento, entretanto, de menor magnitude. Em Vila Mariana, a elevação chega a 520 metros, enquanto em Guamirim a elevação mínima atinge cerca de 530 metros. De forma geral, as drenagens secundárias e o rio Paraíba ainda atuam como áreas de descarga, entretanto, próximo a estes cones de rebaixamento, o fluxo da água subterrânea é alterado, convergindo para os poços.

A contribuição do rio Paraíba para o aquífero não foi determinada em campo, mas, segundo Souza (informação verbal), a qualidade da água dos poços de abastecimento público, monitorada constantemente, não mostra contaminação advinda deste corpo d'água.

A elevação do nível d'água na porção central do município chega a ser inferior a 500 metros próximo dos poços SA-23 e SA24, localizados ao sul da rodovia Presidente Dutra. Nota-se que a curva equipotencial 540 metros encontra-se bem recuada em relação ao rio Paraíba comparativamente ao mapa potenciométrico de 1950-1970, que não considera a interferência dos poços. Na porção sul e sudeste do município, devido ao pequeno número de poços, a superfície potenciométrica não sofreu grandes alterações, acompanhando ainda, a superfície do terreno.

6.3.5. Monitoramento dos poços da SABESP

Os poços de abastecimento da SABESP tiveram um monitoramento constante durante o período de junho/94 a maio/96, onde foram observados os valores de vazão, tempo de funcionamento e nível da água.

Em função da demanda de água, os poços que abastecem a zona urbana central funcionavam, em geral, mais de 20 horas por dia, com exceção dos bairros afastados de Guamirim e Caçapava Velha, onde o tempo médio de funcionamento dos poços era menor (Figura 6.33). Durante a medição, os poços estavam em funcionamento, sendo que o nível da água medido corresponde ao nível dinâmico, uma vez que, os poços paravam de funcionar à noite, quando o consumo diminuía. Devido a inconstância de horário para as medidas nos poços, nota-se uma grande variação nas medidas de nível d'água (Figura 6.34) e pouca

Figura 6.33 - Tempo de funcionamento dos poços de abastecimento da SABESP (h/dia)

Figura 6.34 - Variação do nível da água dos poços de abastecimento da SABESP

correlação com o valor de vazão medido (Figura 6.35), ressaltando a necessidade de poços de observação para a avaliação do rebaixamento da superfície potenciométrica.

De forma geral, os poços de grande vazão que abastecem a porção central apresentam rebaixamentos superiores a 60 metros de profundidade (Figura 6.34), causando o grande cone de rebaixamento visualizado no mapa potenciométrico de 1987-1997.

Para fins de calibração do modelo matemático e definição das zonas de contribuição dos poços foi necessário adotar um valor de vazão e nível dinâmico com base nestes dados de monitoramento. Assim, adotou-se os valores medidos em maio/1996 pois, observando-se os dados, nota-se uma uniformidade no período de março a maio de 1996 para as vazões e níveis de água medidos (Figuras 6.34 e 6.35).

6.3.6. Balanço hídrico

No município de Caçapava foram cadastrados cinco postos pluviométricos distribuídos da seguinte forma: dois deles encontram-se na bacia do córrego Divisa (postos E2-001 e E2-002); um posto na bacia do córrego Caçapava Velha (posto E2-048) e dois deles na bacia do rio Paraíba (postos E2-034 e E2-113), como mostra a Figura 6.15. Os dados existentes destes postos abrangem o período de 1974 a 1996, durante o qual as precipitações anuais variaram entre 1000 e 2500 mm/ano, sendo que os valores mais frequentes estão entre 1000 e 1500 mm/ano. O ano mais chuvoso neste período observado foi 1983, quando a precipitação alcançou 2500 mm.

A variação da precipitação ao longo do ano mostra que o período mais seco abrange os meses de junho, julho e agosto, enquanto o período mais úmido se estende de dezembro a março.

Os postos fluviométricos cadastrados no município localizam-se no córrego Divisa, Caçapava Velha e no rio Paraíba, como mostra a Figura 6.15. O período com informações do monitoramento da vazão dos rios não é homogêneo, sendo que no córrego Caçapava Velha, os dados do posto 2E-016 datam de 1958 a 1995, com uma lacuna sem informação durante o período de 1979 a 1982. O posto do córrego Divisa (posto 2E-021) apresenta um curto período de informações, apenas entre 1970 e 1975. O posto fluviométrico do rio Paraíba (posto 23-45-1-PFR) iniciou as operações em 1923, encerrando-se as medições em 1968, entretanto, a avaliação do hidrograma não permitiu um resultado coerente pois o rio Paraíba, ao longo dos anos, sofreu diversas interferências humanas.

O escoamento total médio dos córregos Caçapava Velha e Divisa, considerando os anos com dados completos, é, respectivamente, 0,29 e 0,68 m³/s.

Figura 6.35 - Variação da vazão dos poços de abastecimento da SABESP

Apesar da irregularidade no período de observação dos dados de vazão, observa-se que os meses com maior escoamento total são janeiro, fevereiro e março, enquanto os menores valores são observados, em geral, nos meses de julho, agosto e setembro.

A avaliação do escoamento básico, e também da taxa de recarga do aquífero, foi realizada apenas para as bacias dos córregos Caçapava Velha e Divisa, cujas áreas são 30 e 62 km² respectivamente, dada a existência de dados fluviométricos. O posto existente no rio Paraíba não foi analisado pois a bacia hidrográfica possui uma grande extensão, da ordem de 8.630 km² a montante do ponto de observação, estando, as medidas realizadas, sujeitas a maiores interferências humanas como a captação para abastecimento público de outras cidades.

Para a determinação do escoamento básico foram utilizadas as metodologias citadas anteriormente, utilizando-se métodos gráficos de simples aplicação.

O primeiro método gráfico utilizado foi através da união dos pontos do início da ascensão e o final da recessão, considerando cada ciclo hidrológico anual definido pelas vazões mensais dos córregos, como mostra a Figura 6.36a. Os valores de escoamento básico obtidos mostraram uma média de 7.134 m³/d (0,08 m³/s) para o córrego Caçapava Velha e de 24.091 m³/d (0,28 m³/s) para o córrego Divisa. Para este método, o sistema hidrológico foi considerado em situação de equilíbrio, onde o volume infiltrado no aquífero, proveniente da precipitação, é o mesmo que aquele escoado para as drenagens, o que permitiu o cálculo da taxa de recarga de 87 mm/ano para a bacia do córrego Caçapava Velha e de 142 mm/ano para a bacia do córrego da Divisa.

Os dados fluviométricos do córrego Caçapava Velha abrangeram um período de 1958 a 1995, sendo que o valor médio obtido apresenta uma boa representatividade do escoamento básico e da taxa de recarga desta bacia.

Em relação ao córrego da Divisa, seus dados abrangem um período restrito, de 1970 a 1975, aumentando a possibilidade de disparidade entre o valor médio obtido e a situação real. Para esta bacia hidrográfica, foram avaliados também, os dados diários de vazão do córrego Divisa, tanto pelo método gráfico como pelo método das equações de Meyboom (1961). Pelo método gráfico explicado anteriormente, o valor médio de escoamento básico obtido foi de 18.748 m³/d (0,22 m³/s) e taxa de recarga de 110 mm/ano, inferior aquele obtido considerando as vazões mensais do córrego.

Com a aplicação do outro método, utilizando as equações de Meyboom (1961) (Figura 6.36b), obteve-se valores médios de escoamento básico e taxa de recarga para a bacia do córrego Caçapava Velha, de, respectivamente, 7.193 m³/d (0,08 m³/s) e 86 mm/ano, mostrando grande concordância com os valores obtidos pelo outro método gráfico.

Para a bacia do córrego Divisa, avaliando-se as vazões mensais, obteve-se os valores de 17.147 m³/d (0,20 m³/s) de escoamento básico e 96 mm/ano de taxa de recarga. Considerando

(a) Método gráfico - união dos pontos de início da ascensão e final da recessão

(b) Método gráfico utilizando as equações de Meyboom

Figura 6.36 - Método gráfico para determinação do escoamento básico (a) pela união dos pontos de início da ascensão e final da recessão e (b) através da utilização das equações de Meyboom

os deflúvios totais diários do córrego Divisa, os valores médios obtidos de escoamento básico e recarga foram, respectivamente, 16.174 m³/d (0,19 m³/s) e 94 mm/ano. Estes valores são mais coerentes com aquele obtido pelo método gráfico, considerando os deflúvios totais diários do córrego.

A Tabela 6.9 resume os valores obtidos pelos diferentes métodos para as bacias hidrográficas consideradas.

Tabela 6.9 – Valores médios de escoamento básico e taxa de recarga obtidos por métodos gráficos clássicos.

ESCOAMENTO BÁSICO (m ³ /d)				
Considerando	Método gráfico		Método da equação de Meyboom (1961)	
	Deflúvio mensal	Deflúvio diário	Deflúvio mensal	Deflúvio diário
Córrego Caçapava Velha (*)	7.134		7.193	
Córrego Divisa(**)	24.091	18.748	17.147	16.174

TAXA DE RECARGA (mm/ano)				
Considerando	Método gráfico		Método da equação de Meyboom (1961)	
	Deflúvio mensal	Deflúvio diário	Deflúvio mensal	Deflúvio diário
Córrego Caçapava Velha (*)	87		86	
Córrego Divisa(**)	142	110	96	94

* média dos dados do período de 1958 a 1995

** média dos dados do período de 1970 a 1975

Para fins de calibração do modelo matemático, o escoamento básico adotado para estas duas bacias foi aquele calculado com base na equação de Meyboom (1961), utilizando-se os deflúvios totais mensais dos córregos Caçapava Velha e Divisa.

O deflúvio total (D), definido por Ramos (1989), é a soma dos escoamentos superficial e subterrâneo. Assim, para o córrego Caçapava Velha, o escoamento subterrâneo ou básico perfaz cerca de 29% do escoamento ou deflúvio total da bacia. Para o córrego Divisa, esta proporção é semelhante, aproximando-se de 29% do escoamento total (Tabela 6.10).

Tabela 6.10 - Relação do deflúvio total e do escoamento básico dos córregos Caçapava Velha e Divisa.

Córrego	Deflúvio total (Qt)		Deflúvio subterrâneo (Qg)		Qg/Qt (%)
	(m ³ /s)	(m ³ /d)	(m ³ /s)	(m ³ /d)	
Caçapava Velha (*)	0,29	25.056	0,08	7.193	29
Divisa (**)	0,68	58.752	0,20	17.147	29

* média dos dados do período de 1958 a 1995

** média dos dados do período de 1970 a 1975

Segundo Ramos (1989), o balanço hídrico pode ser simplificado na fórmula:

$$P = D + EVT + \Delta V$$

Sendo que a precipitação (P) é a soma do deflúvio total (D), da evapotranspiração (EVT) e da variação do armazenamento total no sistema (ΔV).

Considerando-se o sistema em equilíbrio, pode-se desprezar a variação do armazenamento total, obtendo-se para o balanço hídrico da bacia do córrego Caçapava Velha, um valor médio de evapotranspiração de 1152 mm, para uma precipitação média de 1457 mm e um deflúvio total de 305 mm. Estes valores foram obtidos avaliando-se o período de 1974 a 1988, dada a existência tanto de dados pluviométricos como fluviométricos. Dessa forma, o deflúvio total perfaz cerca de 21% do volume precipitado na bacia (Tabela 6.11).

Tabela 6.11 - Balanço hídrico da bacia do córrego Caçapava Velha

Bacia hidrográfica	Período avaliado	Precipitação (mm)	Deflúvio total (m ³ /s)	Deflúvio total (mm)	Evapotranspiração (mm)
Caçapava Velha	1974-1988	1457	0,29	305	1152

DAEE (1977a), estudando o balanço hídrico para a porção paulista da bacia do rio Paraíba, obteve uma proporção maior, de 34%, entre o escoamento total ou deflúvio total e a precipitação, avaliando conjuntamente as sub-bacias dos córregos Barranco Alto, Caçapava Velha, Piracanguá e José Raimundo, durante o período de 1952 a 1975.

Para o córrego Divisa, o período com dados de precipitação e deflúvio total não eram coincidentes, não podendo ser avaliado o balanço hídrico desta bacia.

As taxas de recarga obtidas por estes métodos permitiram direcionar os valores adotados durante a calibração do modelo matemático, considerando um cenário sem interferência humana. Entretanto, na porção central do município de Caçapava, a taxa de recarga é afetada

pela ocupação urbana, que causa a impermeabilização do solo, mas em contrapartida, apresenta extensa rede de distribuição de água e coleta de esgoto, cujas perdas contribuem para a recarga do aquífero.

Com base no levantamento realizado por SABESP (1995), calculou-se, então, a taxa de recarga na área ocupada pela zona urbana. Neste levantamento, a cidade é dividida em zonas homogêneas por densidade de ocupação, que permitiu o cálculo do tamanho da zona urbana, totalizando 7.350.000 m², descontando-se as áreas em expansão ainda não densamente ocupadas.

O índice de perda da rede de distribuição de água foi calculado com base nos volumes produzidos e faturados pela SABESP durante o período de junho de 1992 a maio de 1993 (SABESP 1995). O valor médio do índice de perda obtido foi de 21,25%, como mostra a Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Índices de perda calculados com base nos dados de SABESP (1995) para o período de junho/92 a maio/93.

MÊS	VOLUME PRODUZIDO (m ³)	VOLUME FATURADO (m ³)	ÍNDICE DE PERDA (%)
jun/92	347.299,81	265.185	23,64
jul/92	345.739,76	250.805	27,46
ago/92	318.273,86	259.875	18,35
set/92	303.816,65	251.302	17,28
out/92	351.592,44	277.808	20,99
nov/92	377.019,39	263.970	29,99
dez/92	391.359,57	288.692	26,23
jan/93	353.807,49	260.390	26,40
fev/93	281.623,44	289.536	-2,81
mar/93	326.348,38	270.771	17,03
abr/93	332.703,25	278.230	16,37
mai/93	364.507,84	267.664	26,57
TOTAL	4.094.091,88	3.224.228	21,25

Fonte: (SABESP 1995)

Os poços profundos da SABESP para fins de abastecimento público que estavam em funcionamento até o final de 1996, produziam um volume total de 6.737.900 m³/ano (18.460 m³/d). Considerando-se o índice de perda calculado de 21,25%, o volume perdido soma cerca de 1.431.804 m³. Entretanto, deste volume perdido, encontram-se contabilizadas as perdas por

ligações clandestinas e parte dos vazamentos que escoam diretamente para as galerias de águas pluviais.

Para descontar este tipo de perda, considerou-se que, 70% do volume perdido infiltra-se diretamente no solo, contribuindo para a recarga do aquífero, somando, então, um volume de $1.002.263 \text{ m}^3$ de água, que distribuídos na área urbana, perfaz uma taxa de recarga de 136 mm/ano. Dessa forma, observa-se que a influência da área urbana, apesar da impermeabilização do solo, aumenta a recarga do aquífero dada às perdas da rede de distribuição de água, elevando mais de 30% da recarga natural.

6.3.7. Disponibilidade hídrica

Apesar da existência de um extenso cone de rebaixamento no aquífero sedimentar, não significa que este esteja sendo totalmente esgotado. Se considerarmos que a reserva ativa do aquífero é semelhante ao volume infiltrado no mesmo, é possível estimar o seu volume de água explorável.

A taxa de infiltração obtida no cálculo de balanço hídrico foi cerca de 100 mm/ano, que, considerando uma área de 378 km^2 para o município, perfaz um total de $37.800.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ que corresponde à recarga total do aquífero. Como os poços estão concentrados na metade meridional do município, a água da porção norte não é explorada, escoando para o rio Paraíba, que atua como área de descarga. Descontando-se esta água não explorada da porção norte, resulta para a porção sul do município, um total de $18.900.000 \text{ m}^3/\text{ano}$, ou seja, $51.780 \text{ m}^3/\text{d}$. A vazão extraída pelos poços, considerando conjuntamente os poços particulares, é estimada em cerca de $22.000 \text{ m}^3/\text{d}$, como ilustrado na Tabela 6.7, o que mostra, ainda, um volume considerável a ser explorado de $29.780 \text{ m}^3/\text{d}$. Dessa forma, considerando apenas a porção sul do município, cerca de 43% do volume infiltrado está sendo captado através dos poços existentes.

Entretanto, nesta taxa ($51.780 \text{ m}^3/\text{d}$) estão incluídos os escoamentos básicos das drenagens locais, o que significa que a exploração da água subterrânea pelos poços implica em uma diminuição da vazão escoada para os rios.

Para evitar ou minimizar este impacto devem ser tomadas medidas para que a recarga seja mantida ou ampliada através da proibição do desmatamento, incentivo ao reflorestamento, e, caso seja necessário no futuro, estudar medidas para a recarga artificial do aquífero em áreas mais críticas.

7. Modelo matemático de água subterrânea

7.1. Escolha do aplicativo matemático

A escolha do aplicativo matemático fundamentou-se no objetivo de avaliar a aplicabilidade da modelação matemática tridimensional para a determinação das Zonas de Contribuição de poços de abastecimento de forma a estabelecer uma estratégia de proteção voltada as captações de água subterrânea.

O programa selecionado para fluxo de água subterrânea, como discutido anteriormente, foi o MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988), desenvolvido e distribuído gratuitamente pelo U. S. Geological Survey. Para a simulação do caminhamento de partículas, escolheu-se o programa MODPATH (Pollock 1989), também de domínio público, desenvolvido pelo U. S. Geological Survey.

Estes programas são os mais utilizados nos Estados Unidos para a modelação tridimensional do fluxo de água subterrânea, apresentando diversos pré e pós-processadores que auxiliam a entrada de dados e a visualização dos resultados. Os programas MODFLOW e MODPATH foram escolhidos por atender os requisitos necessários para a construção do modelo matemático do sistema hidrogeológico considerado e também por apresentar uma documentação clara para sua utilização.

O programa MODFLOW foi desenvolvido para a modelação tridimensional, por diferenças finitas centradas no bloco, para fluxo de água subterrânea. Ele permite a simulação em estado transiente ou estacionário, condições heterogêneas e anisotrópicas para as múltiplas camadas, discretizadas em uma grade irregular ou uniforme. As condições de contorno que o programa permite colocar contemplam os três tipos (Dirichlet, Neuman e Cauchy), podendo-se simular fronteiras como, "não fluxo", carga constante, drenos, rios, lagos, paredes, recarga, evapotranspiração, variáveis ou não no tempo. Permite, ainda, a simulação de poços de injeção ou extração, com taxas variáveis no tempo. Por ser construído na forma modular, sua aplicação é otimizada, pois utiliza-se apenas os módulos necessários para atender as complexidades do sistema hidrogeológico. Por exemplo, se não existir o processo de evapotranspiração na área de estudo, este módulo pode ser retirado do programa MODFLOW, otimizando tempo de processamento e espaço na memória do computador.

Entretanto, o MODFLOW simula apenas o fluxo saturado, não podendo considerar o fluxo na zona não saturada. Além disso, o MODFLOW não considera diferenças de densidade de fluidos, efeitos de gradiente de temperatura e mudanças de viscosidade. Aquíferos fraturados são simulados com este programa quando considerados, na escala estudada, como porosos uniformes (Marquis & Stewart 1994). Este programa calcula o balanço total de água no modelo matemático, o que permite conferir se as equações estão sendo calculadas corretamente para o cenário simulado.

As equações de fluxo de água subterrânea desenvolvidas pelo programa MODFLOW foram mostradas anteriormente.

O programa MODPATH (Pollock 1989) pode ser considerado um pós-processador dos resultados de carga hidráulica obtidos pelo programa MODFLOW, calculando, por um método semi-analítico, as linhas de trajetórias de partículas imaginárias colocadas no fluxo de água subterrânea. O método e as equações utilizadas para o cálculo destas linhas de fluxo foram mostradas anteriormente. Assim, dada a posição inicial das partículas colocadas em qualquer lugar na célula, o MODPATH, levando em conta apenas a advecção e considerando que a componente da velocidade varia linearmente ao longo de cada eixo de coordenada, calcula o tempo de trânsito e a trajetória das partículas dentro do domínio do modelo matemático. As partículas podem ser 'reversas' ou 'avante', isto é, elas podem caminhar para trás ou para frente, respectivamente, a partir da sua posição inicial dentro do domínio do modelo. Isto permite conhecer a origem ou o destino das linhas de trajetórias, ou da água subterrânea, sendo útil para a determinação das áreas de captura de poços ou direções de caminhamento de eventuais plumas de contaminação, avaliando-se os riscos potenciais existentes.

O programa MODPATH foi construído para utilizar os resultados do MODFLOW, entretanto aceita dados de carga hidráulica de qualquer outro programa tridimensional de fluxo que utilize o método de diferenças finitas centradas no bloco. Dessa forma, resultados de programas que utilizem diferenças finitas centradas na malha ou elementos finitos não podem ser utilizados no MODPATH. A precisão numérica das linhas de trajetória calculadas depende do refinamento da grade, a qual influencia o detalhamento na representação das condições de contorno e das fontes e sumidouros, e também no cálculo das velocidades (Pollock 1989). A maior discretização da malha, principalmente em fontes ou sumidouros, permite uma maior precisão no cálculo das linhas de trajetória.

Para facilitar a entrada de dados e visualização das cargas hidráulicas e linhas de trajetórias calculadas pelos programas MODFLOW e MODPATH, utilizou-se a interface Visual MODFLOW (Guiguer & Franz 1996), desenvolvida por Nilson Guiguer e Thomas Franz em 1994 e atualmente comercializada por Waterloo Hydrogeologic Inc., que gentilmente cedeu seu produto para a utilização neste trabalho. Além disso, este programa é de fácil utilização, apresentando um manual bem explicado e suporte técnico da empresa.

O programa Visual MODFLOW é um pré e pós-processador para o MODFLOW e MODPATH, permitindo a entrada de dados e a visualização dos resultados na forma gráfica, facilitando a construção e definição do modelo matemático. O Visual MODFLOW lê os dados de entrada colocados graficamente e traduz para o formato ASCII exigido pelo MODFLOW e pelo MODPATH. Para os resultados, o Visual MODFLOW segue o caminho inverso, lendo os arquivos em ASCII gerados pelo MODFLOW e MODPATH e transforma para o formato de gráficos e mapas de isolinhas para facilitar a visualização. Ainda, possui algumas facilidades de

importação de superfícies irregulares, colocação de poços com filtros em múltiplas camadas e traz, dentro do pacote, o programa ZONEBUDGET (Harbaugh 1990), também desenvolvido pelo U. S. Geological Survey para cálculo do balanço de água em zonas específicas, utilizando os resultados do MODFLOW. Este programa ZONEBUDGET foi utilizado para o cálculo do escoamento básico nas bacias dos córregos Divisa e Caçapava Velha, adotados como parâmetros de calibração do modelo matemático.

7.2. Discretização da área modelada

A área modelada neste estudo compreendeu apenas a parte ao sul do rio Paraíba em função dos dados existentes e da exploração de água subterrânea no município.

