UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE FLUXO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS EM UM AQÜÍFERO LIVRE E RASO: APLICAÇÃO NO
PARQUE ECOLÓGICO DO TIETÊ – SÃO PAULO**

Luiz Carlos Kauffman Marasco Ferrari

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

2006

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	1
LISTA DE FIGURAS	2
LISTA DE TABELAS.....	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Aquífero livre e raso	9
1.2. Um exemplo de aquífero livre e raso: descrição e dados preliminares	9
1.3. Caracterização do problema	11
2. OBJETIVOS	13
3. ÁREA DE ESTUDO	14
3.1. Localização da Área	14
3.2. Contexto Geológico Regional	14
3.3. Contexto Hidrogeológico Regional	15
3.4. Contexto Hidrogeológico Local	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1. Instalação de poços	17
a) Localização e disposição dos novos poços	17
b) Perfuração e instalação dos poços	19
4.2. Amostragem de Solo	23
a) Dificuldades encontradas	26
4.3. Análises Granulométricas	26
4.4. Levantamento Topográfico	28
4.5. Dados Meteorológicos	28
4.6. Medições dos Níveis d'Água	29
4.7. Ensaio de Permeabilidade	29
5. RESULTADOS	30
5.1. Descrição da área e parâmetros gerais	30
5.2. Topografia	41
5.3. Precipitações	42
5.4. Variação temporal das cargas hidráulicas	43
5.5. Condutividades hidráulicas	49
5.5.1. Resultados dos Bail-Tests	49
5.5.2. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica	57
6. MODELO NUMÉRICO ESTACIONÁRIO	59
6.1. Escolha da campanha para o modelo estacionário	59
6.2. Condições de contorno, volume modelado e discretização espacial	60
6.3. Parâmetros hidrogeológicos	64
6.3.1. Calibração Automática	64
6.3.2. Recarga e evapotranspiração	65
6.3.3. Condutividades hidráulicas	66
6.3.4. Procedimento de calibração	74
6.3.5. Processamento do modelo	76
a) Parâmetros de processamento	76
b) Análise da qualidade do modelo	76

6.3.6.	Resultados	77
7.	MODELO NUMÉRICO TRANSIENTE	83
7.1.	Escolha do período simulado	83
7.2.	Condições de contorno, volume modelado e discretização espacial.	85
7.3.	Condição inicial.	86
7.4.	Procedimento inicial de calibração do modelo estacionário	86
7.5.	Processamento do modelo.....	90
7.6.	Apresentação e discussão dos resultados	92
7.6.1.	Erros de calibração.	92
7.6.2.	Sensibilidade dos parâmetros calibrados.....	96
7.6.3.	Condutividades hidráulicas e recargas	101
7.6.4.	Padrões potenciométricos.....	105
7.6.5.	Balanço de fluxo	117
8.	CONCLUSÕES	118
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

AGRADECIMENTOS

Muito embora a conclusão de um doutoramento pareça, à primeira vista, ser uma odisséia pessoal, ela apenas se concretiza graças ao suporte técnico, financeiro e sentimental de uma série de pessoas. Aproveito esta página para prestar os meus agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Ricardo Hirata, pela orientação, amizade e por ter me mostrado que existe lugar na hidrogeologia para um físico.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo auxílio financeiro por meio de verba de auxílio à pesquisa.

Aos meus familiares pelo incentivo e dedicação.

Aos amigos do LAMO, Alessandro Cesarino, Carlos Maldaner, Claudia Varnier, Jeane Gláucia dos Santos, Juliana Baitz Viviani, Marcos Mondin e Ingo Wahnfried pelas discussões científicas, mas principalmente pela amizade.