A ocupação urbana de Caçapava deu-se principalmente ao longo da rodovia Presidente Dutra, que corta a cidade de oeste para leste, condicionando a expansão apenas ao sul do rio Paraíba. Na porção norte do município predominam propriedades rurais e loteamentos de sítios e chácaras, sendo que a maioria é abastecida por água superficial ou pela rede da SABESP.

Todos os poços profundos de grande vazão (superiores a 1000 m³/d) que abastecem a cidade estão localizados ao sul do rio Paraíba, próximos à zona urbana. Alguns poços isolados abastecem bairros menores como em Guamirim, Caçapava Velha e Vila Mariana. Os demais poços cadastrados também estão localizados na parte ao sul do rio Paraíba.

Assim, devido a massa de informações estarem concentradas na porção sul, a modelação matemática concentrou-se na área que vai do rio Paraíba até o divisor de águas ao sul, o qual coincide com o limite do município (Figura 7.1), perfazendo uma área de aproximadamente 16 km por 17 km.

De forma a alinhar os eixos de coordenadas com a direção principal de fluxo da água subterrânea, "rotacionou-se" a área em 33° no sentido horário, adotando-se um novo sistema de coordenadas, como mostra a Figura 7.1.

Inicialmente foi definida uma grade para a área modelada com espaçamento constante de 250 metros tanto para o eixo x como para o eixo y. Esta grade foi refinada nas áreas de interesse, próximo aos poços de bombeamento destinados ao abastecimento público e dos poços usados na calibração, para um espaçamento ($\Delta x = \Delta y$) de 31,25 metros.

O número de camadas do modelo matemático foi definido com base nas unidades hidroestratigráficas determinadas no modelo conceitual, como mostram as Figuras 6.19 a 6.23. Dessa forma, foram definidas apenas três camadas: a primeira camada representando as unidades hidroestratigráficas superior e recente, a segunda camada representando a unidade hidroestratigráfica inferior, a qual representa a principal unidade aquífera da área, e a terceira camada representando o embasamento cristalino, que neste modelo, foi considerado, em uma

Figura xx - Área considerada para a modelação matemática

escala macroscópica, como uma unidade homogênea. O refinamento da grade do modelo no sentido vertical foi evitado para diminuir o tempo de processamento dos cálculos.

A modelação matemática foi conduzida em duas situações para possibilitar a verificação do modelo calibrado. A primeira situação modelada foi considerando o sistema hidrogeológico sem interferência antrópica, isto é, 'sem bombeamento', assumindo que nenhum poço estava ativo, e um segundo cenário, considerando os poços em funcionamento, denominada de situação 'com bombeamento'. Para otimizar o tempo de simulação e memória disponível, foi definida uma discretização diferenciada da grade para cada situação simulada, pois utilizou-se poços com localizações diferentes para a calibração do modelo nos dois cenários.

Na situação 'sem bombeamento', a grade do modelo foi discretizada em 154 linhas por 179 colunas, totalizando 82.698 células e na situação 'com bombeamento' a grade de 206 linhas e 214 colunas gerou um total de 132.252 células (Figura 7.2).

As superfícies que limitam as camadas foram definidas com base nas unidades hidroestratigráficas definidas no modelo conceitual (Figuras 6.19 a 6.23). As superfícies foram digitalizadas e importadas no modelo matemático, permitindo uma representação mais próxima da espessura real do aquífero (Figura 7.3).

O topo da primeira camada representa a superfície do terreno, a qual foi digitalizada a partir dos mapas plani-altimétricos na escala 1:10.000. A base da primeira camada representa a separação entre os sedimentos mais finos, englobados na unidade hidrogeológica superior, e os sedimentos mais grosseiros, que representam o principal aquífero na área. A base da segunda camada representa o topo do embasamento cristalino e sua superfície foi baseada no Mapa de Contorno Estrutural. A base da terceira camada, que representa o embasamento, foi colocada na cota zero, pois acredita-se que, além de possuir baixa permeabilidade, este aquífero não apresenta contribuição a grandes profundidades devido ao fechamento das fraturas.

A Figura 7.4 mostra uma visualização espacial do topo das Camadas 1, 2 e 3 do modelo matemático.

7.3. Definição das unidades hidráulicas e seus parâmetros hidrogeológicos

As unidades hidráulicas do modelo matemático foram definidas com base nas unidades hidroestratigráficas do modelo conceitual e na avaliação dos parâmetros hidráulicos obtidos dos testes de bombeamento dos poços.

Dessa forma, a primeira camada engloba os sedimentos quaternários da várzea do rio Paraíba e os sedimentos mais finos das formações Tremembé e Pindamonhangaba. No modelo matemático de diferenças finitas, as camadas não podem ser descontínuas para acompanhar a disposição lenticular das formações geológicas. Assim, a primeira camada

Discretização da grade do modelo simulado na situação 'sem bombeamento'

Discretização da grade do modelo simulado na situação 'com bombeamento'

Figura 7.2 - Discretização da grade do modelo matemático utilizada na situação 'sem bombeamento' e 'com bombeamento'

Grade do modelo matemático - Seção A - A'

Grade do modelo matemático - Seção B - B'

Figura 7.3 - Visualização do topo e da base das camadas e a discretização da grade do modelo matemático no eixo z

Figura 7.4 - Superfície das camadas do modelo matemático

também engloba a parte aflorante da Formação Resende e do Embasamento Cristalino, como mostram as Figuras 6.19 a 6.22. A configuração das unidades hidráulicas nesta camada obedeceu a disposição das unidades litológicas definidas no mapa geológico de Mancini (1995), como mostra a Figura 7.5.

Os parâmetros hidráulicos adotados para a primeira camada foram definidos com base nas características litológicas das formações (Freeze & Cherry, 1979) e nos valores de condutividade hidráulica obtidos dos testes de vazão. A Formação Tremembé, representada pela unidade 10 (Figura 7.5), possui a menor condutividade hidráulica (5×10^{-7} m/s) pois sua constituição é predominantemente argilosa. Da mesma forma, para Formação Pindamonhangaba, englobando os membros Pararangaba, mais arenoso, e Presidente Dutra, mais argiloso, foi adotada uma condutividade hidráulica baixa (8×10^{-7} m/s) devido a sua constituição litológica, sendo representada pela unidade 7 (Figura 7.5). Na porção ao longo do rio Paraíba, a unidade 9 representa os sedimentos arenosos do quaternário, com uma condutividade hidráulica estimada de 3×10^{-6} m/s. A condutividade hidráulica da Formação Resende tomou por base os valores dos testes de vazão, que variaram entre 10^{-6} a 10^{-5} m/s, assumindo-se um valor final de 1×10^{-6} m/s para esta unidade na primeira camada, representada pela unidade 8 (Figura 7.5).

A segunda camada representa os sedimentos apenas da Formação Resende, principal unidade hidrogeológica da área, entretanto, como a camada do modelo deve ser contínua, engloba também parte do Embasamento Cristalino na porção sul do município (Figura 7.5). Diferenciou-se esta camada em quatro unidades hidráulicas distintas baseando-se na distribuição dos valores de condutividade hidráulica calculados anteriormente (Figura 6.29). Assim, na porção sul, próximo ao Embasamento Cristalino, as condutividades hidráulicas são mais baixas, sendo que a unidade 4 possui valor de 1×10^{-6} m/s, semelhante à unidade 8 da primeira camada, e a unidade 3 apresentou o valor de 3×10^{-6} m/s, estendendo-se para a porção sudeste da área. A unidade 1, com condutividade hidráulica de 6×10^{-6} m/s, abrange a maior parte da camada 2, possuindo apenas um pequeno corpo com condutividade hidráulica maior, representada pela unidade 2 ($K = 8 \times 10^{-6}$ m/s), como mostra a Figura 7.5.

O Embasamento Cristalino foi adotado como uma unidade hidráulica, representada pela unidade 5 e englobando a terceira camada do modelo matemático. Em geral, muitos estudos adotam o Embasamento Cristalino como uma barreira impermeável, entretanto, neste estudo, adotou-se como uma unidade hidráulica distinta para simular sua contribuição, principalmente pelo manto de alteração, ao aquífero sedimentar, pois alguns poços, como no bairro Guamirim, exploram este aquífero conjuntamente com o aquífero sedimentar. O alto estrutural do embasamento cristalino foi simulado, assinalando-se a unidade 5 na primeira e segunda camadas do modelo, como mostra a Figura 7.5.

Distribuição das unidades hidráulicas na Camada 1

Distribuição das unidades hidráulicas na Camada 2

Distribuição das unidades hidráulicas em um seção N-S

UNIDADE
HIDRÁULICA

1		6×10^{-6}
2		8×10^{-6}
3		3×10^{-6}
4		1×10^{-6}
5*		8×10^{-8}
7		8×10^{-7}
8		1×10^{-6}
9		3×10^{-6}
10		5×10^{-7}

($K_x = K_y = 0,1 K_z$)
* ($K_x = K_y = K_z$)

LEGENDA

	células inativas
	drenagem
	ruas e estradas
	área urbanizada

Figura 7.5 - Distribuição das unidades hidráulicas nas Camadas 1 e 2 do modelo matemático

A relação de anisotropia das unidades não foi possível definir pois os testes de bombeamento interpretados não foram executados utilizando poços de observação. Dessa forma, adotou-se que as unidades hidráulicas são isotrópicas nos eixos x e y, entretanto anisotrópicas em relação ao eixo z pois assume-se que a sedimentação de camadas arenosas e argilosas imprimem uma condutividade hidráulica inferior no sentido vertical. Dessa forma, adotou-se a relação de $K_x = K_y = 0,1 K_z$. O Embasamento Cristalino, tratado neste estudo como uma unidade homogênea na escala regional, foi assumido ser isotrópico em relação aos eixos x, y e z ($K_x = K_y = K_z$), não apresentando nenhum sentido preferencial devido a estruturas geológicas.

Os parâmetros de armazenamento foram adotados como homogêneos para todas as unidades hidráulicas, baseando-se em dados bibliográficos, pois não foi possível determiná-los a partir dos testes de vazão. Os valores adotados para os parâmetros hidráulicos estão ilustrados na Tabela 7.1, sendo que representam os valores obtidos após a calibração do modelo.

Tabela 7.1 - Parâmetros hidráulicos adotados no modelo matemático.

Unidade Hidráulica	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)	S_s (m^{-1})	S_y	n_{ef}	n
1	6×10^{-6}	6×10^{-6}	6×10^{-7}	0,001	0,25	0,25	0,40
2	8×10^{-6}	8×10^{-6}	8×10^{-7}	0,001	0,25	0,25	0,40
3	3×10^{-6}	3×10^{-6}	3×10^{-7}	0,001	0,25	0,25	0,40
4	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	0,001	0,25	0,25	0,40
5	8×10^{-8}	8×10^{-8}	8×10^{-8}	0,001	0,25	0,25	0,40
7	8×10^{-7}	8×10^{-7}	8×10^{-8}	0,001	0,25	0,25	0,40
8	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	0,001	0,25	0,25	0,40
9	3×10^{-6}	3×10^{-6}	3×10^{-7}	0,001	0,25	0,25	0,40
10	5×10^{-7}	5×10^{-7}	5×10^{-8}	0,001	0,25	0,25	0,40

K_x, K_y, K_z = condutividade hidráulica nos eixos x, y, z

S_s = coeficiente de armazenamento específico

S_y = porosidade efetiva

n_{ef} = porosidade efetiva para fluxo

n = porosidade total

7.4. Definição das condições de contorno

A área modelada é limitada ao sul por células inativas, indicando uma condição de contorno de "não fluxo", simulando um divisor de águas (Figura 7.6). Esta condição de contorno coincide com o limite sul do município, na Serra do Jambeiro e foi assumido para as três camadas do modelo matemático. A base da terceira camada, no limite inferior, também foi assumida como uma condição de contorno de "não fluxo" (Figura 7.6).

Os limites norte, oeste e leste do modelo são definidos por condição de contorno de carga hidráulica genérica para simular o fluxo regional existente na Bacia Sedimentar de Taubaté. O mapa potenciométrico da Bacia de Taubaté (DAEE 1977a) indica um fluxo principal da água subterrânea para o rio Paraíba e uma componente secundária no sentido leste (Figura 6.6). Estas curvas equipotenciais mostram elevações da ordem de 620 metros na porção oeste da bacia, chegando a elevações de cerca de 520 metros na região leste, nas cidades de Cachoeira Paulista e Cruzeiro, comprovando este sentido de fluxo da água subterrânea. Para simular esta componente de fluxo regional, foram colocadas condições de contorno de carga hidráulica genérica no limite oeste e leste do modelo. A fronteira de carga hidráulica genérica, aqui assumida para o limite oeste do modelo, foi baseada no mapa potenciométrico elaborado por Hirata (1994) para o município de São José dos Campos. O ponto de referência foi tomado no ribeirão Putins, situado a cerca de 9.000 metros a oeste do limite do modelo, onde a carga hidráulica foi assumida com uma variação entre 700 metros próximo à nascente a 537 metros no rio Paraíba.

Para a definição da condição de contorno do limite leste do modelo matemático assumiu-se uma carga hidráulica genérica na altura do ribeirão José Raimundo, localizado a uma distância de 4.000 metros da área modelada. A carga hidráulica assumida baseou-se no mapa potenciométrico da Bacia de Taubaté (DAEE 1977a), variando de 700 metros a montante do ribeirão José Raimundo até 530 metros próximo ao rio Paraíba.

No limite norte do modelo assumiu-se também uma condição de contorno de carga hidráulica genérica, pois o pacote sedimentar supera os 100 metros de espessura, podendo ocorrer um fluxo de água subterrânea a maiores profundidades, provenientes da porção norte do município. A fronteira de carga hidráulica genérica foi baseada na linha equipotencial 580 metros do mapa potenciométrico de DAEE (1977a), localizada a cerca de 3.000 metros ao norte do limite da área modelada.

Estas cargas hidráulicas afastadas foram assumidas como constantes para as três camadas do modelo. A condutância foi calculada a partir da condutividade hidráulica média de cada formação litológica existente no limite da área modelada e também para cada camada do modelo em função da variação do tamanho das células. A segunda camada, simulando a Unidade Hidrogeológica Inferior, foi assumida como uma unidade homogênea, adotando um

LEGENDA

- drenagem
- ruas e estradas
- área urbanizada

- condição de contorno 'rio'
- condição de contorno 'dreno'
- condição de contorno 'carga hidráulica genérica'
- condição de contorno 'não-fluxo' - células inativas

Figura 7.6 - Condições de contorno do modelo matemático

valor médio de condutividade hidráulica de 5×10^{-6} m/s. As condutâncias, adotadas após a calibração do modelo, utilizadas para cada unidade hidráulica em cada camada são mostradas na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Valores de condutância (m^2/d) utilizados na condição de contorno de carga hidráulica genérica.

Limite	Camada	Quaternário	Formação Pindamonhangaba	Formação Tremembé	Formação Resende	Embasamento Cristalino
Oeste	1	1,44	0,24	0,034	0,24	0,0024
	2				0,24	0,0017
	3					0,0034 a 0,0043
Leste	1	2,7	0,97	0,97	0,97	
	2				0,49 a 1,8	
	3					0,0058 a 0,0099
Norte	1	1,44 a 1,73		0,17	0,86	
	2				1,73	
	3					0,012

No limite superior do modelo foi assinalada uma condição de contorno do Tipo 2, de fluxo especificado, utilizando o módulo de recarga do MODFLOW (Figura 7.6). A taxa de recarga assinalada baseou-se na interpretação do balanço hídrico das bacias dos córregos Caçapava Velha e Divisa, e nas taxas calculadas de perda da rede de distribuição de água.

Definiram-se três zonas distintas de recarga com base nas características do terreno (Figura 7.7). Os valores citados são do modelo já calibrado.

A maior parte da área foi assumida com valor de 75 mm/ano de recarga, valor próximo àqueles obtidos na avaliação do balanço hídrico, de 86 mm/ano para a bacia do córrego Caçapava Velha e 96 mm/ano para a bacia do córrego Divisa. Uma zona com recarga de 130 mm/ano foi assinalada no sul da área, na região do embasamento cristalino. Apesar da alta declividade de parte desta região, assumiu-se uma taxa de recarga maior nesta porção devido à presença de manto de alteração arenoso e existência de densa vegetação natural. Além disso, segundo DAEE (1977a), as taxas de precipitações são maiores nas porções da serra em relação à planície. A média geral de precipitação na bacia do rio Paraíba é de 1200 a 2500 mm/ano, mas apenas na planície esta média é inferior, variando de 1200 a 1600 mm/ano (DAEE, 1977a). Uma zona de menor taxa de recarga, de apenas 20 mm/ano, foi assinalada ao longo da várzea do rio Paraíba, por assumir que é uma área de descarga da água subterrânea, dificultando a infiltração da precipitação.

LEGENDA

- drenagem
- ruas e estradas
- área urbanizada
- células inativas

Recarga (mm/ano)

- 130
- 75
- 150
- 20

Escala

Figura 7.7 - Distribuição das taxas de recarga utilizadas no modelo matemático.

Estas zonas de recarga foram assumidas considerando a não interferência antrópica no regime hidrológico, entretanto, a ocupação urbana afeta o processo de infiltração, alterando as taxas de recarga do aquífero através da impermeabilização do terreno e perdas da rede de água e esgoto. Dessa forma, na modelação matemática considerando o cenário 'com bombeamento', isto é, simulando o sistema hidrogeológico, com poços em funcionamento, foi assinalada uma zona com recarga de 150 mm/ano, para simular a perda de água da rede de distribuição. Este valor foi baseado na avaliação dos dados de SABESP (1995). A área assinalada com esta maior recarga abrangeu apenas a parte mais antiga da cidade, obtida a partir dos mapas topográficos, na escala 1:10.000 confeccionados por EMPLASA, em 1978.

O rio Paraíba e as drenagens secundárias atuam como área de descarga regional e local, respectivamente, para o fluxo de água subterrânea no município, como mostram os mapas potenciométricos confeccionados para a área (Figuras 6.31 e 6.32). Para representar estas feições hidráulicas no modelo matemático foram utilizados os módulos de 'rio' e 'dreno' do programa MODFLOW, respectivamente.

O rio Paraíba foi simulado como condição de contorno 'rio' do MODFLOW (Figura 7.6), com a elevação da carga hidráulica variando de 535 m (a oeste) para 533 metros (a leste), considerando uma altura de lâmina d'água constante de 8 metros e valor de condutância para o modelo calibrado de 1300 m²/d.

As drenagens secundárias foram simuladas como condição de contorno 'dreno' do MODFLOW (Figura 7.6), para facilitar a verificação da influência dos poços, pois se o nível d'água no aquífero estiver abaixo do dreno, cessa-se a ação de descarga e o dreno torna-se seco. O gradiente hidráulico das drenagens locais varia devido à declividade do terreno, a qual é muito mais acentuada na porção sul do município, próximo da serra onde estão as nascentes dos córregos. Assim, a variação da elevação da carga hidráulica nos drenos obedeceu este comportamento, com um gradiente maior na porção sul, variando entre 9 a 12 %, até o contato do embasamento com os sedimentos. Na planície, o gradiente hidráulico é bem inferior, variando de 0,5 a 1%. A condutância adotada para o modelo calibrado foi de 500 m²/d.

7.5. Poços de bombeamento

Os poços de bombeamento em funcionamento foram simulados apenas considerando a situação 'com bombeamento'.

As características hidráulicas construtivas dos poços inseridas no modelo matemático foram: diâmetro do poço, intervalo dos filtros, vazão e período de bombeamento. O MODFLOW assume que os poços possuem filtro em toda a camada explorada (Figura 5.9), assim, colocou-se apenas um intervalo considerando o topo da primeira seção filtrante e a base da última seção (Figura 7.8). A maior parte dos poços possui filtro na segunda camada, onde

Well Edit Window

Well name: SA18

World X Location: 14561.60 [m]

World Y Location: 8321.80 [m]

Buttons: Add Screen, Clear Screen, Clear all, Screen all

Screen #: 1

Screen from: 486.00 [m]

To: 370.00 [m]

Buttons: Apply Screen Changes Now, Reset

Well casing display as: Elevation

☐ Deactivate Well

Buttons: OK, Cancel, Help

Pumping Schedule Import

Start [day]	Stop [day]	Rate [m³/d]
0	18250.00	-1682.4

Use As Obs

Well Radius: 0.10

Click on screen to highlight.

DADOS DE ENTRADA

- . nome do poço
- . coordenadas
- . intervalo de filtros
- . situação do poço (ativo/desativado)
- . taxas e períodos de bombeamento
- . raio do poço
- . dados de nível d'água

Figura 7.8 - Dados de entrada para os poços de bombeamento

predominam as porções mais arenosas do pacote sedimentar. Nos poços que exploram conjuntamente o aquífero cristalino, foi colocado filtro também na terceira camada. Alguns poços possuem o nível dinâmico abaixo da primeira seção filtrante, deixando partes secas, que não foram consideradas no perfil do poço inserido no programa MODFLOW. Este passo foi adotado para se evitar a diminuição da taxa de bombeamento do poço quando a célula da primeira camada torna-se seca.

Os poços considerados ativos para o modelo matemático estão ilustrados na Figura 7.9. Os poços novos da SABESP, perfurados após 1996, foram considerados como desativados porque os dados de monitoramento de nível d'água, utilizados na calibração do modelo, são de maio de 1996.

As vazões dos poços de abastecimento público utilizadas no modelo matemático foram obtidas dos dados de monitoramento da SABESP de maio de 1996. Para os poços pertencentes às indústrias, clubes e alguns pertencentes ao comércio, as vazões foram obtidas das medições realizadas pela SABESP e das fichas de controle da CETESB. Para os demais poços as vazões foram estimadas com base no número de usuários e tipo de atividade.

Na fase de calibração do modelo na situação 'com bombeamento', as vazões dos poços foram estimadas para um tempo de bombeamento de 24 horas, enquanto que para a definição da Zona de Contribuição, utilizou-se a vazão calculada para o tempo real de bombeamento dos poços. Este detalhe é melhor explicado adiante.

7.6. Parâmetros de calibração

Para maior confiabilidade, a calibração do modelo matemático foi efetuada considerando-se duas situações distintas do sistema hidrogeológico.

Na primeira situação, denominada de 'sem bombeamento', simulou-se o sistema hidrogeológico sem a interferência antrópica, isto é, considerando a inexistência de poços de extração. Para esta situação utilizou-se como parâmetros de calibração, os níveis estáticos dos 13 poços antigos, construídos até 1970, que não mostravam interferência de outros poços vizinhos. O mapa potenciométrico, considerando o nível estático natural da água subterrânea (Figura 6.31), serviu de base para a visualização do comportamento do fluxo antes do bombeamento dos poços. Os poços utilizados para a calibração no modelo 'sem bombeamento' são mostrados na Figura 7.10).

Frente ao pequeno número de poços disponíveis para a calibração do modelo no cenário 'sem bombeamento', utilizou-se, também, os dados de balanço hídrico nas bacias dos córregos Caçapava Velha e Divisa. Os valores de escoamento básico, calculados pelo método de Meyboom (1961), foram adotados para a calibração do modelo, sendo comparados com os volumes de água que saíram pelos drenos, utilizados para simular os córregos. O cálculo do

Figura 7.9 - Poços de bombeamento considerados ativos no modelo matemático simulado na situação 'com bombeamento'

LEGENDA

células inativas

poço utilizado
como poço de observação

drenagem

ruas e estradas

área urbanizada

Figura 7.10 - Poços utilizados como pontos de observação do nível d'água
(a) na situação 'sem bombeamento' e (b) na situação 'com bombeamento'

volume de entrada e saída de água do sistema foi efetuado através do programa ZONEBUDGET (Harbaugh 1990), que permite definir zonas específicas para o balanço hídrico (Figura 7.11). Para a bacia do córrego Caçapava Velha, utilizou-se a média do valor de escoamento básico calculado para o período de 1958 a 1995, e para o córrego Divisa, o período com dados foi, apenas, de 1970 a 1975, sendo utilizado somente na calibração do modelo neste cenário 'sem bombeamento'. Os valores adotados para a calibração do modelo estão ilustrados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Valores de escoamento básico utilizados na calibração do modelo no cenário 'sem bombeamento'

	Córrego Caçapava Velha	Córrego Divisa (m ³ /d)
Escoamento básico (m ³ /d)	7.193 (dados de 1958 a 1995)	17.147 (dados de 1970 a 1975)

A segunda situação simulada, denominada de situação 'com bombeamento', simulou o sistema hidrogeológico considerando os poços em funcionamento. Os parâmetros utilizados para a calibração do modelo foram os níveis dinâmicos dos poços que se encontravam em funcionamento em maio de 1996. No total foram utilizados 29 poços como pontos de observação, como mostra a Figura 7.10. Os níveis dinâmicos utilizados foram baseados nos dados de monitoramento dos poços de abastecimento da SABESP e nos testes de vazão de poços particulares mais recentes, perfurados na década de 90.

Optou-se pela utilização do nível dinâmico de alguns poços particulares isolados porque as medidas de nível estático, muitas vezes, não refletiam o nível real como no poço PA-23, onde a altitude do nível estático informado foi de 529 metros, abaixo do nível do rio Paraíba. Este fato seria possível caso houvesse influência de outros poços, entretanto, este é um poço isolado no leste da área, indicando um erro na medida do nível estático, provavelmente afetado pelo desenvolvimento e limpeza, realizados, em geral, antes do teste de bombeamento. O mesmo problema ocorre com os poços PA3 e PA9. Para evitar, então, este problema, assumiu-se o nível dinâmico obtido nos testes de bombeamento como parâmetro de calibração, utilizando-se nesta situação 'com bombeamento', a vazão do teste considerando um período de bombeamento de 24 horas, pois a unidade de vazão utilizada no modelo matemático foi m³/d (Tabela 7.4). Estes valores de vazão, calculados para 24 horas de bombeamento, foram utilizados apenas nesta fase de calibração do modelo no cenário 'com bombeamento', sendo que, na simulação do caminhamento de partículas, para definição da Zona de Contribuição dos poços, foram utilizadas as taxas de bombeamento reais, estimadas ou medidas.

LEGENDA

- drenagem
- ruas e estradas
- área urbanizada
- células inativas

Zonas definidas para o balanço hídrico

- córrego Divisa
- córrego Caçapava Velha

Escala

Figura 7.11 - Zonas específicas para o cálculo do balanço hídrico através do programa ZONEBUDGET no modelo matemático

Tabela 7.4 - Taxas de bombeamento dos poços particulares utilizadas na calibração do modelo matemático na situação 'com bombeamento'.

Poço	Vazão do teste de bombeamento (m ³ /h)	Vazão calculada para calibração do modelo na situação 'com bombeamento' (m ³ /d)	Vazão medida ou estimada real (m ³ /d)	Elevação do nível dinâmico (m)
PF4	9,25	222	15	556,4
PF5	5,00	120	15	527,0
PF6	4,65	112	15	512,4
PA3	15,80	379	0	503,7
PA4	10,28	247	0	553,5
PA5	7,20	173	7,2	530,0
PA9	6,10	146	6,1	525,0
PA23	15,75	378	3,0	512,0
PA50	4,80	115	5,0	539,1
PA44	12,80	307	13,2	502,0
PA47	8,00	192	2,5	529,0

Como a unidade utilizada pelo programa foi de m³/d para a vazão, as taxas de bombeamento dos poços da SABESP, ativos em maio de 1996, tiveram que ser recalculadas pois suas medidas estavam em m³/h. O cálculo da vazão real do poço, em m³/d, foi realizada multiplicando-se a vazão, em m³/h, pelo número de horas de funcionamento do poço, valor este monitorado pela referida empresa. Entretanto, no modelo matemático, se fosse utilizada esta vazão real, o nível dinâmico calculado para os poços utilizados como pontos de observação teria uma elevação maior que o nível dinâmico medido. Este fato ocorre pois o nível dinâmico medido no campo refere-se à vazão horária real, onde o poço é desligado antes de completar 24 horas de bombeamento. No modelo matemático, colocando-se o volume real explorado por dia, resultaria em uma taxa de bombeamento horária menor que a vazão horária real, o que consequentemente reflete no nível dinâmico calculado. Dessa forma, a taxa de bombeamento, em m³/d, utilizada para a calibração do modelo matemático na situação 'com bombeamento', considerou um período ilusório de 24 horas multiplicada pela vazão horária real.

O nível dinâmico medido pôde ser usado para a calibração do modelo pois os poços funcionaram mais de 11 horas por dia, sendo que o período em que a bomba desligava era, provavelmente, à noite quando o consumo de água diminui. Alguns poços funcionaram mais de 20 horas por dia, como no caso do poço SA19. Apenas em Guimirim e Caçapava Velha, onde o consumo é menor, os poços funcionaram em torno de 12 horas, como mostra a Tabela 7.5. Todos os valores utilizados nesta modelação são referentes às medidas feitas em maio de 1996.

Estes valores de vazão e nível dinâmico foram utilizados apenas na calibração do modelo matemático, sendo que para a definição da Zona de Contribuição dos poços, foram utilizados a vazão e o tempo de funcionamento reais.

Tabela 7.5 - Taxas de bombeamento dos poços de abastecimento público utilizados como pontos de observação na calibração do modelo matemático na situação 'com bombeamento'

Poço	Vazão real (m ³ /h) (**)	Tempo de funcionamento (h/dia) (**)	Vazão real (m ³ /d) (**)	Vazão para 24 horas de bombeamento (m ³ /d) (*)	Elevação do nível dinâmico (m) (**)
SACV1	5,9	12,1	71,4	141,6	569,0 (***)
SACV2	7,2	12,1	87,3	172,8	549,8
SACV3	18,5	11,3	208,9	444	550,7
SA13	61,4	18,9	1162,6	1473,6	493,4
SA18	70,1	12,4	868,3	1682,4	479,7
SA19	71,7	23,8	1706,9	1720,8	490,5
SA20	14,1	11,7	165,6	338,4	492,0
SA21	44,2	22,3	985,2	1060,8	475,7
SA21A	106,8	23,3	2490,9	2563,2	484,4
SA22	102,3	21,4	2187,9	2455,2	471,6
SA23	71,0	21,1	1497,9	1704,0	479,5
SA24	73,9	23,0	1702,1	1773,6	480,0
SA25	73,9	23,1	1709,2	1773,6	484,7
SAGU2	2,2	12,2	26,8	52,8	536,0
SAGU5	4,7	12,2	57,5	112,8	461,7
SAGU6	9,3	11,2	103,8	223,2	492,8
SAVM1	90,8	24,0(****)	2179,2	2179,2	455,7

* Valor utilizado na calibração do modelo matemático na situação 'com bombeamento'

** Medidas de maio/96

*** Nível dinâmico de janeiro/1997

**** Poço não monitorado - informação verbal

Os valores de escoamento básico não puderam ser utilizados para o córrego Divisa durante a calibração do modelo na situação 'com bombeamento' pois os dados existentes são do período de 1970 a 1975, sendo que, vários poços instalaram-se nesta bacia após esta época, podendo alterar o escoamento básico atual. Assim, para este córrego, o valor do escoamento básico foi utilizado na fase de calibração apenas para a simulação do modelo no cenário 'sem bombeamento'. Para o córrego Caçapava Velha, utilizou-se a média do escoamento básico entre 1958 a 1995, para a verificação do modelo simulado com as vazões reais, pois nesta bacia foram cadastrados apenas 3 poços, explorando menos de 300 m³/d.

Para o modelo na situação 'com bombeamento', considerando a vazão imaginária de bombeamento durante 24 horas, este valor do escoamento básico foi avaliado, mas aceitou-se um valor superior a 10%, uma vez que o volume bombeado pelos poços em todo o município foi muito superior ao valor real. Na situação considerando a vazão real, o total bombeado foi de 18.781 m³/d, enquanto que na situação 'com bombeamento' considerando um período de 24 horas de funcionamento dos poços, o total foi de 25.847 m³/d.

7.7. Calibração do modelo matemático

Como foi dito anteriormente, a calibração do modelo matemático deu-se em duas situações: a primeira considerando o sistema hidrogeológico natural, sem interferência antrópica, que foi denominada de situação 'sem bombeamento'; e uma segunda etapa de calibração considerando os poços funcionando, denominada de situação 'com bombeamento'.

O processo de calibração do modelo consistiu em variar os parâmetros, principalmente de condutividade hidráulica e recarga, de forma a obter um valor aceitável entre a diferença do nível da água calculado pelo modelo e o observado no campo. A variação da condutância dos drenos e do rio mostrou pequena influência, inferior a 2%, nos valores de escoamento calculados nas bacias dos córregos Caçapava Velha e Divisa, o que levou o processo de calibração a concentrar a atenção nos parâmetros de condutividade hidráulica e recarga do modelo.

Para a calibração, adotou-se a porcentagem (%) do resíduo ($\% \text{resíduo} = \text{RMS}/\Delta H$) como parâmetro de avaliação, isto é, o resíduo proporcional entre as diferenças das cargas hidráulicas calculadas e observadas em relação à variação total da carga hidráulica no sistema. Dessa forma, procurou-se chegar a um valor próximo a 10%. Este valor não foi atingido pois os dados de monitoramento do nível da água são irregulares, medidos no próprio poço de produção, dificultando a calibração. Mesmo assim, atingiu-se valores próximos a 10% nas duas situações consideradas ('sem bombeamento' e 'com bombeamento').

A calibração do modelo matemático na situação 'sem bombeamento' atingiu valores menores para o 'resíduo médio' (ME), o 'resíduo da média absoluta' (MAE) e desvio padrão (RMS) em relação à situação 'com bombeamento', entretanto a % resíduo mostrou-se próxima nas duas calibrações como mostra a Tabela 7.6. Na situação 'com bombeamento', a variação entre a maior e menor carga hidráulica no sistema modelado é maior que na situação 'sem bombeamento' devido ao rebaixamento provocado pelo funcionamento dos poços. Assim, apesar do resíduo médio (ME) apresentar um valor mais elevado, em relação à variação de carga hidráulica no sistema, ambas as situações apresentam a mesma proporção de resíduo.

Tabela 7.6 - Resíduos calculados entre as cargas hidráulicas observadas e determinadas pelo modelo matemático

Resíduo	Situação 'sem bombeamento'	Situação 'com bombeamento'
ME (m)	0,59	3,83
MAE (m)	6,36	12,10
MRS (m)	7,03	13,46
% resíduo (%)	11,17	11,88

A Figura 7.12 mostra, graficamente, a relação das cargas hidráulicas calculadas pelo modelo, nas duas situações, e a carga hidráulica observada. A reta, com inclinação de 45°, indica a calibração ideal e os valores dos resíduos calculados estão ilustrados na base dos gráficos. Nota-se que, apesar dos pares de dados de carga hidráulica observada e calculada não estarem exatamente sobre a reta, eles acompanham aproximadamente a sua inclinação, o que levou a considerar o modelo como calibrado.

Em relação ao balanço de água total, tanto na situação 'sem bombeamento', como na situação 'com bombeamento', a diferença entre o volume de água que entra e o volume que sai do sistema modelado é praticamente o mesmo (Tabela 7.7), indicando que o programa está calculando corretamente as equações parciais de fluxo do modelo matemático (Anderson & Woessner, 1992).

Tabela 7.7 - Balanço total de água no modelo matemático

(m³/d)	Situação 'sem bombeamento'		Situação 'com bombeamento'	
	Entrada de água	Saída de água	Entrada de água	Saída de água
Armazenamento	0	0	0	0
Carga constante	0	0	0	0
Poços	0	0	0	25.847
Drenos	0	57.327	0	36.865
Recarga	70.850	0	71.380	0
Drenança do rio	0	22718	263	20.490
Carga afastada	10.072	875	12155	597
Total	80.922	80.920	83.798	83799
Entrada - Saída	2,26		-1,02	
Discrepância (%)	0		0	

Para os valores de balanço hídrico das bacias dos córregos Caçapava Velha e Divisa, também adotou-se uma diferença de 10% entre o valor calculado pelo modelo e o valor observado, como um critério de calibração.

Situação 'sem bombeamento'

Situação 'com bombeamento'

Figura 7.12 - Calibração do modelo matemático - Situação 'sem bombeamento' e 'com bombeamento'. Carga hidráulica observada x Carga hidráulica calculada pelo modelo

Esta diferença atingiu o critério de 10% para a situação 'sem bombeamento', indicando uma boa calibração (Tabela 7.8). Para a simulação na situação 'com bombeamento', os valores referentes ao escoamento mostraram-se abaixo do valor observado, pois adotou-se uma vazão mais elevada para os poços do que a vazão real, para fins de comparação das cargas hidráulicas. Assim, a taxa bombeada pelos poços corresponde a um tempo de funcionamento de 24 horas, o que não corresponde a realidade, diminuindo os valores de escoamento calculados (Tabela 7.8). Na situação considerando a vazão real bombeada pelos poços, o escoamento calculado pelo modelo é semelhante ao observado, apresentando um resíduo inferior a 10% para o córrego Caçapava Velha. Para o córrego Divisa, em função da instalação de vários poços, o valor de escoamento observado, existente apenas para o período de 1970 a 1975, apresentou uma grande diferença em relação ao valor calculado pelo modelo, dando um resíduo muito superior a 10%, como mostra a Tabela 7.8.

Tabela 7.8 - Comparação entre os valores de escoamento básico calculados pelo modelo matemático e obtidos dos dados fluviométricos

	Obtido dos dados fluviométricos (m ³ /d)	'sem bombeamento'		'com bombeamento' considerando vazão de 24h de funcionamento		considerando vazão real dos poços	
		(m ³ /d)	% erro	(m ³ /d)	% erro	(m ³ /d)	% erro
Córrego Caçapava Velha	7.193	7.905	9,9	5.960	17,1	6.683	7,1
Córrego Divisa	17.147	16.488	3,8	12.064	29,6	13.725	20,0

7.8. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi desenvolvida para avaliar os parâmetros que mais afetam as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo matemático. Para tanto, variou-se os valores das condutividades hidráulicas das unidades, as taxas de recarga e os valores de condutância das condições de contorno 'rio' e 'dreno'. Segundo Anderson & Woessner (1992), a análise de sensibilidade é feita, tipicamente, variando-se um parâmetro de cada vez para verificar seu reflexo nos resíduos calculados.

A análise de sensibilidade foi efetuada para ambas situações consideradas, 'sem bombeamento' e 'com bombeamento'. Observou-se que as condutâncias do 'rio' e dos 'drenos' não apresentam grande influência no modelo matemático, sendo que os resíduos, representados pela diferença entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas pelo modelo, mostraram pequenas diferenças em relação ao valor calibrado, como mostra a Tabela 7.9. A variação das condutâncias afetam mais os escoamentos básicos calculados para os córregos

Divisa e Caçapava Velha, entretanto, não resultam em valores muito diferentes que os valores obtidos no modelo calibrado. As taxas de recarga tem uma influência muito maior tanto nas cargas hidráulicas calculadas pelo modelo como nos valores de escoamento básico. A diminuição da taxa de recarga em 50% causa uma diminuição de quase 3 vezes no escoamento básico do córrego Caçapava Velha.

A variação nas condutividades hidráulicas também afetam o modelo matemático com maior intensidade que os valores de condutância, como refletem os valores dos resíduos calculados. Na situação 'com bombeamento', a diminuição da condutividade hidráulica eleva a %resíduo para aproximadamente 20% (Tabela 7.9).

Dessa forma, é possível observar que o modelo matemático construído é mais sensível em relação aos valores de condutividade hidráulica e recarga do aquífero, sendo necessário um levantamento mais preciso desses parâmetros. É necessário também, mais dados confiáveis de subsuperfície para uma melhor definição espacial das unidades hidráulicas. Os valores de condutância do 'rio' e dos 'drenos' apresentam pouca influência no sistema modelado, o que mostra que sua estimativa com base bibliográfica não induzirá grandes erros no modelo matemático.

Tabela 7.9 - Análise de sensibilidade do modelo matemático construído.

Situação	Parâmetro	Variação	ME (m)	AMR (m)	MRS (m)	%	Escoamento básico	
							Divisa	Caç. Velha
'com bombeamento'	Condutividade Hidráulica (K)	1,5 K	18,99	20,44	22,28	19,66	11.457	4.678
		0,5 K	Simulação não convergiu					
	Recarga (R)	1,5 R	11,02	14,69	16,93	14,94	20.810	11.255
		0,5 R	-13,94	17,01	20,82	20,67	4.371	1.311
	Condutância do 'rio' (C_{rio})	1,5 C_{rio}	3,82	12,10	13,46	11,87	12.063	5.959
		0,5 C_{rio}	3,83	12,10	13,46	11,88	12.066	5.962
	Condutância do 'dreno' (C_{dreno})	1,5 C_{dreno}	3,82	12,10	13,45	11,87	12.064	5.958
		0,5 C_{dreno}	3,84	12,10	13,47	11,88	12.063	5.966
'sem bombeamento'	Condutividade Hidráulica (K)	1,5 K	-1,22	6,46	7,41	11,77	16.092	6.286
		0,5 K	5,21	7,13	8,54	13,58	16.645	8.984
	Recarga (R)	1,5 R	3,01	6,49	7,45	11,85	24.793	13.051
		0,5 R	-2,29	6,63	7,90	12,56	8.111	2.494
	Condutância do 'rio' (C_{rio})	1,5 C_{rio}	0,59	6,36	7,03	11,17	16.486	7.900
		0,5 C_{rio}	0,60	6,36	7,03	11,17	16.494	7.921
	Condutância do 'dreno' (C_{dreno})	1,5 C_{dreno}	0,60	6,35	7,02	11,16	16.492	7.912
		0,5 C_{dreno}	0,66	6,37	7,04	11,19	16.476	7.888

8. Avaliação dos resultados do modelo matemático

8.1. Avaliação do fluxo da água subterrânea calculado pelo modelo matemático

Com o modelo matemático calibrado, simulou-se a situação do sistema hidrogeológico considerando a vazão real dos poços para a avaliação do fluxo da água subterrânea, de forma a comparar com a simulação na situação 'sem bombeamento'.

O modelo matemático calibrado mostrou que a superfície potenciométrica acompanha a superfície do terreno, quando considera-se a inexistência de perturbação antrópica no meio, onde a principal direção de fluxo é em sentido ao rio Paraíba. As curvas equipotenciais da primeira camada do modelo acompanham a morfologia do terreno (Figura 8.1), mostrando que as drenagens atuam como áreas de descarga para o fluxo da água subterrânea, com comportamento semelhante ao mapa potenciométrico interpretado a partir dos dados de poços.

Nesta situação 'sem bombeamento', a superfície potenciométrica na segunda camada mostra ainda, com menor intensidade, a influência das drenagens secundárias como área de descarga local, principalmente nas drenagens localizadas na porção sudoeste do município.

As curvas potenciométricas da terceira camada do modelo, representando o Embasamento Cristalino, apresentam menor influência das drenagens secundárias, indicando contudo, o rio Paraíba como principal área de descarga (Figura 8.1).

A simulação do sistema hidrogeológico considerando os poços bombeando a vazão real mostrou a influência dos poços na superfície potenciométrica, com rebaixamentos principalmente na porção ao sul da zona urbana, onde concentram-se os poços de abastecimento. Entretanto, o rio Paraíba continua a atuar como principal área de descarga do sistema de fluxo da água subterrânea, podendo ocorrer, localmente, a contribuição do rio para o aquífero. Para avaliar a influência do rio, utilizou-se a técnica de caminhamento de partículas, detalhada mais adiante.

As drenagens secundárias atuam também como áreas de descarga local, tanto para a primeira como para a segunda camada do modelo, como mostra a configuração das curvas equipotenciais da Figura 8.2. Nas regiões de Guamirim e Caçapava Velha não é sentido o reflexo do bombeamento dos poços pois a vazão explorada é pequena. A influência das drenagens secundárias, como visualizado na situação 'sem bombeamento', é bem menor na terceira camada do modelo, sendo que a principal área de descarga é o rio Paraíba (Figura 8.2).

8.2. Zonas de Contribuição

No programa MODPATH, as partículas foram colocadas ao redor dos poços de abastecimento na Camada 2 do modelo, onde encontram-se os filtros, pois, esta é a camada

Mapa potenciométrico da Camada 1 calculado pelo modelo matemático

Mapa potenciométrico da Camada 3 calculado pelo modelo matemático

Mapa potenciométrico da Camada 2 calculado pelo modelo matemático

LEGENDA

- 600 — linha equipotencial
- células inativas
- drenagem
- ruas e estradas
- área urbanizada

Escala

0 3000 6000 9000 12000 m

Figura 8.1 - Mapa potenciométrico calculado pelo modelo matemático na situação 'sem bombeamento'

Mapa potenciométrico da Camada 1 calculado pelo modelo matemático

Mapa potenciométrico da Camada 3 calculado pelo modelo matemático

Mapa potenciométrico da Camada 2 calculado pelo modelo matemático

LEGENDA

- 600 — linha equipotencial
- células inativas
- células secas para o modelo
- ★ poço em funcionamento
- ★ poço desativado
- drenagem
- ruas e estradas
- área urbanizada

Escala

Figura 8.2 - Mapa potenciométrico calculado pelo modelo matemático considerando a vazão real dos poços em funcionamento em maio/1996

mais produtiva. Nos poços SAGU5 e SAGU6, localizados na porção sudoeste do município, no bairro de Guamirim, as partículas foram colocadas na terceira camada pois são poços mistos, explorando também o embasamento cristalino. As partículas também foram colocadas na Camada 1, pois, como o modelo foi assumido como um aquífero livre a localmente confinado, esta camada, apesar de não ser atravessada pelos filtros, também contribui para o fornecimento de água para os poços.

Na simulação do caminhamento de partículas, o programa calcula a trajetória da partícula reversa até esta atingir uma fronteira e sair da área modelada. Esta simulação permitiu visualizar a área de captura total dos poços de abastecimento, como mostra a Figura 8.3. Como se pode observar, a área de recarga dos poços, denominada de Zona de Contribuição (ZC), ocupa uma extensa área na porção central do modelo, devido aos poços de grande vazão localizados na zona urbana do município. Os poços nos bairros isolados, de menor produtividade, apresentam áreas de captura menores e mais estreitas. Esta Figura 8.3 mostra a zona de contribuição total, considerando as linhas de trajetórias das partículas colocadas nas duas camadas do modelo.