À Alexandra, pelo carinho, compreensão e confiança.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Poços perfurados próximos ao Casarão, Centro de Lazer Engenheiro Goulart – Parque Ecológico do Tietê.....	12
Figura 2. Tubos de fluxo hipotéticos para períodos seco e úmido (Varnier e Hirata, 2000).	13
Figura 3. Localização da área de estudo (Mondin, 2005).	14
Figura 4. Visão em planta da malha de novos poços (marcados em vermelho).....	18
Figura 5. Esquema da disposição tridimensional dos novos poços na área de estudo. Os segmentos em verde representam os filtros e, à superfície do terreno, foi atribuída arbitrariamente a cota $z = 10\text{m}$	19
Figura 6. Perfuratriz rotativa hidráulica montada sobre esteiras.	20
Figura 7. Trados ocios empregados na perfuração.	20
Figura 8. Seção filtrante do revestimento de PVC geomecânico de 50mm de diâmetro.....	21
Figura 9. Bentonita em pó acondicionada em sacos de PVC.....	21
Figura 10. Seção filtrante do revestimento de polipropileno de 1” de diâmetro.....	22
Figura 11. Perfil construtivo esquemático dos novos poços instalados na área do PET- EG.....	22
Figura 12. Conjunto multinível recém-instalado.....	23
Figura 13. <i>Liner</i> no interior do tubo amostrador.	24
Figura 14. Ponteira externa.....	24
Figura 15. Tubo amostrador com ponteiras interna e externa.	25
Figura 16. Máquina do tipo <i>Geoprobe</i> empregada para cravação do tubo amostrador.	25
Figura 17. Posição esquemática das sondagens realizadas através do método <i>direct push system</i>	26
Figura 18. Descrição da litologia observada nos pontos P1, P2 e P3.	32
Figura 19. Descrição da litologia observada nos pontos P4, P5 e P6.	32
Figura 20. Descrição da litologia observada nos pontos P7, P8 e P9.	33
Figura 21. Descrição da litologia observada nos pontos P10, P11 e P12.	33
Figura 22. Descrição da litologia observada nos pontos P13, P14 e P15.	34
Figura 23. Descrição da litologia observada nos pontos P16, P17 e P18.	34
Figura 24. Descrição da litologia observada nos pontos P19, P20 e P21.	35
Figura 25. Descrição da litologia observada nos pontos P22, P23 e P24.	35
Figura 26. Descrição da litologia observada nos pontos P25, P26 e P27.	36
Figura 27. Descrição da litologia observada nos pontos P28, P29 e P30.	36
Figura 28. Localização das seções verticais construídas através da descrição dos <i>liners</i>	37
Figura 29. Seção vertical segundo o segmento A – A’ da figura 28.	37
Figura 30. Seção vertical segundo o segmento B – B’ da figura 28.	38
Figura 31. Seção vertical segundo o segmento C – C’ da figura 28.	38
Figura 32. Seção vertical segundo o segmento D – D’ da figura 28.	39
Figura 33. Seção vertical segundo o segmento E – E’ da figura 28.....	39
Figura 34. Seção vertical segundo o segmento F – F’ da figura 28.	40
Figura 35. Seção vertical segundo o segmento G – G’ da figura 28.....	40
Figura 36. Seção vertical segundo o segmento H – H’ da figura 28.....	41
Figura 37. Topografia da superfície da área de estudo (coordenadas e escala em metros).	42
Figura 38. Total mensal de precipitação (Mondin, 2005).	43
Figura 39. Dados de carga hidráulica média dos poços nas profundidades de 3, 6 e 10m (Mondin, 2005).....	45
Figura 40. Mapas potenciométricos para 29 de janeiro de 2003 nas profundidades 3m (a), 6m (b) e 10m (c). 46	
Figura 41. Mapas potenciométricos para 28 de junho de 2003 nas profundidades 3m (a), 6m (b) e 10m (c). ..	47
Figura 42. Mapas de isovalores para o desvio padrão entre as cargas de diferentes níveis para as campanhas de 29 de janeiro (a) e 28 de junho (b) de 2003.....	48
Figura 43. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas.	54
Figura 44. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas na camada 3.	56
Figura 45. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas na camada 5.	56
Figura 46. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas na camada 7.	57
Figura 47. Semi-variograma experimental para dados de $\ln(K)$ na camada 3.	58
Figura 48. Semi-variograma experimental para dados de $\ln(K)$ na camada 5.	58
Figura 49. Semi-variograma experimental para dados de $\ln(K)$ na camada 7.	59
Figura 50. Área modelada.	61
Figura 51. Condições de contorno do tipo I para a parede norte do modelo estacionário.	62
Figura 52. Condições de contorno do tipo I para a parede sul do modelo estacionário.....	62
Figura 53. Condições de contorno do tipo I para a parede leste do modelo estacionário.	62
Figura 54. Condições de contorno do tipo I para a parede oeste do modelo estacionário.	63