Nota-se que a zona de contribuição formada pelas partículas colocadas na Camada 1 é sempre mais estreita que a zona de contribuição delineada pelas partículas da Camada 2 (com exceção do poço SACV1), pois a maior parte dos filtros está localizada na camada inferior, induzindo um maior volume captado nesta unidade, o que reflete em maiores áreas de captura dos poços. Além disso, a condutividade hidráulica da Camada 2 é maior que da Camada 1, favorecendo esta tendência do poço em captar mais água da camada inferior. A Figura 8.4 ilustra esta relação da área de captura dos poços em relação à vazão bombeada e à transmissividade quando considerado um aquífero homogêneo, isotrópico com superfície potenciométrica inicialmente horizontal.

Em função disso, uma parte das linhas de trajetória forma uma área mais estreita, próxima aos poços, correspondendo às partículas colocadas na Camada 1. Na porção inicial da zona de contribuição, mais a montante dos poços, nota-se um maior número de linhas de trajetórias e também ocupando uma área mais larga, correspondendo as partículas colocadas na Camada 2, que se infiltram através da Camada 1 antes de caminhar pela camada inferior. A Figura 8.5, mostrando os poços SA18 e SA19 em detalhe, ilustra melhor esta diferença entre as zonas de contribuição considerando separadamente as Camadas 1 e 2.

De forma geral, a área formada pelas linhas de trajetória das partículas colocadas na Camada 2 englobam as linhas de trajetória das partículas da Camada 1 para todos os poços, como mostram os exemplos das Figuras 8.6 e 8.7. A exceção encontra-se nos poços de Caçapava Velha (SACV2, SACV3) e de Vila Mariana (SAVM1), onde nota-se a influência da diferença de direção de fluxo da água subterrânea no caminhamento das partículas. Este fato é fortemente sentido no poço SAVM1 (Figura 8.8), onde a zona de contribuição da primeira camada tem direção NW/SE, formando, entretanto, uma zona de contribuição pequena. A zona de contribuição formada pelas partículas colocadas na Camada 2 apresenta uma área maior, com direção aproximadamente N/S, bem diferente da área formada pelas partículas da Camada 1. Este fato pode significar que a camada inferior está sofrendo maior influência do fluxo regional da água subterrânea, sendo pouco influenciado pelas feições hidrológicas superficiais como as drenagens. Entretanto, por outro lado, a zona de contribuição do poço SAVM1 aproxima-se do limite do modelo, sofrendo forte influência da condição de contorno de carga genérica, podendo-se ampliar a área modelada para certificar a direção das linhas de trajetórias das partículas colocadas na Camada 2.

Nos poços de Caçapava Velha (Figura 8.9), a diferença das áreas de captura não é tão marcante como no poço SAVM1, entretanto, nota-se a influência da drenagem próxima na zona de contribuição formada pelas partículas da Camada 1, desviando ligeiramente a direção das linhas de trajetória. Na Camada 2, as drenagens não influenciam no formato da zona de contribuição. O poço SACV1 possui uma zona de contribuição maior na Camada 1 pois, a maior parte dos filtros encontra-se nesta camada, portanto esta maior captação de água reflete em uma área de captura do poço mais extensa. Este fato mostra os reflexos de um meio heterogêneo, permitindo uma melhor definição da zona de contribuição, que não seria possível se fosse utilizado um modelo matemático bidimensional.

Em Guamirim, os poços são mistos, isto é, exploram conjuntamente os aquíferos sedimentar e cristalino, e por este motivo, foram colocadas também partículas na terceira camada para avaliar a sua influência na zona de contribuição. As linhas de trajetórias formadas pelas partículas colocadas na Camada 3 formam uma zona de contribuição mais larga que aquela formada pelas partículas da Camada 2 (Figura 8.10), entretanto, a velocidade da água subterrânea é bem menor devido à baixa condutividade hidráulica do embasamento cristalino.

LEGENDA

- equipotenciais
- drenagem
- linhas de trajetórias das partículas
- ◆◆ poços de bombeamento

Figura 8.5 - Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SA18 e SA19 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático

Figura 8.6 - Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas no poço SA13 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático

Figura 8.7 - Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SA21A e SA22 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático

Figura 8.8 - Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas no poço SAVM1 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático

Figura 8.9 - Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SACV1, SACV2 e SACV3 na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático

Zona de Contribuição total dos poços SAGU2, SAGU5 e SAGU6

Linhas de trajetória na Camada 1

Linhas de trajetória na Camada 2

Linhas de trajetória na Camada 3

LEGENDA

- equipotenciais
- drenagem
- linhas de trajetórias
- ♦♦ poços de bombeamento

Figura 8.10 - Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SAGU2, SAGU5 e SAGU6 nas Camadas 1, 2 e 3 do modelo matemático

Ainda, o Aquífero Cristalino é mais protegido pois tem todo um pacote sedimentar acima, sendo que a região abrangida pelas zonas de contribuição dos poços é pouco habitada, e segue em direção à serra, onde há predominância de mata natural. O poço SAGU2 tem partículas apenas nas Camadas 1 e 2 pois não explora o Aquífero Cristalino.

Devido a proximidade dos poços e da grande vazão bombeada, há uma interferência entre as Zonas de Contribuição, como mostra a Figura 8.3, na porção ao sul da área urbana. Nos poços SA24 e SA25, por exemplo, as zonas de contribuição interferem entre si, onde a área de recarga do poço SA24 se expande devido ao bombeamento do poço SA25 (Figura 8.11). Se não existisse o poço SA25, provavelmente a área de captura do poço SA24 seria mais estreita, entretanto há um desvio das linhas de fluxo em função da influência de outros poços. Da mesma forma, devido à influência do poço SA21A, a zona de captura do poço SA22 é mais larga, rodeando a zona de contribuição do SA21A (Figura 8.7).

Na zona de contribuição dos poços SA20 e SA21 percebe-se a influência do rio Paraíba, não muito expressiva em relação à área de captura total dos poços, mostrando a drenança da água do rio para o aquífero (Figura 8.12). Cada intervalo da seta nesta Figura 8.12 indica um intervalo de tempo de trânsito de 100 anos, o que significa que a influência do rio será sentida apenas após 700 anos, muito superior à vida útil do poço. Entretanto, é necessário observar esta influência e evitar a perfuração de novos poços de grande vazão em áreas próximas ao rio Paraíba, pois sabe-se que a água deste rio não apresenta boa qualidade.

8.3.Zonas de Transporte

As Zonas de Contribuição dos poços apresentam áreas muito extensas, inviáveis de serem totalmente protegidas. Além disso, uma partícula no extremo mais afastado de uma zona de contribuição levará milhares de anos para atingir o poço. Assim, deve-se pensar em áreas menores dentro da zona de contribuição, que deverão ter medidas preventivas contra a poluição dos aquíferos. Dessa forma, aplica-se a avaliação dos tempos de trânsito das partículas dentro da zona de contribuição para fins de definir a Zona de Transporte (ZT). Neste estudo foram avaliadas as áreas definidas para um tempo de trânsito de 10 anos e 50 anos de forma a analisar o tamanho da área e a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional para a definição de áreas de proteção.

Como visto anteriormente, as zonas de contribuição considerando as partículas colocadas na Camada 1 e na Camada 2 do modelo forneceram áreas diferentes, em geral, maiores quando formadas pelas linhas de trajetória da Camada 2, mostrando a importância de se considerar as heterogeneidades do meio físico e ressaltando a vantagem da utilização da modelação matemática tridimensional.

LEGENDA

- equipotenciais
- drenagem
- linhas de trajetórias das partículas
- ◆◆ poços de bombeamento
- Zona de Contribuição

Figura 8.11 - Interferência na Zona de Contribuição de poços próximos (SA24 e SA25)

Figura 8.12 - Ilustração esquemática das linhas de trajetórias das partículas colocadas nos poços SA20 e SA21 nas Camadas 1 e 2 do modelo matemático

Em relação à proteção do aquífero, a zona de contribuição formada pelas partículas colocadas na Camada 1 indica a área prioritária a ser protegida pois representa a área aflorante do aquífero superior que contribui para o poço. O aquífero inferior, representado pela segunda camada do modelo, possui uma proteção maior, pois é sotoposto ao aquífero superior, que possui condutividade hidráulica menor em relação à segunda camada. Entretanto, tendo uma visão mais conservadora, o aquífero superior, apesar de possuir uma menor condutividade hidráulica, ainda é muito poroso, permitindo a percolação de contaminantes, colocando em risco a qualidade do aquífero inferior. Além disso, sabe-se que a espessura desta primeira camada, no sistema real, é variável, podendo eventualmente ser inferior a 10 metros, colocando em risco o aquífero inferior, pois algumas obras como aterros sanitários, lagoas ou tanques frequentemente implicam em escavações, diminuindo a espessura da primeira camada menos condutiva.

Dessa forma, com esta visão conservadora, considerou-se, conjuntamente, as áreas formadas pelas linhas de trajetória das partículas colocadas nas Camadas 1 e 2 como a Zona de Contribuição dos poços (Figura 8.3).

A maior parte das zonas de transporte definidas pelas partículas colocadas na Camada 1 estão contidas nas zonas de transporte definidas na Camada 2 como mostra a Zona de Transporte de 50 anos ilustrada na Figura 8.13. O poço SA25 não possui zona de transporte para a Camada 1 pois as células desta camada estão secas, isto é, o nível da água é inferior à base da Camada 1 do modelo.

Mesmo o poço SAVM1, que apresentava zonas de contribuição diferentes considerando as partículas colocadas na Camada 1 e na Camada 2, mostra uma superposição das zonas de transporte para um tempo de trânsito de 50 anos (Figura 8.13). No poço SACV1, em Caçapava Velha, a zona de transporte definida pelas partículas colocadas na Camada 1 é mais extensa que da Camada 2, sendo adotada como Zona de Transporte total, a área da Camada 1 (Figura 8.14). No poço SACV2, a zona de transporte da Camada 1 não engloba totalmente a zona de transporte formada pelas partículas colocadas na Camada 2, sendo adotada a união das áreas como a Zona de Transporte total.

Nos poços do bairro Guamirim, as Zonas de Transporte totais consideraram as áreas definidas nas Camadas 1 e 2 do modelo. A Camada 3 não foi considerada pois o pacote sedimentar acima do embasamento cristalino é espesso e a condutividade hidráulica desta camada é muito baixa, definindo zonas de transporte muito pequenas, mesmo considerando tempos de trânsito de 10 e 50 anos. No poço SAGU2, para a Zona de Transporte total de 50 anos, adotou-se a soma das zonas de transporte formadas pelas partículas colocadas nas camadas 1 e 2. Para o poço SAGU5 as zonas de transporte da Camada 1 não puderam ser definidas pois eram muito pequenas em relação à grade do modelo (Figura 8.15).

Figura 8.14 - Zonas de Transporte de 50 anos para os poços em Caçapava Velha formadas pelas partículas colocadas na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático.

Nos poços de grande vazão, superior a 1000 m³/d, a zona de transporte formada pelas partículas colocadas na Camada 1 é muito inferior àquela definida pelas linhas de trajetória da Camada 2 (Tabela 8.1), sendo em geral, inferior a 7% do tamanho da Zona de Transporte total, pois as seções filtrantes dos poços estão localizadas em sua maior parte, no aquífero inferior. Dessa forma, adotou-se a zona de transporte com maior área ou a combinação das zonas de transporte formadas pelas partículas colocadas nas camadas 1 e 2 como a Zona de Transporte total, considerando o tempo de trânsito de 10 e 50 anos, como mostra a Figura 8.16.

Tabela 8.1 - Área total (m²) das Zonas de Transporte definidas para cada poço de abastecimento.

Poço	Zona de Transporte - 10 anos			Zona de Transporte - 50 anos		
	Camada 1	Camada 2	Total	Camada 1	Camada 2	Total
SA3	3.851	8.904	8.904	5.502	27.077	27.077
SA13	3.922	135.380	135.380	12.680	590.105	590.105
SA18	2.820	81.831	81.831	5.996	356.421	356.421
SA19	3.117	138.330	138.330	7.186	622.445	622.445
SA20	2.866	41.089	41.089	9.401	166.037	166.037
SA21	10.113	251.250	251.250	100.706	956.487	956.487
SA21A	4.235	239.919	239.919	13.974	1.042.055	1.042.055
SA22	5.957	287.809	287.809	41.718	1.135.486	1.135.486
SA23	3.855	187.230	187.230	19.128	765.386	765.386
SA24	4.381	165.739	165.739	20.658	659.731	659.731
SA25		125.441	125.441		578.415	578.415
SAVM1	2.286	13.167	13.167	3.774	51.313	51.313
SACV1	18.700	2.663	18.700	70.277	5.494	70.277
SACV2	7.701	6.533	7.996	28.689	22.314	29.149
SACV3	3.336	15.517	15.517	8.218	65.586	65.586
SAGU2	7.541	10.766	10.944	23.955	42.668	44.365
SAGU5		9.365	9.365		36.272	36.272
SAGU6	2.617	36.824	36.824	7.028	145.194	145.194

A distância máxima entre o poço e o limite da Zona de Transporte para um tempo de trânsito de 10 anos, nos poços de grande vazão, é inferior a 400 metros, permitindo a definição de estratégias de proteção factíveis de serem implantadas uma vez que esta área não é considerada extremamente grande. Nos demais poços, esta distância até o limite da Zona de Transporte é ainda menor, sendo inferior a 130 metros.

As Zonas de Transporte para 50 anos apresentam grandes áreas, onde a distância máxima entre o poço e o limite da área delimitada é cerca de 1 km, sendo que estratégias de proteção devem ser diferenciadas para cada perímetro de proteção.

Dependendo dos recursos disponíveis e do perfil do uso e ocupação do solo do município pode-se diminuir a área a ser protegida, avaliando-se zonas de transporte com tempo de trânsito menores, como por exemplo, 5 anos.

Na legislação estadual paulista, os critérios para definição das áreas de proteção são claros apenas para os Perímetros Imediato de Proteção Sanitária e de Alerta e para a Área de Proteção Máxima, que consideram como critérios para sua definição, respectivamente, 10 metros, 50 dias de tempo de trânsito e as fronteiras de fluxo. Na categoria da Área de Restrição e Controle, o critério para a delimitação dos perímetros de proteção é mais flexível, permitindo que sejam adotados critérios mais adequados às características do meio físico e ao perfil sócio-econômico do município.

Neste modelo matemático, a área correspondente a 50 dias de tempo de transporte não foi avaliada pois não supera um raio de 25 metros ao redor do poço, que é menor que a discretização da grade utilizada na modelação. Mesmo para um tempo de transporte de 1 ano, a área total ainda é pequena, necessitando-se de uma discretização maior da grade do modelo em cada poço para uma boa definição da zona de transporte. Hirata (1994) aplicou a modelação matemática bidimensional em São José dos Campos e obteve áreas de até 240 m² para um tempo de transporte de um ano, o que significa que foi utilizada uma malha discretizada com espaçamento inferior a 5 metros. No presente estudo, dado o tamanho da área modelada, tal refinamento da grade não foi aplicado, entretanto, a partir do modelo matemático obtido, é possível detalhar áreas específicas, definindo um menor espaçamento da malha para a definição de perímetros de proteção considerando tempos de trânsito menores.

8.4. Riscos associados às zonas de transporte

Para avaliar os riscos associados às zonas de transporte totais, foi realizada uma avaliação conjunta com as potenciais fontes de contaminação existentes, considerando os tempos de trânsito de 10 e 50 anos.

As fontes potenciais de contaminação avaliadas foram as indústrias, áreas com tanques de armazenamento de líquidos perigosos e áreas de disposição de resíduos sólidos domésticos.

O município de Caçapava atualmente não opera nenhuma área de disposição de resíduos sólidos, pois todo o lixo doméstico e hospitalar é enviado para o município de São José dos Campos e depositado no aterro sanitário denominado Urban. Segundo informações colhidas na Prefeitura Municipal, no passado, os resíduos domésticos foram depositados em

uma área na zona rural, ao norte do rio Paraíba, a qual funcionou por cerca de 2 a 3 anos e encontra-se desativada a mais de 10 anos. Anterior a este período, não existem registros das áreas de disposição de resíduos.

Das 24 áreas com tanques, 16 delas são postos de serviço, 7 são garagens de empresas de ônibus e da Prefeitura, e apenas uma pertence a uma transportadora de resíduos industriais. Estas áreas localizam-se, em geral, na zona urbana e ao longo da rodovia Presidente Dutra, próximas aos poços de abastecimento público, constituindo um grande risco à qualidade da água subterrânea. Hoje, sabe-se que os postos de serviço são responsáveis por inúmeros casos de contaminação de aquífero na Grande São Paulo, em função de vazamentos não detectados. Assim, estas áreas devem ser avaliadas e monitoradas de forma a proteger a qualidade da água de abastecimento do município.

Felizmente, a maior parte das Zonas de Transporte dos poços da SABESP não englobam fontes de contaminação pois os poços estão localizados, em geral, no limite da área urbana, a montante das principais fontes de contaminação. Nos bairros afastados de Caçapava Velha e Guamirim, não existem indústrias nem postos de serviço, estando, assim, as Zonas de Transporte protegidas contra este tipo de fonte de contaminação. Em Caçapava Velha existe um pequeno cemitério, entretanto não apresenta risco à qualidade da água subterrânea, pois encontra-se em uma porção elevada, onde o nível da água é profundo.

Dos poços próximos à zona urbana, a maior parte deles (SA3, SA18, SA19, SA20, SA21A, SA22, SA25) não possui nenhuma fonte potencial de contaminação, se considerarmos o tempo de trânsito de 10 anos. Entretanto, as Zonas de Transporte de 10 anos dos poços SA13, SA21, SA23 e SA24 englobam áreas de tancagem e uma indústria, que colocam em risco a qualidade da água captada. Como estes poços estão praticamente dentro da zona urbana, a principal fonte de contaminação existente são os postos de serviço (Figura 8.17). O poço SA21, em situação mais crítica, possui em sua Zona de Transporte de 10 anos, dois postos de serviço e uma transportadora de resíduos industriais. Quando analisada a Zona de Transporte para 50 anos de tempo de trânsito (Figura 8.18), mais dois postos de serviço são englobados.

Os poços SA23 e SA24 possuem apenas uma empresa de envasilhamento de derivados de petróleo no limite de sua Zona de Transporte, seja para 10 anos como 50 anos de tempo de trânsito. A Zona de Transporte de 10 anos do poço SA13 engloba somente uma garagem de empresa de ônibus e é a única que engloba uma indústria, fabricante de radiadores. As demais indústrias não constituem uma ameaça à qualidade da água dos poços, mesmo considerando-se um tempo de trânsito máximo de 50 anos. Isto acontece porque as indústrias localizam-se predominantemente ao longo da rodovia Presidente Dutra, longe dos poços de abastecimento. O poço SAVM1, localizado na porção oeste do município, apesar de estar próximo a diversas indústrias, sua Zona de Transporte não indica ameaças a qualidade da água. Entretanto, a

Figura 8.17 - Avaliação do risco de contaminação associado à Zona de Transporte para 10 anos de tempo de trânsito

vazão deste poço não é monitorada, sendo necessária a realização de monitoramento para avaliar o volume real bombeado para uma avaliação mais conclusiva.

Este poço SAVM1, apesar de não possuir nenhuma fonte potencial pontual ameaçando sua qualidade, apresenta um risco de contaminação dentro de sua Zona de Transporte de 50 anos advinda do perigo de acidentes no transporte de produtos perigosos pela ferrovia. Da mesma forma estão ameaçados os poços SA20 e SA21, se considerarmos as Zonas de Transporte de 50 anos com mostra a Figura 8.18.

Outra fonte potencial de risco de contaminação advinda da possibilidade de acidentes com produtos perigosos é a rodovia Presidente Dutra, a qual é englobada na Zona de Transporte do poço SA13, considerando um tempo de trânsito de 10 anos (Figura 8.17). Avaliando-se as Zonas de Transporte de 50 anos, o poço SA23 também está sujeito a este risco (Figura 8.18). Ao se avaliar a rodovia ou a ferrovia, deve-se lembrar que acidentes implicam em derramamentos de produtos perigosos, que podem escoar certa distância antes de infiltrar no aquífero, aumentando o risco de contaminação de outros poços, como o SA18 e SA3.

Segundo informações da SABESP, todo o município possui rede de coleta de esgoto, o qual é tratado ou disposto diretamente nos córregos, não existindo o risco de contaminação das águas subterrâneas por infiltração de efluentes domésticos. Além disso, por ser uma cidade pequena, Caçapava não possui favelas, as quais costumam concentrar grande número de fossas negras. Existem apenas dois pequenos aglomerados na margem do rio Paraíba que formaram-se em função das olarias, mas dada sua extensão, não foram consideradas neste estudo.

O cemitério, existente na zona urbana de Caçapava, também não foi considerado como uma fonte potencial de contaminação pois é totalmente pavimentado e os túmulos são cimentados.

Dessa forma, a principal fonte potencial de contaminação existente no município, que atualmente coloca em risco a qualidade da água subterrânea, são as áreas com tanques de armazenamento de combustíveis e outros líquidos perigosos, principalmente os postos de serviço. As indústrias também devem ser consideradas com cautela no caso de expansão do sistema de captação de água subterrânea.

Cabe lembrar que estas zonas de transporte foram definidas com base nas vazões medidas em maio de 1996 e alterações significativas dos volumes bombeados irão refletir na configuração e extensão destas áreas.

8.5. Medidas preventivas

O modelo matemático constitui, como mostra este estudo, em uma ferramenta útil para a identificação das áreas que apresentam maior risco à qualidade da água subterrânea distribuída para a população. Dessa forma é possível a tomada de medidas preventivas para evitar danos à saúde pública, priorizando as áreas mais críticas, o que leva a otimização de custos. A identificação dessas áreas críticas passa ainda pela decisão de se proteger toda a Zona de Contribuição de uma captação ou parte dela, delimitada através de Zonas de Transporte, considerando tempos de trânsito específicos para cada cenário considerado.

Estas medidas preventivas devem levar em conta a contínua expansão da cidade, o que implica em instalação de atividades futuras, que podem aumentar o risco de contaminação das águas subterrâneas, devendo considerar também as atividades já instaladas.

Em relação à expansão da cidade, pode-se utilizar a metodologia de mapeamento da vulnerabilidade, como desenvolvida no estudo de Hirata (1994) para subsidiar o planejamento urbano e instalação de novas atividades.

Para as atividades já instaladas, podem ser adotadas duas linhas de atuação: o remanejamento das atividades potencialmente contaminantes para fora do Perímetro de Proteção traçado, ou o controle das atividades para detectar e conter qualquer evento contaminador que possa acontecer.

A primeira alternativa é, na maior parte das vezes, economicamente inviável, a não ser que o perímetro de proteção adotado seja pequeno ou exista apenas uma ou outra atividade isolada com alto grau de periculosidade à água subterrânea que justifique o investimento de relocação da atividade.

A alternativa mais viável é controlar as atividades já existentes e monitorar a qualidade da água dentro da zona de captura dos poços, de forma que ações imediatas possam ser tomadas frente a qualquer evento contaminador. Meyer (1990) adota a denominação de "Zona de Manejo" a esta área onde o uso do solo deve ser regulamentado para controlar e eliminar atividades potencialmente contaminantes. Assim, nas áreas a serem protegidas, devem ser definidas as medidas de controle das atividades existentes e as exigências para a instalação de novas atividades que apresentem risco à água subterrânea.

A combinação destas duas alternativas deu origem às diversas categorias de perímetros de proteção adotados em outros países, onde a restrição e controle aumentam em áreas mais próximas à captação.

Um estudo futuro deveria enfocar as atividades que podem ser permitidas e as que devem ser proibidas para cada categoria de área de proteção, considerando o aspecto legal e de desenvolvimento econômico no cenário brasileiro, para subsidiar o processo de planejamento urbano das cidades.

Uma proposta de medida preventiva onde o modelo matemático pode auxiliar é na instalação de poços "sentinelas", isto é, poços de monitoramento colocados estrategicamente na zona de transporte definida, com o objetivo de detectar a ocorrência de contaminação ocasionada por atividades existentes ou por eventuais acidentes.

Não se discute neste trabalho qual o melhor tempo de trânsito a ser adotado para a definição dos perímetros de proteção dos poços. Apenas adotou-se o período de 10 e 50 anos, por considerar que a proteção de toda a Zona de Contribuição é uma tarefa inviável frente ao tamanho da área.

Como exemplo, observou-se o poço SA21, ameaçado pela existência de áreas de armazenamento de combustíveis, tanto para o período de 10 como de 50 anos de tempo de trânsito. Dessa forma, os poços "sentinelas" podem ser colocados a uma certa distância do poço de abastecimento, dentro da área de captura, de forma que permita a tomada de ações de contenção da contaminação antes que esta atinja a captação. Estes poços de monitoramento devem ser multiníveis para minimizar os efeitos de diluição do contaminante durante o processo de amostragem de água, e podem ser colocados na área abrangida pelas linhas de trajetórias de partículas advindas das atividades consideradas potencialmente contaminantes, como mostra a Figura 8.19.

Quando a fonte potencial de contaminação não é bem definida em área, pode-se colocar os poços de monitoramento no limite da Zona de Transporte de forma que contemple a área que apresente algum risco de contaminação da captação. Esta abordagem é utilizada para fontes dispersas de contaminação e também em situações, como no poço SA23, ameaçado por acidentes eventuais com produtos perigosos que podem ocorrer na rodovia Presidente Dutra (Figura 8.19b).

Estes poços de monitoramento podem estar distribuídos na Zona de Transporte definida, como visto anteriormente, ou podem monitorar uma atividade específica. Neste caso, estes poços são colocados ao redor da atividade potencialmente contaminante, sendo, em geral, um a montante da área sob suspeita e três a jusante, para identificação de qualquer evento que leve a contaminação do aquífero por esta atividade. Neste ponto, a modelação matemática auxilia no entendimento do sistema de fluxo da água subterrânea, direcionando a locação destes poços.

Nada impede que estas abordagens sejam utilizadas conjuntamente, com poços distribuídos na Zona de Transporte e também outros locados para monitorar atividades específicas. Novos estudos devem ser conduzidos para a identificação da periodicidade de amostragem e de elementos guias a serem analisados considerando cada atividade potencialmente contaminadora. Além disso, o monitoramento da qualidade da água subterrânea deve ser complementado por atividades conduzidas em conjunto com o órgão ambiental responsável, que pode ajudar na tomada de medidas preventivas, como por

a) Poços sentinelas para a Zona de Transporte do poço SA21

b) Poços sentinelas para a Zona de Transporte do poço SA23

Figura 8.19 - Utilização de poços "sentinelas" para monitorar a qualidade da água subterrânea nas zonas de transporte

exemplo, a exigência de execução de testes de estanqueidade com maior frequência nos postos de serviço instalados dentro da Zona de Contribuição dos poços de abastecimento.

Assim, a modelação matemática, por considerar as heterogeneidades do meio, é uma metodologia mais adequada e comprovadamente mais eficiente que outros métodos analíticos de definição da Zona de Contribuição, como mostraram Morrissey (1989), Delin & Almendiger (1993) e Hirata (1994). Além disso permite considerar as feições hidrológicas que afetam o fluxo da água subterrânea, assim como a interferência antrópica no meio. Uma vez construído o modelo matemático, é necessário apenas uma atualização ou detalhamento a medida que novas informações sejam adquiridas, facilitando a avaliação do sistema hidrogeológico e o gerenciamento do recurso hídrico subterrâneo. Dessa forma, a modelação matemática é uma ferramenta indispensável para a otimização de esforços e custos no monitoramento e manutenção da qualidade da água subterrânea, devendo ser utilizada a modelação tridimensional sempre que possível. Entretanto, em casos onde os dados não são suficientes, deve-se utilizar primeiramente um modelo bidimensional, que, como avaliado por Hirata (1994), é mais prático que os métodos analíticos e gráficos. A medida que novos dados forem gerados, pode-se passar para um modelo tridimensional.

8.6.O modelo matemático como ferramenta do gerenciamento

Todo o processo de modelação matemática tridimensional apresentada neste estudo procurou mostrar sua eficiência como ferramenta para a preservação da qualidade da água subterrânea.

Apenas como exemplo do alcance que o modelo matemático traz para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, é ilustrada a simulação de dois cenários de bombeamento dos poços.

O primeiro é considerando o funcionamento dos poços novos, que neste estudo foram considerados como desativados. Os poços SA26, SA27 e SAGU7 foram assumidos como ativos, bombeando, respectivamente, 1440 m³/d, 900 m³/d e 100 m³/d. O mapa potenciométrico gerado apresentou um alargamento do cone de depressão já existente, sendo que a curva equipotencial de 540 metros avança em direção ao poço SA26, e há uma expansão da curva de 530 metros, como mostra a Figura 8.20.

Outro cenário considerado foi a colocação de dois poços imaginários (IM01 e IM02), bombeando 2000 m³/d cada um, localizados ao sul dos poços SA21A e SA19. Com isto, o cone de depressão aumenta para o sudeste da área como mostra a linha equipotencial de 540 metros que avança em direção aos poços SA18 e SA19. (Figura 8.21). Este tipo de simulação permite identificar áreas estratégicas para a exploração futura da água subterrânea, adotando medidas para sua preservação.

Mapa potenciométrico da Camada 1 do modelo matemático considerando a situação de bombeamento de maio/1996

Mapa potenciométrico da Camada 1 do modelo matemático considerando a o funcionamento dos poços SA26, SA27 e SAGU7

Figura 8.20 - A superfície potenciométrica sob a influência do funcionamento dos poços SA26, SA27 e SAGU7

Mapa potenciométrico da Camada 1 do modelo matemático considerando a situação de bombeamento de maio/1996

Mapa potenciométrico da Camada 1 do modelo matemático considerando a colocação de dois poços imaginários (IM01 e IM02)

Figura 8.21 - Influência de dois novos poços de bombeamento na superfície potenciométrica

Estas simulações de cenários futuros é a grande vantagem da modelação matemática frente às outras metodologias de avaliação, além de permitir uma atualização constante com os novos dados levantados. A modelação matemática constitui também uma ferramenta muito útil para avaliar o comportamento da água subterrânea frente a novas alterações antrópicas, direcionando também o levantamento de novos dados. Por exemplo, caso sejam instalados poços de monitoramento para observar a evolução do nível da água no aquífero, estes devem ser localizados na área de influência dos poços de bombeamento, visualizada através das curvas equipotenciais traçadas pelo modelo matemático.

Dessa forma, a modelação matemática pode ser utilizada também para fins de gerenciamento dos poços assim como para a proteção da qualidade da água subterrânea.

9.Limitações

Como toda técnica aplicada para a definição da Zona de Contribuição, seja gráfica, analítica ou numérica, há limitações intrínsecas da metodologia e também, da ferramenta utilizada. Além disso existem limitações advindas da qualidade e distribuição espacial dos dados utilizados no estudo, que devem ser considerados quando analisar os resultados fornecidos pelo modelo matemático desenvolvido.

9.1.Limitações do programa MODFLOW

A utilização do programa MODFLOW mostrou-se relativamente fácil por trabalhar na forma de módulos, permitindo utilizar apenas aqueles de interesse ao sistema modelado. Por outro lado, todos os parâmetros de condição de contorno e poços são referenciados segundo a grade do modelo, por linha, coluna e camada. Dessa forma, a introdução de mais uma linha na grade do modelo, após a entrada inicial de dados, implica em recalcular a localização de cada condição de contorno ou poço novamente. Uma forma de minimizar este contratempo é a utilização de pré-processadores gráficos desenvolvidos para o MODFLOW, como o Visual MODFLOW, utilizado neste trabalho.

Por ser um programa de diferenças finitas, o refinamento da grade nos pontos de interesse, como os poços de extração, promove o refinamento em porções desnecessárias, aumentando o número de células do modelo e também o tempo de processamento. Em função desta característica, algumas vezes é necessário diminuir o número de camadas do modelo, isto é, diminuir a discretização no sentido vertical, para viabilizar o processamento dos dados no microcomputador disponível.

Outra dificuldade sentida no processo da modelação matemática utilizando este programa foi em relação aos poços de bombeamento. O fato de assumir que o filtro atravessa toda a camada do modelo, sem considerar que possa ser parcialmente penetrante, leva, às

vezes, a assumir uma vazão bombeada em cada camada maior ou menor que a real. Este fato pode prejudicar também o caminhar de partículas, cujas velocidades são calculadas para cada célula. Em modelos matemáticos onde o refinamento da grade na vertical é restritivo devido ao número de células e ao tempo de processamento, esta característica do programa pode ser agravada.

Neste modelo matemático desenvolvido, a discretização da malha no sentido vertical não foi detalhada, assumindo-se somente três camadas para otimizar o tempo de processamento. No início do estudo, tentou-se um refinamento extremado, utilizando-se nove camadas, entretanto foi inviável, pois, em um computador Pentium, o processamento demorava cerca de 3 horas para cada simulação. Além disso, para o refinamento em 9 camadas eram feitas várias suposições que aumentavam as incertezas do modelo. Assim, optou-se por um sistema conceitual mais simples, permitindo uma melhor adequação aos dados existentes. Agora, a partir deste modelo desenvolvido, a medida que novos dados sejam obtidos, pode-se fazer um detalhamento de toda ou partes da área modelada.

Uma dificuldade sentida nas etapas de entrada de dados foi a colocação da drenança da condição de contorno do rio, do dreno e da carga genérica. Como a condutância é proporcional à área da célula atravessada, é necessário o seu cálculo para cada intervalo de espaçamento da grade. A tarefa seria facilitada se o pré-processador pudesse calcular a condutância para cada célula, considerando seu tamanho de área e a condutividade hidráulica indicada pelo usuário, para cada trecho do modelo.

Apesar das dificuldades encontradas, o programa MODFLOW é um aplicativo fácil de ser utilizado, permitindo grande flexibilidade e recursos para a representação das heterogeneidades do sistema físico real. Entretanto, cabe lembrar que a qualidade do modelo matemático construído não depende apenas de um eficiente programa, mas também da qualidade dos dados utilizados e da sua interpretação para o entendimento do sistema hidrogeológico real.

9.2.Limitações da modelação matemática

O processo da modelação matemática implica, por si só, em limitações inerentes à impossibilidade de uma representação fiel do sistema físico real.

Durante o levantamento dos dados é inviável o detalhamento extremo de uma área para a caracterização de todas as heterogeneidades do meio. Dessa forma, com o universo de dados existentes, é necessária a realização de generalizações do sistema real para simplificar a ponto de permitir a sua representação na forma matemática. Um exemplo é a condutividade hidráulica que, neste modelo, foi assumida como homogênea para cada unidade hidráulica definida. Seria economicamente e também tecnicamente inviável a determinação deste

parâmetro para cada metro quadrado da área estudada. Da mesma forma, as unidades geológicas são formadas por intercalações lenticulares, às vezes decimétricas, de areia e argila, impossíveis de serem representadas em um modelo matemático regional, como neste caso. Assim, aplicam-se as generalizações e simplificações do sistema físico real para viabilizar a simulação através de um modelo matemático.

Outra limitação inerente ao processo de modelação matemática é a estimativa. Alguns parâmetros podem ser obtidos através de testes de campo ou laboratório mas podem implicar em alto custo e demanda de tempo, ou outra dificuldade. Nestes casos, utiliza-se a estimativa, com base em dados bibliográficos ou de experiências em outros estudos semelhantes, para definir o valor de um parâmetro. Um exemplo é a porosidade efetiva para fluxo (n_{ef}), cujo parâmetro é, na maioria das vezes, estimado em dados bibliográficos, pois sua determinação depende de uma coluna indeformada de solo e a utilização de traçadores. Entretanto, deve-se ponderar sobre a necessidade de um experimento para a determinação deste parâmetro para cada unidade hidráulica, considerando-se a escala de estudo do modelo matemático, as demais generalizações e simplificações adotadas, tempo e recurso disponíveis. Neste estudo, considerando que o processo de modelação matemática visou avaliar a sua aplicabilidade frente aos dados existentes e considerando que é um modelo regional, com diferentes unidades hidráulicas, optou-se para a estimativa dos parâmetros de armazenamento com base nas informações bibliográficas. Além disso, o modelo foi simulado para o estado estacionário, que não leva em consideração o fator de mudanças no armazenamento do aquífero.

9.3. Limitações do modelo matemático desenvolvido

As generalizações e simplificações aqui assumidas implicam em algumas limitações deste modelo matemático desenvolvido, que devem ser consideradas quando analisados os seus resultados. Além disso, foram utilizados dados existentes, gerados em atividades que não objetivaram a modelação matemática. Assim, por exemplo, os testes de bombeamento cadastrados tiveram o nível d'água monitorados no próprio poço de bombeamento, não permitindo a definição da anisotropia do meio. Dessa forma, foi necessário estimar a relação da condutividade hidráulica para as direções x , y e z em dados bibliográficos e na avaliação da composição litológica das unidades. Assim, assumiu-se que K_x é igual a K_y (isotrópico em relação aos eixos x e y) e que a componente vertical é dez vezes menor que a condutividade hidráulica horizontal, com exceção do Embasamento Cristalino.

Caso existissem poços de observação para os testes de vazão, a interpretação dos dados teria uma maior confiabilidade e menor interferência dos aspectos construtivos do poço de bombeamento.

A falta de poços de observação foi sentida também durante o processo de calibração, pois isto aumentaria a confiabilidade do modelo caso houvessem níveis de água do aquífero medidos sem a interferência do bombeamento nos poços. Além disso, o monitoramento do nível da água em poços de observação, estrategicamente localizados, permitiria uma melhor avaliação da evolução do cone de rebaixamento que se formou ao redor dos poços mais produtivos.

Outra limitação do modelo construído é o refinamento da grade, que não permitiu a definição de zonas de transporte para um tempo de trânsito pequeno, como por exemplo 50 dias definido na legislação estadual, ou mesmo um ano. A menor célula definida no refinamento da grade possui cerca de 25 m x 25 m, não sendo suficiente para a definição de zonas de transporte de curto tempo de trânsito. Hirata (1994), em seu estudo em São José dos Campos, definiu áreas menores que 100 m², para o tempo de trânsito de 50 dias e um ano, o que implica em células menores que 5 m x 5 m, sendo este espaçamento inviável para a escala de trabalho aplicada no modelo matemático do presente estudo.

A definição de zonas de transporte com tempo de trânsito mais curto poderá ser efetuada através de um detalhamento de parte da área, tomando por base o modelo matemático desenvolvido, o que permitirá um maior refinamento da grade, sem aumentar significativamente o número de células. Outra alternativa é a utilização de computadores mais potentes, com maior capacidade de memória, permitindo um maior refinamento total da malha do modelo matemático desenvolvido. No presente caso, foi utilizado um computador Pentium 200 Mhz.

A Zona de Contribuição dos poços traçada por este modelo matemático não considerou a possível variação sazonal da direção de fluxo da água subterrânea causada pela variação da recarga durante o ano. A avaliação da magnitude desta variação sazonal poderia ser medida caso existissem poços de observação destinados ao monitoramento do nível da água do aquífero. Além disso, a mudança na vazão dos poços altera também o formato da Zona de Contribuição.

10. Viabilidade de aplicação da modelagem matemática tridimensional em função da qualidade dos dados existentes

A modelação matemática tridimensional necessita de informações sobre o meio físico, tanto de superfície como de subsuperfície. Os dados utilizados neste estudo foram gerados, em outra época, para outros objetivos que não incluíam a modelação matemática. Entretanto, este trabalho mostra que estas informações, conjuntamente analisadas e tratadas, são suficientes para uma primeira avaliação tridimensional da área de interesse, através da modelação matemática.

Cabe lembrar que a modelação matemática não é um estudo estático. A medida que novos dados forem levantados, uma melhor caracterização ou detalhamento do modelo matemático construído deve ser efetuado de forma a sempre conferir se o modelo está representando o sistema real adequadamente. Neste sentido, o modelo matemático é essencial no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, podendo direcionar os trabalhos de levantamento de dados para uma avaliação mais específica.

Assim, os dados levantados no município de Caçapava mostraram-se suficientes para esta primeira modelação matemática, permitindo entender o comportamento do sistema hidrogeológico real, o que auxiliará na proteção e gerenciamento das águas subterrâneas e também no levantamento de dados futuros. Estes dados utilizados neste estudo constituem, em geral, as informações normalmente existentes nas companhias que gerenciam o abastecimento público de água, nas universidades e nos órgãos do governo, o que leva a acreditar na viabilidade de aplicação da modelação matemática em outros locais.

Tomando por base a experiência adquirida neste estudo, pode-se citar como informações mínimas necessárias para a modelação matemática, os seguintes itens:

- Mapas geológicos da área, em escala adequada às necessidades do trabalho. A modelação matemática de áreas pequenas, como um campo de poços específico, necessitará de mapa geológico em escala adequada, 1:50.000 a 1:10.000. Esta etapa depende do julgamento técnico do profissional modelador, pois em locais de geologia homogênea, talvez seja possível utilizar mapas em escalas menores. Estes dados são encontrados em universidades e órgãos de pesquisa.
- Dados dos poços existentes na área. Muitas informações são obtidas a partir do relatório final dos poços, pois são as obras que atravessam o aquífero, fornecendo dados de subsuperfície. Assim, quanto maior a qualidade destes dados, melhor será a interpretação das camadas do modelo matemático a ser construído. As informações a serem levantadas dos poços são: dados construtivos, dados litológicos, planilha dos testes de bombeamento, medições de vazão e nível da água durante e após a construção do poço, perfisagens geofísicas e análises de água. Neste caso, a exigência da SABESP frente às empresas de perfuração quanto à qualidade dos poços construídos e do relatório final fornecido, facilitou muito a execução deste trabalho. O levantamento dos poços existentes e suas informações é realizado na companhia responsável pelo abastecimento público de água, nas empresas de perfuração que atuam na região estudada, no órgão gestor dos recursos hídricos subterrâneos (no caso do Estado de São Paulo é o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE), responsável pelo cadastro de poços, seja federal, estadual ou municipal, e através de trabalho de campo para locação desses poços.
- Dados de monitoramento de nível da água. A existência de dados de monitoramento de nível d'água é importante pois estes são, na maioria das vezes, utilizados como parâmetro de

calibração do modelo matemático. Entretanto, esta é uma etapa que pode ser conduzida durante o processo da modelação matemática. Neste estudo, a medição do nível da água no campo não foi necessária, pois já existia o monitoramento conduzido pela SABESP. Estes dados são levantados, em geral, junto às companhias responsáveis pelo abastecimento público. Algumas vezes podem ser levantados dados junto a grandes consumidores como indústrias, ou de estudos de pesquisa anteriormente realizados. Outra forma de levantar este tipo de informação é realizar uma etapa de campo para a medição do nível da água ou a construção de poços de monitoramento.

- Dados hidrológicos para o balanço hídrico. Os dados meteorológicos e pluviométricos são importantes para a avaliação do balanço hídrico do local, permitindo avaliar se o modelo matemático está representando adequadamente o sistema hidrogeológico real e também para avaliar as taxas de infiltração de água no aquífero. Estes dados são normalmente monitorados na rede já instalada de postos pluviométricos, meteorológicos e fluviométricos. No Estado de São Paulo, este monitoramento é de responsabilidade do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Este tipo de dado pode ser encontrado em órgãos de pesquisa e universidades que, às vezes, mantêm um monitoramento dos dados para fins de pesquisa.

- Uso da água subterrânea. O modelo matemático tridimensional resolve as equações de fluxo de água subterrânea baseadas na conservação de massa, como visto anteriormente. Assim, é necessário calcular o volume de água que está sendo retirado do sistema hidrogeológico real, para que esta interferência também seja simulada no modelo matemático. Estes valores são obtidos junto à companhia de abastecimento público, ao órgão gestor dos recursos hídricos, ao órgão de fiscalização ambiental (no caso do Estado de São Paulo é a CETESB), que controla algumas das principais indústrias e através de levantamento de campo.

- Mapas topográficos. Os mapas topográficos são essenciais para a localização dos poços e outras atividades e feições importantes e também para a definição da superfície do terreno, incluída na modelação matemática tridimensional. Além disso permite avaliar as feições hidrológicas importantes como rios e lagos e também mostra a forma de ocupação do solo, indicando áreas florestadas e urbanizadas que influenciam na recarga dos aquíferos. Estes mapas podem ser levantados junto ao IBGE, nas prefeituras municipais e outros órgãos afins, como a EMPLASA no caso da Grande São Paulo.

Estas são informações mínimas necessárias para a modelação matemática tridimensional e, como observa-se, são normalmente disponíveis, entretanto, estão dispersas em diferentes órgãos e empresas. Cabe um julgamento técnico adequado para a interpretação dos dados de forma a compreender o sistema hidrogeológico real e para a concepção do modelo conceitual da área, o que torna imprescindível a participação de um hidrogeólogo na

equipe de trabalho. A qualidade dos dados existentes vai influenciar na qualidade do modelo matemático construído, principalmente os dados dos poços, os quais fornecem informações de subsuperfície. Assim, um dos principais passos é a exigência de qualidade na construção dos poços, utilizando equipamento e técnicas adequadas, execução de perfilagem geofísica, registro do teste de bombeamento durante o rebaixamento e também na recuperação, até a estabilização do nível da água. A construção do poço deve ser acompanhada por um geólogo responsável e a obra deve ser realizada por empresa devidamente credenciada. Além das exigências durante a construção do poço, deve-se exigir qualidade na apresentação do relatório final, documentando todas as informações levantadas, mesmo que seja um proprietário particular e o poço seja de pequena dimensão.

A construção de poços de observação para monitoramento do comportamento do nível e da qualidade da água subterrânea é necessária para um processo mais fiel da modelação matemática. Neste estudo, o aquífero tem comportamento livre, não existindo muita variação do nível potenciométrico em profundidade. Entretanto em aquíferos confinados, o fluxo vertical de água subterrânea deve ser definido, através da utilização de poços multiníveis. Os poços de observação colocados próximos a poços de bombeamento também devem ser do tipo multinível para monitorar, além do fluxo vertical, a variação da qualidade da água subterrânea em profundidade.