Figura 55. Condições de contorno do tipo I para a parede inferior do modelo estacionário.	64
Figura 56. Zonas de diferentes intensidades de recarga para ao modelo estacionário.	66
Figura 57. Seção vertical ($y = 11m$) apresentando as camadas litológicas e matemáticas empregadas nas modelagens numéricas.	68
Figura 58. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 1.	69
Figura 59. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 2.	70
Figura 60. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 3.	71
Figura 61. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 4.	72
Figura 62. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 5.	73
Figura 63. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 6.	74
Figura 64. Comparação entre cargas observadas em campo e calculadas pelo modelo estacionário de menor Erro Absoluto Médio.	83
Figura 65. Cargas médias nas camadas litológicas definidas no modelo estacionário para o período de 18 de janeiro a 10 de fevereiro de 2003.	84
Figura 66. Precipitação ocorrida na área de estudo entre os dias 16 de janeiro e 13 de fevereiro de 2003.	85
Figura 67. Zonas de vazões específicas distintas, apresentadas esquematicamente tanto em seção como em planta na camada 1.	89
Figura 68. Zonas de recargas distintas.	90
Figura 69. Discrepância cumulativa do balanço de massa para o período T_2 . O dia 1 da simulação corresponde a 20 de janeiro de 2003.	91
Figura 70. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 1.	102
Figura 71. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 2.	102
Figura 72. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 4.	103
Figura 73. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 5.	103
Figura 74. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 6.	104
Figura 75. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	107
Figura 76. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	107
Figura 77. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	107
Figura 78. Mapa potenciométrico da camada matemática 1 gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	107
Figura 79. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	107
Figura 80. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	107
Figura 81. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	108
Figura 82. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	108
Figura 83. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	108
Figura 84. Mapa potenciométrico da camada matemática 2 gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	108
Figura 85. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	108
Figura 86. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).	108