Os programas MODFLOW, MODPATH e ZONEBUDGET mostraram-se excelentes para a representação das heterogeneidades do meio físico e para o cálculo das linhas de trajetórias e do balanço hídrico, adequando-se bem aos dados existentes. Além disso, foi de fácil compreensão, apresentando um extenso material explicativo. Além disso, a utilização de pré e pós-processadores gráficos como o Visual MODFLOW utilizado neste estudo, é essencial para facilitar a entrada de dados e a visualização dos resultados, agilizando as modificações necessárias durante o processo de calibração do modelo matemático. Outros programas encontram-se disponíveis no mercado atualmente, sugerindo-se a execução de novos estudos comparando estes aplicativos para determinar as vantagens e desvantagens de cada um.

11. Alcance da aplicação da modelação matemática tridimensional

Do ponto de vista técnico, como visto anteriormente, os dados existentes são suficientes para a utilização da modelação matemática tridimensional, proporcionando uma ferramenta útil para o gerenciamento dos recursos hídricos e direcionamento do levantamento de novos dados.

Frente às outras metodologias, geométrica e analítica, a modelação matemática apresenta resultados mais práticos, pois resulta em áreas mais condizentes com o fluxo real da água subterrânea, gerando, em geral, áreas menores, mas que realmente representam a Zona

de Contribuição de uma captação. Estas outras metodologias, principalmente de abordagem geométrica, mais simples, têm a tendência de proteger áreas em excesso a jusante do poço e deixar de proteger áreas a montante. A abordagem analítica pode apresentar melhores resultados que o método geométrico, mas ainda assim, não considera as heterogeneidades do meio, que influenciam o sentido de fluxo da água subterrânea, e também não permite verificar a interferência das Zonas de Contribuição de poços próximos.

Assim, a modelação matemática apresenta áreas mais factíveis para tomada de medidas de proteção da captação, constituindo-se em uma ferramenta útil também no gerenciamento geral dos recursos hídricos subterrâneos. Mesmo que sejam construídos modelos matemáticos mais simples, estes podem ser detalhados a medida que novas informações forem levantadas. Neste ponto, o modelo matemático também pode auxiliar, direcionando as necessidades de levantamento de novos dados.

A eficiência da modelação matemática frente às outras metodologias já foi comprovada em estudos em outros países, como desenvolvido por Delin & Almendiger (1993), que mostrou também a versatilidade desta metodologia em incorporar as heterogeneidades do meio.

Hirata (1994), estudando o município de São José dos Campos, mostrou também que a modelação matemática bidimensional ali aplicada apresentou resultados mais práticos que as metodologias geométrica e analítica. A diferença entre o tamanho dos perímetros de proteção dos campos de poços existentes, calculados pelos diferentes métodos, é significativa, principalmente entre aquele calculado pelo método geométrico e pelo método numérico, como mostra a Tabela 11.1. Esta diferença também foi observada nos poços do município de Caçapava, como mostra a Tabela 11.2. Além disso, o perímetro traçado pelo método numérico permite incorporar heterogeneidades do meio físico, que refletem nas direções do fluxo da água subterrânea, garantindo uma maior fidelidade ao sistema hidrogeológico real.

Este fato mostra que a utilização da modelação matemática permite uma otimização de esforços para a tomada de medidas de proteção dos poços. Comparando-se com a aplicação da modelação matemática tridimensional, nota-se que, um entendimento mais detalhado do sistema de fluxo da água subterrânea proporciona uma proteção mais efetiva do aquífero.

No estudo de Hirata (1994), a Zona de Transporte de 10 anos traçada individualmente para cada poço variou de 55 m^2 a 4.142 m^2 , mostrando pequenas áreas a serem protegidas.

No município de Caçapava, com geologia semelhante àquela encontrada em São José dos Campos, as Zonas de Transporte de 10 anos definidas para os poços mostraram-se bem maiores, variando de 7.996 m^2 a 287.809 m^2 , como mostra a Tabela 11.2. Estas áreas são bem maiores pois considerou-se a Zona de Contribuição traçada pelas partículas que caminham na Camada 1 e na Camada 2 do modelo matemático. No caso de se adotar apenas a área traçada pelas partículas da Camada 1, a variação do tamanho das Zonas de Transporte é reduzido ao intervalo entre 2.286 m^2 e 18.700 m^2 . Entretanto, sugere-se a adoção de uma posição mais

Tabela 11.1 - Comparação entre as áreas dos perímetros de proteção dos campos de poços de São José dos Campos, utilizando os métodos geométrico (raio fixo calculado), analítico (fluxo uniforme) e numérico (modelação matemática bidimensional) (Hirata 1994).

Campo de Poços	Método utilizado		
	Raio fixo calculado (m ²)	Fluxo uniforme (m ²)	Modelo matemático bidimensional (m ²)
A	14.136.904	4.111.607	516.449
B	19.237.351	3.253.720	619.884
C	23.623.511	4.992.559	113.915
D	17.499.255	7.440.476	39.250
E	16.988.095	273.065	79.194
F	37.436.011	1.005.208	102.050
G	19.015.625	183.035	62.800
H	21.145.833	96.726	62.800
I	9.205.357	179.315	39.250
J	15.921.875	1.148.065	39.250
K	5.831.845	655.505	38.857
L	14.927.083	300.595	39.250
M	18.863.839	1.462.053	62.800
N	15.041.666	117.559	63.882
TOTAL	248.874.250	25.219.488	1.879.631

Tabela 11.2 - Comparação entre as Zonas de Transporte de 10 anos calculadas pelo método geométrico (raio fixo calculado) e pelo método numérico (modelação matemática tridimensional) no município de Caçapava.

Poço	Raio fixo calculado (m ²)	Modelo matemático tridimensional (m ²)
SA3	125.156	8.904
SA13	503.933	135.380
SA18	761.384	81.831
SA19	645.770	138.330
SA20	126.420	41.089
SA21	1.252.466	251.250
SA21A	1.328.542	239.919
SA22	1.138.235	287.809
SA23	714.528	187.230
SA24	649.407	165.739
SA25	753.786	125.441
SACV1	84.410	18.700
SACV2	48.153	7.996
SACV3	80.991	15.517
SAGU2	57.181	10.944
SAGU5	27.196	9.365
SAGU6	127.060	36.824
TOTAL	8.424.618	1.762.268

conservadora com a proteção da Zona de Transporte total, considerando a soma das áreas de captura dos poços na Camada 1 e na Camada 2, pois o aquífero tem, de forma geral, comportamento de aquífero livre, e a primeira camada pode alcançar pequenas espessuras, não protegendo a Unidade Hidrogeológica Inferior, mais produtiva. Este fato não pode ser contemplado em um modelo bidimensional, dada sua limitação na definição das heterogeneidades verticais.

Dessa forma, o modelo matemático tridimensional apresenta melhor representação do sistema hidrogeológico real, permitindo um detalhamento na definição da Zona de Contribuição das captações e uma proteção mais efetiva do aquífero.

Assim, sugere-se que a aplicação da modelação matemática é preferível em relação aos demais métodos geométricos e analíticos, sendo que deve-se visar, sempre que possível, a modelação tridimensional, podendo iniciar com a modelação bidimensional até que dados suficientes sejam levantados para um tratamento tridimensional. Apesar de ser um processo mais demorado e mais custoso, a amortização dos esforços é compensada pela eficiência na proteção do aquífero e na otimização das medidas preventivas.

A definição das Zonas de Contribuição das captações podem, para a tomada de medidas imediatas de proteção, serem definidas por métodos analíticos, como o de fluxo uniforme, enquanto se processa a aplicação da modelação matemática na área de interesse.

Exemplos de aplicação de métodos analíticos, adotados como medidas imediatas para a definição de áreas de controle, podem ser citados nos estudos efetuados em Termas de Ibirá (Hassuda et al. 1996) e em Águas de Santa Bárbara (Oda et al. 1996), cujos perímetros de proteção traçados tiveram, respectivamente, os raios de 2,5 km e 4,5 km. As áreas correspondentes totalizaram, respectivamente, 19.635.000 m² e 63.617.000 m², dificultando técnica e economicamente o controle das atividades e novas perfurações. Assim, estes são exemplos de localidades onde, com o levantamento de informações adicionais, deve ser aplicada a modelação matemática para otimizar as áreas a serem protegidas e as medidas a serem tomadas.

Em aquíferos fraturados, o mapeamento hidrogeológico tem se mostrado uma ferramenta indispensável para a delimitação das Zonas de Contribuição das captações, como comprovado pelo estudo desenvolvido em Águas de Lindóia (Iritani et al. 1998). Entretanto, a área delimitada apresenta, em geral, grandes dimensões, sendo que a modelação matemática pode ser aplicada, dentro de suas limitações, para auxiliar na delimitação de áreas menores dentro da Zona de Contribuição para priorizar as medidas de proteção. A modelação matemática para aquíferos fraturados tem sido utilizada em outras localidades, como nos Estados Unidos, mostrando bons resultados como ilustra o estudo de Marquis & Stewart (1994). No Brasil, esta metodologia deveria ser testada em aquíferos fraturados para avaliar a sua aplicabilidade e eficiência na definição das áreas de proteção.

Assim, este estudo desenvolvido em Caçapava vem mostrar a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional como ferramenta para a definição da Zona de Contribuição de captações e para auxiliar na delimitação de áreas de proteção específicas. A modelação matemática tridimensional deve ser a ferramenta adotada para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, podendo-se adotar métodos mais simples no início do processo de definição das Zonas de Contribuição das captações, até que sejam levantados dados suficientes para a construção do modelo matemático.

Os métodos mais simples poderiam ser aplicados em regiões onde a captação da água subterrânea seja pouco expressiva ou não existam fontes potenciais de contaminação como mostra a Figura 11.1.

Sugere-se que a metodologia de modelação matemática aplicada neste estudo seja utilizada como base para o desenvolvimento de modelos matemáticos tridimensionais em outras localidades.

12.Considerações finais

A delimitação de Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações (PPP's) pode ser efetuada através da utilização de diversas metodologias, seja de abordagem geométrica, analítica, física ou numérica. Entretanto, sua eficiência na proteção da água subterrânea está ligada à definição da Zona de Contribuição (ZC) de uma captação, o que nem sempre é definida quando se utiliza métodos mais simples de delimitação de PPP's. Os métodos analíticos ou geométricos consideram simplificações do meio físico que impedem a definição da real Zona de Contribuição de uma captação. A abordagem numérica, efetuada através da aplicação da modelação matemática, é a melhor forma de contemplar as heterogeneidades do meio físico que afetam o fluxo da água subterrânea, além de permitir a simulação de diversos cenários, avaliando-se alternativas para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. Dentro desta abordagem, a modelação matemática tridimensional mostra, em relação às outras abordagens, a melhor eficiência na definição da Zona de Contribuição de captações.

As etapas a serem seguidas na modelação matemática de fluxo da água subterrânea contemplam: confecção do modelo conceitual, escolha do(s) programa(s) matemático(s) adequado(s), definição e discretização da área modelada, definição das condições de contorno e dos parâmetros de calibração, calibração do modelo matemático construído e simulação dos cenários desejados.

A construção do modelo conceitual constitui o entendimento do sistema hidrogeológico real, identificando as unidades hidroestratigráficas importantes, as características hidráulicas dessas unidades, o sistema de fluxo da água subterrânea e as respostas às interferências antrópicas, como bombeamento. Os passos seguidos para a construção do modelo conceitual

Figura 11.1 - Esquema de priorização para a definição de áreas de proteção de captações de água subterrânea.

passa pelas etapas comuns de uma avaliação hidrogeológica, apenas tendo em vista os elementos importantes que afetam ou podem vir a afetar o sistema de fluxo da água subterrânea e que devem ser introduzidas no modelo matemático, como por exemplo a recarga dos aquíferos.

Assim, os dados básicos, normalmente existentes, são suficientes para uma modelação tridimensional preliminar. Estas informações básicas são obtidas através dos dados de poços, incluindo o perfil construtivo e litológico, as planilhas dos testes de bombeamento e perfilações geofísicas; dados hidrológicos (pluviométricos e fluviométricos); dados de monitoramento de nível da água e vazão dos poços; e mapas geológicos, topográficos e de uso do solo. A qualidade dos dados básicos obtidos e a interpretação adequada para entendimento do sistema hidrogeológico vão refletir diretamente na confiabilidade do modelo matemático construído. Dessa forma, a medida que novos dados forem obtidos, o modelo matemático pode ser melhorado ou detalhado, para melhor simular as heterogeneidades do meio físico e as mudanças nas interferências antrópicas.

Neste estudo o **programa escolhido** para a simulação do fluxo da água subterrânea foi o MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988), cujos resultados de carga hidráulica são utilizados pelo programa MODPATH (Pollock 1989) para calcular as linhas de trajetórias de partículas, e pelo programa ZONEBUDGET (Harbaugh 1990) para o cálculo do balanço hídrico em áreas específicas. Como pré e pós-processador gráfico foi utilizado o programa Visual MODFLOW (Guiguer & Franz, 1996) para facilitar a entrada de dados e a visualização dos resultados.

A área escolhida para a aplicação da modelação matemática tridimensional foi o município de Caçapava pois encontra-se em uma das áreas críticas definidas no projeto denominado "Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo" (Hirata et al. 1997). Além disso, é uma cidade abastecida 99% por água subterrânea, possuindo vários poços de abastecimento. O volume total de água subterrânea bombeado no município foi estimado, com base nos dados cadastrados, em cerca de 22.125 m³/d, sendo que, deste valor, aproximadamente 83% é destinado ao abastecimento público.

A **área modelada** restringiu-se à porção sul do município, ao sul do rio Paraíba até o limite municipal na Serra do Jambreiro devido à concentração dos poços e das informações existentes.

No **modelo conceitual** desenvolvido no município de Caçapava identificou-se o Aquífero Cristalino, basal, composto pelo Embasamento Cristalino, e o Aquífero Sedimentar. O Aquífero Sedimentar foi dividido em duas unidades principais: a Unidade Hidrogeológica Inferior, principal unidade aquífera da área, formada pela Formação Resende de constituição mais arenosa, e a Unidade Hidrogeológica Superior, composta pela Formação Tremembé, mais argilosa. A Formação Pindamonhangaba existente no município constitui uma unidade

hidrogeológica mais recente mas, devido a sua pequena espessura e ocorrência restrita ao sul do rio Paraíba, a sua exploração restringe-se principalmente a poços rasos.

As **características hidrogeológicas** foram definidas a partir da interpretação dos testes de bombeamento e também pela correlação empírica entre a transmissividade (T) e a capacidade específica (Q/s). A interpretação dos testes de bombeamento pelo método de Neuman mostraram valores mais coerentes com as litologias encontradas nas formações geológicas, sendo que os valores obtidos de condutividade hidráulica variaram entre $3,99 \times 10^{-7}$ a $3,10 \times 10^{-5}$ m/s. A utilização da relação empírica de T e Q/s mostrou-se útil para a complementação de dados de condutividade hidráulica em locais com pouca informação. Entretanto, recomenda-se que utilize esta metodologia apenas em locais onde a correlação entre a transmissividade e a capacidade específica seja superior a 90%. Os valores de condutividade hidráulica obtidos pela relação empírica variaram entre $2,98 \times 10^{-8}$ a $1,5 \times 10^{-4}$ m/s. A correlação dos dados de capacidade específica e da transmissividade com a reta teórica obtida da simplificação da equação de Theis e Cooper-Jacob mostrou-se baixa, não se recomendando esta metodologia para complementação de dados em regiões com pouca informação.

O cálculo do **escoamento básico** foi efetuado para as bacias hidrográficas dos córregos Divisa e Caçapava Velha utilizando os métodos gráficos de união dos pontos de recessão e das equações de Meyboom. O método gráfico das equações de Meyboom foi considerado mais aplicável pois determina o escoamento básico da drenagem e também a taxa de recarga do aquífero, mostrando valores coerentes tanto considerando o valor de deflúvio mensal como do deflúvio diário. Assim os valores de escoamento básico calculados para os córregos Caçapava Velha e Divisa foram, respectivamente, $7.193 \text{ m}^3/\text{d}$ e $17.147 \text{ m}^3/\text{d}$. Os valores de **recarga** obtidos por este método para as referidas bacias foram 86 mm/ano e 96 mm/ano , respectivamente. Apenas na zona urbana, a recarga apresenta um valor maior, de 136 mm/ano , induzida pela perda da rede de distribuição de água.

Esta concepção do modelo conceitual da área permitiu a construção do **modelo matemático** tridimensional, composto por três camadas. A primeira camada representa a Unidade Hidrogeológica Superior, englobando também a unidade recente da Formação Pindamonhangaba. A segunda camada, simulando a Unidade Hidrogeológica Inferior, representa o principal aquífero, explorado pela maior parte dos poços e a terceira camada representa o Embasamento Cristalino. As características hidráulicas adotadas para o modelo matemático basearam-se nos valores obtidos nos testes de bombeamento e nas características litológicas das formações. Foram definidas 9 **unidades hidráulicas** no modelo, cujos valores de condutividade hidráulica variaram entre 8×10^{-8} a 8×10^{-6} m/s. Adotou-se valores iguais de condutividade hidráulica no eixo x (K_x) e no eixo y (K_y), mas dez vezes inferior no eixo z (K_z) nas unidades sedimentares. Apenas o Aquífero Cristalino foi considerado isotrópico para os

três eixos ($K_x=K_y=K_z$). Os valores assumidos para o coeficiente de armazenamento específico (S_s), porosidade efetiva para fluxo (n_{ef}), porosidade efetiva (S_y) e porosidade total (n) foram respectivamente, 0,001 m^{-1} ; 0,25; 0,25 e 0,40.

As **condições de contorno** adotadas para o modelo matemático foram fronteiras de carga hidráulica genérica nos limites norte, oeste e leste para simular o fluxo regional da água subterrânea, que ocorre na Bacia Sedimentar de Taubaté. O limite sul da área modelada foi colocada como "não-fluxo", isto é, células onde não ocorre o fluxo da água subterrânea para simular o divisor de águas existente no limite sul do município. O limite inferior do modelo foi considerado também como "não-fluxo" pois supõe-se que a grandes profundidades não há contribuição do Aquífero Cristalino para os poços. Como condição de contorno superior do modelo foi adotada recarga, diferenciada nas área da serra (área de recarga), na várzea do rio Paraíba (considerada área de descarga da água subterrânea) e na área urbana com recarga induzida da perda da rede de distribuição de água. As taxas de recarga variaram entre 20 mm/ano na área de descarga até 150 mm/ano na zona urbana.

A **calibração** do modelo matemático, simulado em estado estacionário, considerou duas situações: 'sem bombeamento' para simular a superfície potenciométrica original, antes da interferência antrópica representada pelos poços de bombeamento, e a situação 'com bombeamento' considerando que os poços existentes bombeiam 24 horas por dia. Os parâmetros utilizados para a calibração na situação 'sem bombeamento' foram os níveis estáticos dos poços antigos e os valores de escoamento básico calculados para os córregos Caçapava Velha e Divisa. Na situação 'com bombeamento', foram utilizados os dados de monitoramento do nível da água dos poços da SABESP e os níveis dinâmicos de poços afastados. Na comparação dos níveis de água observados e calculados pelo modelo, adotou-se como critério de calibração, a % resíduo ($RMS/\Delta H$), que atingiu valor próximo a 11% nas duas situações simuladas. A diferença nos valores de escoamento básico observados e calculados pelo modelo na situação 'sem bombeamento' atingiu um valor inferior a 10%.

Com o modelo calibrado, foi simulada a situação com bombeamento dos poços considerando a vazão real do período de maio/1996. Para definir as Zonas de Contribuição dos poços de abastecimento foi simulado o **caminhamento de partículas** reversas, utilizando o programa MODPATH (Pollock 1989). As partículas colocadas na Camada 1 do modelo indicaram áreas de captura dos poços menores que as partículas colocadas na Camada 2. Entretanto, neste estudo, adotou-se uma postura visando a máxima proteção do aquífero, sugerindo-se que as medidas de prevenção da contaminação visem a Zona de Contribuição total dos poços, somando-se as áreas de captura das duas camadas do modelo pois o aquífero tem comportamento livre a localmente confinado, e a Camada 1 tem, em algumas porções espessuras de até 20 metros, não constituindo uma proteção efetiva para a segunda camada.

As **Zonas de Contribuição** total dos poços localizados próximos à zona urbana cobrem áreas extensas, abrangendo, juntas, toda a porção centro-sul do município de Caçapava, sendo inviável medidas rígidas de proteção em toda a sua extensão. Além disso, o tempo de trânsito da porção mais a montante da Zona de Contribuição até o ponto onde se encontra o poço é da ordem de milhares de anos. Assim, a melhor maneira de se efetuar a proteção da captação é a definição de áreas mais restritas dentro da Zona de Contribuição dos poços, utilizando tempos de trânsito menores, que se constituem nos critérios de delimitação dos Perímetros de Proteção. Acredita-se que estes critérios devam ser avaliados para cada cenário específico, necessitando-se novos trabalhos abordando este assunto.

Para fins de ilustrar a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional para a delimitação de perímetros efetivos de proteção, que realmente protejam a área que contribui para a captação, foram adotados os tempos de trânsito de 10 e 50 anos para a definição das **Zonas de Transporte**. Estas áreas analisadas conjuntamente com as atividades consideradas potencialmente perigosas, permitiram avaliar o **risco de contaminação** das águas subterrâneas. Foram consideradas fontes potenciais de contaminação 24 áreas com tanques para armazenamento de combustíveis e outros líquidos perigosos e 17 indústrias cadastradas no município.

A Zona de Transporte (ZT) de 10 anos mostrou que a maior parte dos poços de abastecimento não possuem atividade potencialmente contaminante que ameace a qualidade da água captada. Apenas os poços SA13, SA21, SA23 e SA24 apresentaram riscos associados às áreas com tanques. O poço SA21 possui 2 postos de serviço e uma transportadora de resíduos. Os poços SA23 e SA24 são ameaçados por uma empresa envasilhadora de derivados de petróleo que encontra-se no divisor de águas entre as zonas de contribuição destes poços. O poço SA13 possui uma garagem de uma empresa de transporte e é o único poço ameaçado pela atividade industrial, possuindo uma fábrica de radiadores em sua Zona de Transporte de 10 anos. A rodovia Presidente Dutra e a ferrovia foram consideradas fontes potenciais de contaminação devido à possibilidade de acidentes com produtos perigosos, ameaçando o poço SA13 em sua Zona de Transporte de 10 anos.

Quando consideramos a Zona de Transporte de 50 anos, mais dois postos de serviço são incluídos como fontes potenciais de contaminação do poço SA21, e eventuais acidentes com produtos perigosos na rodovia Presidente Dutra e na ferrovia põem em risco a qualidade da água dos poços SA13, SA23, SA20, SA21 e SAVM1.