Figura 117. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	114
Figura 118. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	114
Figura 119. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	114
Figura 120. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	114
Figura 121. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	114
Figura 122. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	114
Figura 123. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	115
Figura 124. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	115
Figura 125. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	115
Figura 126. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	115
Figura 127. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	115
Figura 128. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	115
Figura 129. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	116
Figura 130. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	116
Figura 131. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	116
Figura 132. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	116
Figura 133. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	116
Figura 134. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).....	116
Figura 135. Vazões de entrada de água subterrânea no volume modelado.	117
Figura 136. Vazões que entram na camada 1 por recarga residual e que deixam a camada 1 em direção à camada 2.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de condutividade obtidos através dos ensaios de permeabilidade para os poços de 3m de profundidade.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 2. Valores de condutividade obtidos através dos ensaios de permeabilidade para os poços de 6m de profundidade.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3. Valores de condutividade obtidos através dos ensaios de permeabilidade para os poços de 10m de profundidade.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4. Distribuição dos poços com seções filtrantes em cada uma das camadas litológicas. Nos poços entre parêntesis não foi possível realizar <i>bail-test</i>	Erro! Indicador não definido.
Tabela 5. Distribuição dos poços com seções filtrantes em cada uma das camadas litológicas. Nos poços entre parêntesis não foi possível realizar <i>bail-test</i>	Erro! Indicador não definido.
Tabela 6. Correlação entre camadas matemáticas e litologias.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 7. Configuração otimizada das condutividades hidráulicas (modelo estacionário).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 7. (continuação)	Erro! Indicador não definido.
Tabela 8. Configuração otimizada das recargas residuais (modelo estacionário).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 9. Configuração alternativa de condutividades hidráulicas (modelo estacionário).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 9. (continuação)	Erro! Indicador não definido.
Tabela 10. Interação entre camadas adjacentes levantada através dos valores de carga média. A letra “a” denota dias de fluxo ascendente, enquanto “d” os de fluxo descendente.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11. Configuração otimizada das condutividades hidráulicas (modelo transiente).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11. (continuação)	Erro! Indicador não definido.
Tabela 12. Configuração otimizada das recargas residuais (modelo transiente). <i>R total</i> representa a soma das recargas ponderadas pela área superficial de cada uma das zonas de recarga.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 13. Configuração otimizada das vazões específicas (modelo transiente).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 14. Erros de calibração do modelo transiente	Erro! Indicador não definido.
Tabela 15. Sensibilidade das condutividades hidráulicas.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 15 – (continuação)	Erro! Indicador não definido.
Tabela 16. Sensibilidade das recargas residuais.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 17. Sensibilidade das vazões específicas.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 18. Sensibilidades médias dos parâmetros do modelo transiente	Erro! Indicador não definido.
Tabela 19. Média dos valores calibrados em cada camada	Erro! Indicador não definido.
Tabela 20. Comparação entre recargas residuais calibradas e P, onde P é a soma da precipitação do dia da comparação e dos dois dias anteriores.	Erro! Indicador não definido.

RESUMO

A importância do estudo de aquíferos livres e rasos se evidencia quando se leva em conta que tais aquíferos são altamente vulneráveis a contaminação e que em geral se encontram em regiões densamente povoadas. Com o objetivo de melhor compreender a dinâmica do fluxo de água subterrânea na zona saturada destas formações aquíferas, foi construído e calibrado um detalhado modelo tridimensional e transiente para representar o fluxo subterrâneo em uma porção de um aquífero livre e raso que ocorre no Parque Ecológico do Tietê, no Município de São Paulo. Este modelo, baseado em dados de cargas hidráulicas de 81 poços de monitoramento instalados em uma área de 320m² medidas diariamente, em valores diários de precipitação na área e em 75 determinações de condutividades hidráulicas, foi construído e executado através do *software Visual MODFLOW* e calibrado por meio do *software PEST*, através de um método de regressão não linear.

Os resultados gerados por este modelo para um evento de recarga rápida indicam que a distribuição de cargas hidráulicas na área de estudo é governada pela recarga regional, pela distribuição das condutividades hidráulicas horizontais e pelas vazões específicas das camadas superiores da formação, mas é praticamente independente da intensidade e distribuição temporal da recarga local, que influencia apenas os níveis mais rasos da formação. Além disso, verifica-se o caráter extremamente dinâmico do fluxo, que responde rapidamente ao evento de recarga regional, apresentando alterações significativas de intensidade e direção no intervalo de apenas alguns dias.

Tais resultados, verificados apenas por meio de um modelo tão detalhado como o produzido neste trabalho, sugerem que estratégias comuns de avaliação podem não ser capazes de avaliar suficientemente bem o comportamento deste tipo de aquífero.

ABSTRACT

The importance of studying unconfined and shallow aquifers is verified when taking into account that these aquifers are highly vulnerable to contamination and that they are often located under heavily populated regions. A detailed three-dimensional and transient model, which represents the groundwater flow in an area of an unconfined and shallow aquifer at the Parque Ecológico do Tietê, in the Municipality of São Paulo, Brazil, was created and calibrated with the objective of enhancing the comprehension of the dynamics of the groundwater flow in the saturated zone of these formations. This model was based on hydraulic head data of 81 monitoring wells, which were installed in an area of 320 m² and measured on a daily basis, on daily values of precipitation occurring in the area and 75 determinations of hydraulic conductivities. The model was created and run using the software *Visual MODFLOW* and calibrated using the software *PEST*, based on a non-linear regression method.