Para monitorar a qualidade da água subterrânea e prevenir que uma contaminação chegue ao poço de abastecimento, sugere-se a construção de poços "sentinelas" na Zona de Transporte, utilizando o modelo matemático para auxiliar a sua locação na direção do caminamento de partículas advindas das fontes potenciais de contaminação identificadas. Além disso, o órgão ambiental responsável pode colaborar exigindo medidas preventivas

contra a contaminação por parte das atividades que apresentam risco à qualidade da água subterrânea, como por exemplo, testes de estanqueidade nas áreas com tanques. As Zonas de Contribuição definidas no modelo matemático consideraram as vazões dos poços ativos em maio de 1996. As mudanças das taxas de bombeamento e a inclusão de novos poços, principalmente de grande vazão (superior a 1000 m³/d) implicam em mudanças na configuração das Zonas de Contribuição, sendo necessária nova avaliação. Entretanto, com o modelo matemático, a **avaliação de novos cenários** torna-se fácil, o que permite também sua utilização como ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, avaliando os impactos na superfície potenciométrica causada por novos poços ou pelo desligamento de poços existentes. Isto permite avaliar formas de minimizar o cone de rebaixamento existente na região da zona urbana de Caçapava causado pela concentração de poços de grande vazão. Ainda, permite avaliar a locação de poços futuros de forma que, na Zona de Contribuição não sejam permitidas a instalação de atividades potencialmente contaminantes, preservando regiões para a expansão da rede de captação de água subterrânea.

Como qualquer metodologia aplicada para a determinação da Zona de Contribuição de poços, a modelação matemática apresenta **limitações** inerentes ao método e aos dados utilizados. A principal limitação do modelo matemático construído é a ausência de poços de observação para uma melhor avaliação da evolução do nível da água no aquífero e para a determinação da anisotropia das unidades hidrogeológicas. Devido a ausência de poços de observação, não foi possível avaliar a relação das condutividades hidráulicas nos eixos x, y e z, que podem implicar em mudanças nas direções preferenciais de fluxo da água subterrânea. Além disso, os níveis de água medidos nos poços de observação forneceriam parâmetros de calibração mais confiáveis ao modelo matemático. Nesta situação, os poços "sentinelas" poderiam atuar como poços de observação para a aquisição de novos dados e refinamento do modelo matemático construído.

Entretanto, apesar das limitações existentes, a modelação matemática tridimensional mostrou-se viável de ser aplicada utilizando os dados normalmente existentes, permitindo um entendimento do sistema hidrogeológico e a determinação mais acurada da Zona de Contribuição das captações de água subterrânea. Os dados mínimos necessários geralmente estão disponíveis, entretanto dispersos em diferentes órgãos, sendo que é preciso reuni-los e interpretá-los de forma adequada, identificando as feições importantes para a modelação matemática.

Em comparação com outras metodologias, aplicadas em outros estudos, a modelação matemática mostrou maior precisão na determinação das Zonas de Contribuição das captações, promovendo uma proteção mais eficaz da água subterrânea. Assim, as medidas de proteção voltadas às captações devem utilizar a modelação matemática tridimensional para

definição da Zona de Contribuição, podendo-se, como ação imediata, aplicar metodologias mais simples, como a abordagem analítica, enquanto se processa a construção do modelo matemático.

Cabe lembrar que, apesar dos Perímetros de Proteção visarem a prevenção de qualquer contaminação, é necessário que as captações atendam às normas técnicas de construção e manutenção para, também, garantir a qualidade da água subterrânea.

Além disso, já existem instrumentos legais para a implantação dos Perímetros de Proteção, entretanto são necessárias medidas para efetivar esta estratégia de proteção das águas subterrâneas, preparando tecnicamente e, também, com infra-estrutura, os órgãos responsáveis. É necessário, também, definir o campo de atuação e as responsabilidades de cada órgão, seja no nível federal, estadual ou municipal. Nota-se que algumas medidas de proteção, como planejamento do uso do solo cabe aos municípios, entretanto, o controle de atividades potencialmente contaminantes como indústrias e o gerenciamento dos recursos hídricos fica a cargo de órgãos estaduais, fazendo-se necessário um acordo inter-institucional para a definição de um procedimento de implantação dos Perímetros de Proteção. Para tanto, observa-se a necessidade de criação de fóruns dentro dos Comitês de Bacias Hidrográficas para iniciar a discussão desta estratégia de proteção das captações de água subterrânea.

13. Conclusões e recomendações

A execução deste trabalho comprovou a viabilidade de aplicação da modelação matemática tridimensional para a determinação da Zona de Contribuição (ZC) das captações de água subterrânea, constituindo-se em ferramenta essencial para o processo de delimitação de Perímetros de Proteção de Poços e Outras Captações (PPP's), auxiliando também no gerenciamento geral dos recursos hídricos subterrâneos.

A modelação matemática permite, também, entender o sistema hidrogeológico real, direcionando as necessidades de levantamento de novos dados. As grandes vantagens da modelação matemática frente às outras metodologias para determinação de áreas de proteção é a possibilidade de considerar as heterogeneidades do meio físico que afetam as direções de fluxo da água subterrânea ou avaliar as mudanças nas Zonas de Contribuição advindas da variação das taxas de bombeamento.

Em geral, as Zonas de Contribuição das captações abrangem grandes áreas, necessitando-se definir porções mais restritas para a tomada de medidas efetivas de proteção. Para tanto, com o uso da modelação matemática é possível delimitar as Zonas de Transporte (ZT's), adotando-se tempos de trânsito adequados ao cenário considerado.

O processo da modelação matemática deve seguir as etapas descritas neste trabalho, concentrando esforços no entendimento do sistema hidrogeológico real, de forma a construir

um confiável modelo conceitual da área e na seleção de dados adequados para a calibração do modelo. A calibração do modelo matemático é a etapa mais demorada do processo de modelação mas deve ser efetuada com atenção pois nesta fase pode observar-se a necessidade de levantamento de mais dados e/ou a revisão do modelo conceitual construído.

Os dados básicos que devem ser levantados para o processo da modelação matemática são: perfis construtivos e litológicos dos poços, perfilagens geofísicas, planilha de testes de bombeamento, mapas geológicos, topográficos e de uso do solo, dados hidrológicos, dados de monitoramento de nível da água e vazão dos poços. Estas são as informações mínimas necessárias para o entendimento do sistema hidrogeológico, sendo geralmente disponíveis. Ressalta-se a importância da construção de um bom modelo conceitual com base na interpretação adequada dos dados pois a qualidade do modelo matemático está diretamente ligada ao entendimento do sistema hidrogeológico. Para isso é essencial a presença de um hidrogeólogo no processo da modelação matemática.

A aplicação da modelação matemática no município de Caçapava, como área piloto, permitiu identificar as Zonas de Contribuição dos poços de abastecimento, que abrangem grande parte da porção sul do município. Adotando-se tempos de trânsito de 10 e 50 anos, observou-se que as Zonas de Transporte abrangem áreas bem menores, factíveis de tomada de medidas efetivas de proteção. Dentro das Zonas de Transporte de alguns poços (SA20, SA21, SA23, SA24, SA13, SAVM1) existem atividades potencialmente contaminantes, principalmente ligadas ao armazenamento de combustíveis e o risco de acidentes com produtos perigosos na rodovia Presidente Dutra e na ferrovia. Este modelo matemático permitiu definir, com base nas linhas de trajetória das partículas, as áreas para a instalação de poços de monitoramento, para avaliar qualquer possível evento de contaminação destes poços.

Além da definição das Zonas de Contribuição das captações, este modelo matemático pode ser utilizado para o gerenciamento dos recursos hídricos, simulando cenários futuros e identificando áreas estratégicas para a exploração futura da água subterrânea.

A medida que novos dados forem coletados, o modelo matemático deve ser revisado e melhorado, de forma a representar o mais fielmente possível, o sistema hidrogeológico real.

Este aprimoramento técnico a partir de novos dados não é um processo inerente apenas à modelação matemática. Em qualquer método ou processo aplicado para a proteção e o gerenciamento dos aquíferos é necessário revisar e aprimorar os resultados a medida que surjam novas informações do meio físico ou haja alterações das interferências antrópicas no sistema hidrogeológico.

Por permitir esta flexibilidade e melhor entendimento do sistema hidrogeológico, recomenda-se a utilização da modelação matemática tridimensional para a delimitação da Zona de Contribuição das captações e definições dos Perímetros de Proteção.

Os poços de monitoramento recomendados para o município de Caçapava devem ser multiníveis para avaliar a concentração de possíveis contaminantes a diferentes profundidades, sendo que os dados obtidos nestes poços auxiliarão na verificação e no refinamento do modelo matemático.

Na presente abordagem, foram adotados os tempos de trânsito de 10 e 50 anos, entretanto, recomenda-se que estudos futuros avaliem os melhores critérios de tempo de trânsito para a definição de Perímetros de Proteção para cada cenário considerado.

Nas porções das Zonas de Contribuição não abrangidas pelas Zonas de Transporte e nas áreas estratégicas para exploração futura da água subterrânea para fins de abastecimento público, sugere-se a adoção do mapeamento de vulnerabilidade para auxiliar no gerenciamento e proteção dos aquíferos. Dessa forma, a modelação matemática deve ser aplicada como ferramenta principal para a determinação das Zonas de Contribuição para promover uma efetiva proteção das áreas que realmente contribuem para as captações de água subterrânea importantes para o abastecimento público, de forma a otimizar os custos e esforços nas medidas a serem tomadas para prevenção e controle da contaminação da água subterrânea.

Referências Bibliográficas

- ADAMS, B. & FOSTER, S. S. D. 1992. Land-surface zoning for groundwater protection. *Journal of Inst. of Water and Environ. Management*, 6 (3): 312 - 320.
- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. 1992. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press, San Diego, EUA. 381 p.
- BEAR, J. 1979. *Hydraulics of groundwater*. McGraw Hill, New York, EUA. 567 p.
- BOULDING, J. R. 1995. *Practical handbook of soil, vadose zone and ground water contamination: assessment, prevention and remediation*. Lewis Publishers, Flórida, EUA. 968 p.
- BREDEHOEFT, J. 1992. Much contaminated groundwater can't be cleaned up. *Ground Water*, 30 (6): 834 - 835.
- BUTLER, J. J. 1988. Pumping tests in nonuniform aquifers – the radially symmetric case. *Journal of Hydrology*, 101 (1-4): 15 – 30.
- BUTLER, J. J. 1990. The role of pumping tests in site characterization: some theoretical considerations. *Ground Water*, 28 (3): 394 – 402.
- CAMPOS, H. C. N. 1993. *Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP*. (Tese de Doutorado, IGc/USP, inédita). 177 p.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 1997 *Uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo*. CETESB, São Paulo. 48 p.
- CHOW, V. T. 1964. Runoff, Section 14. In: CHOW, V. T. 1964. *Handbook of applied hydrology*. McGraw Hill, EUA, p. 14-1 - 14-54.
- CLEARY, R. W. 1989. Hidrologia de águas subterrâneas. In: RAMOS et al. 1989. *Engenharia hidrológica*. ABRH e Ed. UFRJ. Rio de Janeiro. p. 293-404.
- CLEARY, R. W. 1991. Qualidade das águas subterrâneas. In: PORTO et al. 1991. *Hidrologia Ambiental*. ABRH e EDUSP. São Paulo. p. 211- 293.
- CLEARY, M. T. C. B. F. 1992. *Investigação através de modelos matemáticos em microcomputadores dos efeitos dos principais parâmetros hidrogeológicos e dos processos atenuantes de transporte na delimitação de áreas de proteção de poços (APPs) e na remediação de aquíferos contaminados*. (Dissertação de Mestrado, IgC/USP, inédita). 169 p.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1975. *Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 1. Grande São Paulo*. DAEE, São Paulo, 3 v.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1977a. *Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 3 - São José dos Campos*. DAEE, São Paulo, 5 v.

- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1977b. *Boletim fluviométrico nº 6. Sexta zona hidrográfica*. DAEE, São Paulo. 201 p.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1979. *Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 2. Santos*. DAEE, São Paulo. 3 v.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1981. *Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 5. Campinas*. DAEE, São Paulo. 3v.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1988. *Boletim fluviométrico nº 8. Bacia do Paraíba do Sul*. DAEE, São Paulo. 376 p.
- DAWSON, K. J. & ISTOK, J. D. 1991. *Aquifer testing. Design and analysis of pumping and slug tests*. Lewis Publishers, Flórida, EUA. 344 p.
- DELIN, G. N. & ALMENDINGER, J. E. 1993. Delineation of recharge areas for selected wells in the St. Peter-Prairie du Chien-Jordan aquifer, Rochester, Minnesota. U. S. Geological Survey, *Water Supply Paper* 2397. 39 p.
- DNAEE - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1970. *Boletim fluviométrico nº 23. Dados fluviométricos na Bacia do Rio Paraíba no Estado de São Paulo. (1959 a 1968)*. DNAEE, São Paulo, p. 309-316A.
- DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons Inc., New York, EUA, 2ª ed. 506 p.
- DRISCOLL, F. G. 1989. *Groundwater and wells*. Johnson Filtration Systems Inc., Minnesota, EUA, 2ª ed., 1089 p.
- FERNANDES, A. J. 1997. *Tectônica cenozóica na porção média da bacia do rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia*. (Tese de Doutorado, IGc/USP, inédita). 244 p.
- FERNANDES, F. L. 1993. *Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP*. (Dissertação de Mestrado, Escola de Minas/UFOP, Minas Gerais, inédita). 147 p.
- FETTER, C. W. 1988. *Applied Hydrogeology*. Merrill Publishing Company, EUA, 2ª ed. 592 p.
- FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. CEPIS/OPAS, Lima, Peru. 2ª ed (revisada). 81 p.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., EUA. 604 p.
- GUIGUER, N. & FRANZ, T. 1996. *Visual MODFLOW. User's Manual*. WHI, Waterloo, Canadá. 231 p.
- HARBAUGH, A. W. 1990. *A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U. S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U. S. Geological Survey, Virginia, EUA. 23 p.

- HASSUDA, S.; ODA, G. H.; IRITANI, M. A.; FERREIRA, L. M. R.; YOSHINAGA, S.; GARDA, G. M.; SILVA, I. C.; CARVALHO, F.; TEIXEIRA, J. C.; OLIVEIRA, N. 1996. Estudo hidrogeológico visando investigar as causas da queda de vazão das fontes do Balneário Evaristo Mendes de Seixas, Distrito de Termas de Ibirá, SP. Cong. Bras. de Termalismo, 3, Termas do Gravatá, SC. *Anais...* SBT, p. 34 - 52.
- HASSUDA, S. 1997. *Critérios para a gestão de áreas suspeitas ou contaminadas por resíduos sólidos – estudo de caso na Região Metropolitana de São Paulo*. (Tese de Doutorado, IGc/USP, inédita). 142 p.
- HASUI, Y. & PONÇANO, W. L. 1978. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. Cong. Bras. Geologia, 30, Recife. *Anais...* SBG, v. 1, p. 368 - 381.
- HIRATA, R. 1994. *Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudo de casos no Estado de São Paulo*. (Tese de Doutorado, IGc/USP, inédita). 195 p.
- HIRATA, R.; BASTOS, C. R.; ROCHA, G.; IRITANI, M. A.; GOMES, D. 1991. Groundwater pollution risk vulnerability map of the Sao Paulo State - Brazil. *Wat. Sci. Tecn.*, 24: 236 - 246.
- HIRATA, R.; BASTOS, C. R.; ROCHA, G. (coords.) 1997. *Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo*. (R. Hirata; C. Bastos; G. Rocha, coord.). IG/CETESB/DAEE, São Paulo, 2 v.
- HODGINS, E. 1996. *Groundwater protection areas. Policy Paper*. Draft. Regional Municipality of Waterloo, Waterloo, Canadá. 25 p.
- HOLYSH, S. 1995. *Halton aquifer management plan. Phase I Report. Background hydrogeology*. Regional Municipality of Halton, Report, Halton, Canadá. 92 p.
- HUGHSON, L.; HUNTLEY, D.; RAZACK, M. 1996. Cokriging limited transmissivity data using widely sampled specific capacity from pump tests in an alluvial aquifer. *Ground Water*, 34 (1): 12 - 18 p.
- IG - INSTITUTO GEOLÓGICO. 1990. *Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Sorocaba (SP)*. Programa Cartas Geológicas e Geotécnicas para o Planejamento Ambiental na Região entre Sorocaba e Campinas. IG, São Paulo. 2 v.
- IG - INSTITUTO GEOLÓGICO. 1991. *Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Itu (SP)*. Programa Cartas Geológicas e Geotécnicas para o Planejamento Ambiental na Região entre Sorocaba e Campinas. IG, São Paulo. 3 v.
- IG - INSTITUTO GEOLÓGICO. 1993. *Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Campinas (SP)*. Programa Cartas Geológicas e Geotécnicas para o Planejamento Ambiental na Região entre Sorocaba e Campinas. IG, São Paulo. 3 v.
- IG - INSTITUTO GEOLÓGICO.. 1995. *Subsídios para o planejamento regional e urbano domeio físico na porção média da bacia do rio Piracicaba, SP*. IG, São Paulo. 4 v.

- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S/A. 1990. *Geologia das Folhas Jacareí (SF-23-Y-D-II-3), Tremembé (SF-23-Y-B-V-4), Taubaté (SF-23-Y-D-II-2) e Pindamonhangaba (SF-23-Y-B-VI-3), escala 1:50.000, Estado de São Paulo*. IPT, Relatório 28732, São Paulo, 2 vol., 276 p.
- IRITANI, M. A.; HASSUDA, S.; ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R.; TEIXEIRA, A. L.; NEGRI, F. A.; AZEVEDO S^o, J. M.; GARDA, G. M. 1998. Delimitação da área de recarga de fontes em aquífero fraturado. In: Cong. Bras. Águas Subterrâneas, 10, São Paulo. *Anais...* ABAS, São Paulo. (CD-ROM).
- ITGE - INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. 1991. *Guia metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. ITGE, 1^a ed., Espanha, 287 p.
- KONIKOW, L. F. & BREDEHOEFT, J. D. 1992. Ground-water models cannot be validated. *Advances in Water Resources*, 15 (1): 75 - 83.
- KRUSEMAN, G. P. & RIDDER, N. A. 1979. *Analysis and evaluation of pumping test data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Holanda. Bulletin 11, 200p.
- LALLEMAND-BARRÈS, A. 1989. Législation et réglementation concernant la protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine dans différents pays européens. *Hydrogéologie*, (2): 119-124.
- LERNER, D. N. 1992. Well catchments and time-of-travel zones in aquifers with recharge. *Water Resources Research*, 28 (10): 2621 - 2628.
- MAGALHÃES, P. C. 1989. Hidrologia superficial. In: RAMOS et al. 1989. *Engenharia hidrológica*. ABRH e Ed. UFRJ. Rio de Janeiro. p. 201-289.
- MANCINI, F. 1995. *Estratigrafia e aspectos da tectônica deformadora da Formação Pindamonhangaba, Bacia de Taubaté, SP*. (Dissertação de Mestrado, IGc/USP, inédita). 107.
- MARGAT, J. 1989. Défense et illustration des eaux souterraines en Europe. *Hydrogéologie* (2): 75-91.
- MARQUIS, S. A. & STEWART, E. 1994. The delineation of wellhead protection areas in fractured bedrock terrains using groundwater flow models. National Outdoor Action Conference and Exposition, 8. Aquifer Remediation, Ground Water Monitoring, Geophysical Methods. *Proceedings...* NGWA, Minnesota, EUA. p. 327 - 341.
- MARTINS, J. A. 1976. Escoamento superficial. In: Pinto et al. 1976. *Hidrologia básica*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo. p. 36 - 43.
- MCDONALD, M. G. & HARBAUGH, A. W. 1988. *A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model*. Techniques of Water-Resources Investigations of U. S. Geological Survey, 06-A1, USGS, Washington, EUA. 576 p.
- MEYBOOM, P. 1961. Estimating ground water recharge from stream hydrographs. *Journal of Geophysical Research*, 66 (4): 1203 - 1214.

- MEYER, P. D. 1990. Ground water monitoring at wellhead protection areas. *Ground Water Monitoring Review*, 10(4): 102-109.
- MORRIS, D. A. & JOHNSON, A. I. 1967. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U. S. Geological Survey 1948-60. U. S. Geological Survey, *Water Supply Paper*, 1839-D, 42 p.
- MORRISSEY, D. J. 1989. Estimation of the recharge area contributing water to a pumped well in a glacial-drift, river-valley aquifer. U. S. Geological Survey, E.U.A., USGS, *Water Supply Paper*, 2338. 41 pp.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1990. *Ground water models: scientific and regulatory applications*. National Academy Press, Washington, EUA. 303 p.
- NEUMAN, S. P. 1974. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resource Research*, 10 (2): p. 303 – 312.
- NEUMAN, S. P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, 11 (2): p. 329 – 342.
- ODA, G. H.; YOSHINAGA, S.; IRITANI, M. A.; HASSUDA, S.; FERREIRA, L. M. R.; GARDA, G. M.; MAXIMIANO, A. M. S.; FRANCO FILHO, F. W. B.; BIANCHI NETO, C. 1996. Avaliação hidrogeológica com aplicação de modelo matemático para subsidiar a gestão da água subterrânea na Estância Hidromineral de Águas de Santa Bárbara - SP. Cong. Bras. de Termalismo, 3, Termas do Gravatal, SC. *Anais...* SBT, p. 53 - 63.
- ODA, G. H. 1998. *Contribuição à hidrogeologia da região entre Salto de Pirapora e Itu (SP): análise da produtividade, ocorrência e circulação das águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Tubarão e Cristalino*. (Dissertação de Mestrado, IgC/USP, inédita). 100 p.
- OHARA, T. 1995. *Zoneamento geoambiental da região do Alto-Médio Paraíba do Sul (SP) com sensoriamento remoto*. (Tese de Doutorado, IGCE/UNESP, inédita). 2 volumes.
- PEREIRA, S. Y. 1996. *Proposta de representação cartográfica na avaliação hidrogeológica para o estudo de planejamento e meio ambiente, exemplo da Região Metropolitana de Campinas - SP*. (Tese de Doutorado, IGc/USP, inédita). 190 p.
- PINTO, N. L. S. 1976. O hidrograma unitário. In: Pinto et al. 1976. *Hidrologia básica*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo. p. 92-120.
- POLLOCK, D. W. 1989. *Documentation of computer programs to complete and display pathlines using results from the U. S. Geological Survey modular three dimensional finite-difference ground-water model*. USGS, Open File Report 89-381, 81 p.
- RAMOS, F. 1989. Hidrologia. In: RAMOS et al. 1989. *Engenharia hidrológica*. ABRH e Ed. UFRJ. Rio de Janeiro. p. 1-16.
- RAZACK, M. & HUNTLEY, D. 1991. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. *Ground Water*, 29 (6): 856 - 861.
- REBOUÇAS, A. C. 1998. Desenvolvimento das águas subterrâneas no Brasil. Cong. Bras. Águas Subterrâneas, 10, São Paulo. *Anais...* ABAS, São Paulo. (CD-ROM).

- RICCOMINI, C.: 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. (Tese de Doutorado, IGc/USP, inédita). 256 p.
- RICCOMINI, C.; APPI, C. J.; FREITAS, E. L.; ARAI, M. 1987. Tectônica e sedimentação no sistema de rifts continentais da Serra do Mar (Bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo). Simp. Geol. RJ-ES, 1, Rio de Janeiro. *Anais... Roteiro de Excursões*. SBG, Rio de Janeiro, p.253-298.
- SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1995. *Diagnóstico Técnico e Ambiental do Sistema de Abastecimento de Água e Esgoto de Caçapava*. Relatório Interno, SABESP, 1 v. e mapas.
- SÃO PAULO. CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. 1990. *Plano estadual de recursos hídricos. Primeiro plano do Estado de São Paulo - 1990*. São Paulo, DAEE, 137 p.
- SCHLEYER, R.; MILDE, G.; MILDE, K. 1992. Wellhead protection zones in Germany: delineation, research and management. *Journal of Institution of Water and Environmental Management*, 6 (3): 303 - 311.
- SOUTHERN WATER AUTHORITY. 1985. *Aquifer Protection Policy*. Guilbourne House, Worthing, Inglaterra, 47 p.
- STRUCKMEIER, W. F. & MARGAT, J. (coords.) 1995. *Hydrogeological maps. A guide and a standard legend*. International Association of Hydrogeologists, Hannover. International Contributions to Hydrogeology, vol. 17, 177 p.
- THEIS, C. V.; RUSSEL, H. B.; MEYER, R. R. 1963. Estimating the transmissibility of aquifers from the specific capacity of wells. *Methods of Determining Permeability, Transmissibility and Drawdown*. U. S. Geological Survey, *Water Supply Paper*, 1536-I, p. 331-341.
- TODD, D. K. 1959. *Ground water hydrology*. John Wiley & Sons, Inc., Nova York, EUA. 336 p.
- USEPA - U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1987. *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. USEPA, Office of Water, Washington, EUA, EPA-440/5-93-001. 204 p.
- USEPA - U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1991. *Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks*. USEPA, Office of Water, Washington, EUA, EPA 570/9-91-009. 144 p.
- USEPA - U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1993. *A review of methods for assessing aquifer sensitivity and ground water vulnerability to pesticide contamination*. USEPA, Office of Water, 813-R-93-002. 183 p.
- USEPA - U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1994. *Ground water and wellhead protection. Handbook*. USEPA, Office of Research and Development, Washington, EUA, EPA/625/R-94/001. 269 p.
- VESPUCCI, J. B. O. 1984. *Sistemas deposicionais e evolução tectono-sedimentar da Bacia de Taubaté, SP*. (Dissertação de Mestrado, IGc/USP, inédita). 98 p.

- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. (eds.) 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Association of Hydrogeologists, Hannover. International Contributions to Hydrogeology, vol. 16, 131 p.
- WALTON, W. C. 1992. *Groundwater modeling utilities*. Lewis Publishers, Inc., EUA, 640 p.
- WARD, R. C. & ROBINSON, M. 1990. *Principles of hydrology*. McGraw Hill Publishing Company, Inglaterra. 365 p.
- WHI - WATERLOO HYDROGEOLOGIC INC. sem data. *Aquifer Test. User's manual*. Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Canadá. 176 p.
- WITTEN, J.; HORSLEY, S.; SANJAY, J.; FLANAGAN, E. K. 1995. *A guide to wellhead protection*. EPA/APA, EUA, 103 p.
- XIANG, J. 1996. Evaluation of hydraulic conductivity of Carson County Well Field, Amarillo, Texas. *Ground Water*, 34 (6): 1042- 1049.

ANEXOS

Anexo 1 – Cadastro de poços tubulares profundos do município de Caçapava.

*	Poço	Proprietário	Ano perf.	coordenadas UTM (m)		coordenadas do modelo (m)		profundidade (m)	NE (m)	ND (m)	vazão (m³/h)	Q/s (m³/h/m)	Aquífero explorado
				E	N	eixo x	eixo y						
1	PA1	MAFERSA S.A.	1979	429350	7445220	14454	8762	165	14.7	36.7	144.0	6.55	Sedimentar
1	PA2	MINISTÉRIO DO EXÉRCITO- CRO-02	1992	427340	7445400	12866	10007	66	40.6	48.9	33.0	3.97	Sedimentar
0	PA3	COMERCIAL IMOBILIÁRIA CHEQUER	1994	426380	7442000	10209	7679	125	90.6	100.3	15.8	1.63	Sedimentar
0	PA4	DERSA - PEDÁGIO	1994	428620	7439106	10512	4031	140	52.6	54.0	10.3	7.40	Sedimentar
1	PA5	ASSOC. FISCAIS DE RENDA DE SP	1996	424540	7439840	7490	6869	102	54.8	92.0	7.2	0.19	Sedimentar
1	PA6	TRAMBUSTI NAUE	1988	426480	7443145	10917	8584	122	57.5	59.7	16.9	7.59	Sedimentar
1	PA7	BLINDEX	1992	424525	7442390	8866	9016	168	42.1	61.2	68.5	3.59	Sedimentar
0	PA8	TRAMBUSTI NAUE	1978	426440	7443049	10831	8526	154	45.0	49.0	18.7	4.68	Sedimentar
1	PA9	ENGEMAB ENG. E COMÉRCIO LTDA	1996	426670	7440000	9363	5843	100	72.2	85.0	6.1	0.47	Sedimentar
0	PA10	COMERCIAL INTERTECH DO BRASIL	1989	426780	7443360	11285	8601	100	53.5	60.4	13.0	1.88	Sedimentar
1	PA11	CEBRACE	1987	422710	7441630	6930	9367	167	43.3	62.1	82.2	4.37	Sedimentar
1	PA12	CEBRACE	1989	423050	7441730	7269	9266	166	44.4	55.0	86.5	8.16	Sedimentar
1	PA13	RICARDO DE CAMPOS FERRAZ	1989	424880	7444950	10558	10970	60	3.7	9.4	9.9	1.72	Sedimentar
1	PA14	BLINDEX	1987	424470	7442410	8831	9063	146	33.0	42.0	22.0	2.44	Sedimentar
1	PA15	PROVIDRO	1990	423210	7441500	7278	8986	170	43.0	60.3	117.0	6.76	Sedimentar
1	PA17	FUJI PHOTO FILM DO BRASIL LTDA	1991	422570	7440865	6396	8802	200	36.0	49.3	123.9	9.35	Sedimentar
1	PA18	AUTO POSTO VALE 132	1995	426218	7442956	10594	8569	104					Sedimentar
1	PA19	TONOLLI	1978	429860	7443950	14193	7420	181	11.0	23.0	46.6	3.88	Sedimentar
1	PA23	VIAPOL IND. E COM.	1989	432520	7448560	18931	9836	155	50.2	67.0	15.8	0.94	Sedimentar
1	PA24	CHEVALE DISTRIBUIDORA VEÍCULOS	1974	428320	7445100	13524	9222	158	10.5	34.0	24.0	1.02	Sedimentar
1	PA25	NESTLÉ	1979	426420	7443780	11212	9150	180	45.2	53.5	55.4	6.71	Sedimentar
0	PA26	MAFERSA S.A.	1900	429110	7445170	14225	8850	139	1.0	28.0	34.4	1.27	Sedimentar
0	PA27	BENJAMIM ELIAS	1970	425120	7438700	7360	5606	135	6.0	33.0	6.0	0.22	Sedimentar
0	PA28	PAULO MINDELO	1973	429150	7442150	12597	6282	116	20.0	27.0	32.0	4.57	Sedimentar
1	PA29	CIFET	1975	426930	7443390	11427	8545	131	3.0	47.0	12.0	0.27	Sedimentar
1	PA31	BRASINCA - TRIMTEC	1973	425950	7443000	10393	8751	149	33.5	48.0	90.0	6.21	Sedimentar
1	PA32	CODEMA	1974	427020	7443690	11666	8747	125	10.0	54.0	26.6	0.61	Sedimentar

Anexo 1 – Cadastro de poços tubulares profundos do município de Caçapava (cont.).

*	Poço	Proprietário	Ano perf.	Coordenadas UTM (m)		coordenadas do modelo (m)		profundidade (m)	NE (m)	ND (m)	vazão (m3/h)	Q/s (m3/h/m)	Aquífero explorado
				E	N	Eixo x	Eixo y						
0	PA34	MINISTÉRIO DO EXÉRCITO-CRO-02	1966	427340	7445370	12850	9982	65	8.0	18.0	60.0	6.00	Sedimentar
1	PA35	NESTLÉ	1954	426630	7443530	11252	8826	156	8.2	16.8	40.0	4.65	Sedimentar
1	PA36	NESTLÉ	1970	426528	7443641	11227	8974	160	28.5	43.0	60.0	4.14	Sedimentar
1	PA37	YOSHIRO DO BRASIL IND. QUIMICA	1974	425820	7442980	10273	8805	120	30.0	48.0	36.0	2.00	Sedimentar
0	PA38	CIA. ANTÁRTICA PAULISTA	1989	425370	7443000	9907	9067	191	36.7	46.4	49.3	5.09	Sedimentar
0	PA39	CIA. ANTÁRTICA PAULISTA	1979	425330	7442950	9846	9047	200	36.0	43.0	39.1	5.59	Sedimentar
0	PA40	PROVIDRO	1962	422960	7441540	7090	9155	249	7.0	45.0			Sedimentar
0	PA41	PROVIDRO	1962	423250	7441520	7323	8981	242	20.0	70.0			Sedimentar
0	PA42	MAFERSA S. ^a	1958	429170	7445150	14265	8801	123	11.0	16.0	102.0	20.40	Sedimentar
0	PA43	MAFERSA S. ^a	1958	429210	7445180	14314	8804	100	11.0	16.0	102.0	20.40	Sedimentar
1	PA44	ASSOC. ATLÉTICA CAÇAPAVENSE	1995	427820	7444920	13008	9342		23.0	58.0	12.8	0.37	Sedimentar
0	PA45	ASSOC. ATLÉTICA CAÇAPAVENSE		427820	7444890	12992	9318						Sedimentar
1	PA46	PASSARO MARROM	1994	427440	7444370	12390	9089						Sedimentar
1	PA47	CLUBE SUBT. E SARGENTOS	1993	428540	7445590	13975	9514	76	20.0	38.0	8.0	0.44	Sedimentar
1	PA48	MECANICA CACAPAVA	1990	425320	7442720	9713	8859						Sedimentar
1	PA49	KEIPER ACIL – ANTIGA TADANO		425130	7442790	9590	9023	115	12.0	47.0	13.5	0.39	Sedimentar
1	PA50	HUBNER	1983	425240	7443120	9866	9241	68	9.0	15.9	4.8	0.70	Sedimentar
1	PA51	MASA ALSTHOM – desativada	1983	425410	7443740	10345	9668	76	6.0	40.0	13.2	0.39	Sedimentar
1	PA52	CLEV – ESPANSO		424725	7442730	9218	9191	94			7.0		Sedimentar
1	PA53	PEDRO ARMIGLIATO	1989	424950	7442610	9344	8970	54					Sedimentar
1	PA54	REFREX		425200	7443170	10694	8759						Sedimentar
1	PA55	REPROCESSA				15394	7177						Sedimentar
0	PA56	SULLAIR				10061	8611						Sedimentar
1	PA57	CAMPERSPORT											Sedimentar
0	PA58	GALVANOPLASTIA											Sedimentar
0	PF1	PREFEITURA MUNICIPAL											
1	PF2	PREFEITURA MUNICIPAL	1993	427380	7443580	11908	8459	101	61.1	72.6	9.6	0.84	Sedimentar

Anexo 1 – Cadastro de poços tubulares profundos do município de Caçapava (cont.).

*	Poço	Proprietário	Ano perf.	Coordenadas UTM (m)		coordenadas do modelo (m)		profundidade (m)	NE (m)	ND (m)	vazão (m³/h)	Q/s (m³/h/m)	Aquífero explorado
				E	N	Eixo x	Eixo y						
1	PF3	PREFEITURA MUNICIPAL	1994	426310	7440790	9491	6702	102	47.0	70.0	5.0	0.22	Sedimentar
1	PF4	PREFEITURA MUNICIPAL	1994	429980	7438300	11213	2615	106	29.0	40.6	9.3	0.80	Sed. + Crist.
1	PF5	PREFEITURA MUNICIPAL	1995	433500	7439570	14857	1763	122	44.0	94.0	5.0	0.10	Sed. + Crist.
1	PF6	PREFEITURA MUNICIPAL	1993	422960	7442250	7477	9751	113	34.0	42.6	4.7	0.54	Sedimentar
0	SA1	SABESP											
0	SA2	SABESP											
1	SA3	SABESP	1965	427580	7444250	12441	8912	100	9.0	14.0	66.0	13.20	Sedimentar
0	SA4	SABESP											
0	SA5	SABESP	1963	428950	7445670	14363	9357	107	4.0	20.0	20.0	1.25	Sedimentar
0	SA6	SABESP											
0	SA7	SABESP	1971	427500	7444470	12494	9140	151	16.0	89.0	53.3	0.73	Sedimentar
0	SA8	SABESP											
0	SA9	SABESP	1972	427360	7444790	12551	9485	99	9.0	18.7	107.1	11.01	Sed. + Crist.
0	SA10	SABESP											
0	SA11	SABESP	1972	427440	7443970			118	23.0				Sedimentar
0	SA12	SABESP	1976	427830	7443480	12231	8130	150	16.9	35.9	107.0	5.63	Sedimentar
1	SA13	SABESP	1979	428210	7444020	12844	8376	180	27.0	65.7	88.0	2.28	Sedimentar
0	SA14	SABESP	1979	427280	7442320	11138	7457	165	32.5	47.7	99.0	6.52	Sedimentar
0	SA15	SABESP	1982	427440	7443970	12171	8753	140	33.3	86.2	49.5	0.94	Sed. + Crist.
0	SA16	SABESP	1984	427460	7441550	10870	6713	202	38.2	52.7	87.4	6.03	Sedimentar
0	SA16A	SABESP											
0	SA17	SABESP	1989	428770	7444870	13777	8784	207	44.0	60.0	101.7	6.35	Sedimentar
1	SA18	SABESP	1988	429680	7444910	14562	8322	220	25.7	49.7	132.7	5.52	Sedimentar
1	SA19	SABESP	1989	429950	7444420	14521	7764	229	41.9	70.1	117.7	4.18	Sedimentar
1	SA20	SABESP	1988	426500	7444490	11666	9702	94	44.9	72.9	87.1	3.11	Sed. + Crist.
1	SA21	SABESP	1991	427330	7444790	12525	9501	91	42.4	80.3	89.9	2.37	Sed. + Crist.
1	SA21A	SABESP	1991	427510	7441570	10923	6703	203	47.1	62.3	122.9	8.07	Sedimentar
1	SA22	SABESP	1991	427280	7442320	11138	7457	164	53.8	79.4	110.7	4.33	Sedimentar
1	SA23	SABESP	1995	427830	7443480	12231	8130	193	56.4	73.7	80.6	4.65	Sedimentar
1	SA24	SABESP	1995	428020	7443310	12298	7884	192	78.0	96.7	104.1	5.58	Sedimentar
1	SA25	SABESP	1995	428360	7442700	12251	7187	205	72.2	97.1	103.2	4.15	Sedimentar
0	SA26	SABESP	1996	428600	7442100	12126	6552		44.2	101.0	40.0	0.70	Sedimentar
0	SA27	SABESP	1997	428210	7444030	12849	8385		84.8	91.5	80.0	11.90	Sedimentar
1	SACV1	SABESP	1978	433630	7443150	16916	4694	150	17.1	73.9	19.3	0.34	Sedimentar

Anexo 1 – Cadastro de poços tubulares profundos do município de Caçapava (cont.).

*	Poço	Proprietário	Ano perf.	Coordenadas UTM (m)		coordenadas do modelo (m)		profundidade (m)	NE (m)	ND (m)	vazão (m³/h)	Q/s (m³/h/m)	Aquífero explorado
				E	N	Eixo x	Eixo y						
1	SACV2	SABESP	1989	434000	7443370	17346	4677	252	30.3	131.9	10.6	0.10	Sedimentar
1	SACV3	SABESP	1995	434050	7443820	17633	5028	250	36.3	62.7	36.0	1.36	Sedimentar
0	SAGU1	SABESP											
1	SAGU2	SABESP	1978	425350	7435500	5805	2788	49	13.2	44.2	3.2	0.10	Sed. + Crist.
0	SAGU3	SABESP	1979	426064	7436931	7183	3600	150	40.7	116.0	1.7	0.02	Sed. + Crist.
0	SAGU4	SABESP	1980	425143	7435593	5682	2979	123	25.2	94.2	4.3	0.06	Sed. + Crist.
1	SAGU5	SABESP	1990	425130	7436670	6258	3889	170	51.6	114.5	7.3	0.12	Sed. + Crist.
1	SAGU6	SABESP	1992	424570	7435870	5352	3523	204	56.1	90.8	9.7	0.28	Sed. + Crist.
0	SAGU7	SABESP	1997	424910	7437080	6296	4354	250	58.8	99.0	26.6	0.66	Sed. + Crist.
1	SAVM1	SABESP	1992	422560	7442280	7158	9994	198	34.9	97.3	90.8	1.46	Sedimentar

Obs: * 1 – poços ativos em maio/1996

0 – poços desativados em maio/1996

Anexo 2 – Cadastro das indústrias potencialmente contaminantes do município de Caçapava.

Nº	NOME	Área (m ²)	ATIVIDADE	UTM E (m)	UTM N (m)	Disposição de efluentes	Disposição de resíduos	Início de operação
IN1	Walbro Automotivo do Brasil Ltda	35920	Fabricação de peças de polietileno por extrusão	428800	7444570	infiltração	não adequada	Jan-97
IN2	Rowa Indústria e Comercio de Aparelhos Térmicos Ltda	6000	Fabricação de radiadores	428225	7444170		não adequada	Abr-87
IN3	MAFERSA	457000	Fab. rodas e eixos ferroviarios	429200	7445300	Rib. dos mudos	não adequada	Jan-57
IN4	Trambusti Simolde Ind. Com. Ltda.	247000	Fab. Pecas para acabamento de interior de autos	426520	7443170	infiltração	não adequada	
IN5	Refrex Brasil Ind. Com. Ltda.	6000	Prod. pecas e acessorios p/ refrigeracao	426200	7443150		não adequada	
IN6	Yushiro do Brasil Ind. Quim. Ltda.	26670	Prod. quimicos, oleos	425770	7442920	córrego	não adequada	Jan-89
IN7	Sullair S/A	61570	Fab. maq. Industriais	425400	7442720	infiltração	não adequada	Mai-97
IN8	Espanso Componentes para Veiculos Ltda.	30740	Fab. Mat. Plastico	424720	7442800		não adequada	
IN9	Fanta Plastics Ind. Com. Ltda.	59300	Fab. Produtos plasticos	424700	7442920		não adequada	Out-95
IN10	Tonolli do Brasil Ind. Com. de Metais	-	Recuperacao de metais nao-ferrosos	429800	7443750	infiltração, Rib. dos Mudos	não adequada	
IN11	Fae S/A Ind. Com. De Metais	138997	Fundicao de chumbo	431310	7444380	Córrego Germana	adequada	Jan-78
IN12	Reprocessa Residuos Industriais Ltda.	31800	Fabr. Produtos quimicos inorganicos	431000	7444400	Córrego Germana	não adequada	
IN13	Blinde Vidros de Seguranca Ltda. - PROVIDRO	37026	Fabr. vidros laminados, temperados espelhados	423300	7441600	Córrego Divisa	adequada	Jan-90
IN14	Cebrace Cia. Brasileira de Cristais	450000	Fabr. vidros planos	422700	7441540	Córrego Divisa	adequada	
IN15	Fuji Photo Film do Brasil Ltda.	750250	Fabr. Material fotografico	422450	7440800	Córrego Divisa	adequada	Jan-94
IN16	Viapol Impermeabilizantes Ltda.	60000	Benef. com. de mantas asfalticas impermeabil.	432620	7448500		não adequada	Jan-90
IN17	Campersport Brasil Ind. Com. Ltda.	50000	Fabr. maquinas e material de camping	425900	7448000	infiltração	não adequada	Jan-79

Anexo 3 – Cadastro das áreas com tanques de armazenamento de combustíveis e outros líquidos perigosos do município de Caçapava.

Nº	RAZÃO SOCIAL	ENDERECO	UTM E (m)	UTM N (m)
AT1	ABC Transportes Coletivos Vale do Paraíba Ltda. (Viação Passaredo)	Rua Barreto Leme, s/n	428400	7444280
AT2	Auto Posto Caçapava	Rua D. Pedro II, 165, Centro	428120	7445100
AT3	Auto Posto Giluma Ltda.	Rua G. Dias, 11	428420	7445570
AT4	Auto Posto Pai João	Rodovia Presidente Dutra, km 133 (Sentido SP-RJ)	425625	7442720
AT5	Auto Posto Pioneiro (Posto Zizinho)	Praca Getúlio Vargas, s/n	427940	7445030
AT6	Auto Posto Presidente Dutra (Posto Tigrão)	Rodovia Presidente Dutra, km 133, sentido RJ-SP	425400	7442670
AT7	Auto Posto Rodrigues e Mira Ltda. (Auto Posto Vale 123)	Rodovia Presidente Dutra, km 132, sentido SP-RJ	426200	7443000
AT8	Auto Posto Sobradão	Av. Brasil, 480	427350	7444500
AT9	Auto Posto Sobradão	Av. Brasil	427350	7444600
AT10	Auto Posto Vasconcelos	Rua Ten. Mesquita, 254	427480	7445780
AT11	Jotão - Auto Posto J. Machado Ltda. (Posto São Paulo)	Rua Marques do Herval, 316	427850	7445020
AT12	Garagem da Prefeitura	Rua José Benedito de Araújo	428270	7444850
AT13	Auto Posto Nhozinho	Av. Dr. Jose de Moura Rezende	426700	7444760
AT14	Inativo	Rua do Porto	427240	7447000
AT15	Jotão - Auto Posto J. Machado Ltda. (Auto Posto Macaco)	Rod. Presidente Dutra, km 136, Sentido SP-RJ	423358	7441539
AT16	Viação Transvida	Av. Henry Nestlé, 40	426325	7443225
AT17	Laurentino Marcondes Transporte de Resíduos Industriais	R. Dr. Odilon de Souza Miranda, s/n, Centro	427550	7444710
AT18	Posto Avenida	Av. Cel. Manoel Inocêncio, 834	427920	7444490
AT19	Posto São João	Rua Marques do Herval, 2	427550	7445000
AT20	a instalar	Rua do Porto	427210	7447220
AT21	Lambari Envazilhadora de Derivados de Petróleo Ltda.	Estrada de Caçapava, 1353, Bairro Campo Grande	430890	7444850
AT22	Viação Breda	Estrada Municipal Borda da Mata	428020	7443470
AT23	Transauto	Estrada Velha São Paulo-Rio	432070	7448460
AT24	Viação Redenção	Marginal Rodovia Presidente Dutra, sentido SP-RJ	428800	7444570