The results generated by this method for an event of rapid recharge indicate that the distribution of the horizontal hydraulic conductivities and by the specific yield of the upper layers of the formation, but it is mostly disconnected from the intensity and temporal distribution of the local recharge, that only influences the shallowest levels of the formation. Furthermore, the extremely dynamic character of the flow can be verified, which responds rapidly to the regional recharge event, presenting significant changes of intensity and direction within only a few days.

These results, which were only observable through a very detailed model such as the one produced and presented in this study, suggest that commonly employed evaluation strategies may not be capable of evaluating this kind of aquifer in a satisfactory way.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aquífero livre e raso

A importância do estudo do fluxo de água subterrânea e do transporte de poluentes em aquíferos livres e rasos se evidencia quando se analisam tais aquíferos quanto a duas importantes características: vulnerabilidade a poluentes e localização geográfica:

- Vulnerabilidade a poluentes: A reduzida espessura da zona não saturada dos aquíferos livres e rasos facilita o transporte de poluentes que possam vir a atingir a zona saturada. (Foster e Hirata, 1988). Em países tropicais a situação é agravada, já que neles a existência de uma estação chuvosa eleva o grau de saturação da zona não saturada, aumentando assim a eficiência do transporte durante os meses de maior pluviosidade.
- Localização geográfica: Os aquíferos livres e rasos são comumente encontrados em planícies aluvionares, geralmente intensamente povoadas. Uma parte considerável da população, principalmente na zona rural, mas também na periferia e nas favelas da zona urbana, é abastecida, através de poços cacimba, de água proveniente da porção superior daqueles aquíferos rasos. Aquela mesma faixa de população emprega fossas sépticas ou negras como meio de eliminação de esgoto e pode eventual e inconscientemente contaminar a própria água que consome.

A associação destes dois fatores é especialmente importante em países como o Brasil, onde aproximadamente 40% da população utilizam fossas rudimentares ou não possuem qualquer sistema de saneamento. Particularmente em favelas, onde é grande a concentração de fossas negras próximas a poços cacimba, estima-se que vivam mais de 1,3 milhão de pessoas apenas no Estado de São Paulo (IBGE, 1991), muitas delas em regiões de nível d'água subterrânea pouco profundo.

1.2. Um exemplo de aquífero livre e raso: descrição e dados preliminares

Uma porção de um aquífero livre e raso intensamente estudada é a que ocorre no Centro de Lazer Engenheiro Goulart, Parque Ecológico do Tietê (PET – EG) na Bacia Sedimentar de São Paulo. Ao longo do projeto “Nitrogênio nas águas subterrâneas: fontes antrópicas, comportamento hidroquímico e manejo” (Hirata, 2000), coordenado pelo Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata, uma área de aproximadamente 1000m², contaminada pelos efluentes de uma fossa séptica que recebe o esgoto do refeitório de funcionários do PET – EG e do

Casarão, onde funcionava até setembro de 2000 o *Centro de Educação Ambiental*, foi monitorada por meio de 71 poços de aproximadamente 3m e de três poços de 5m de profundidade (figura 1). Na área estudada, o aquífero possui níveis estáticos rasos, menores que 3m e associados aos sedimentos quaternários do rio Tietê. Ele é heterogêneo, com condutividades hidráulicas variando de 1×10^{-7} a $7 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (Varnier e Hirata, 2000) e com pequeno gradiente hidráulico (0,035 a 0,065m/m), comum às zonas de planície (Hirata, 2000).

Entre as inúmeras e importantes observações analisadas ao longo daquele projeto, três têm grande relevância para o entendimento do fluxo de água subterrânea em aquíferos livres e rasos (Varnier, 2001):

- Alta heterogeneidade de condutividade hidráulica: Foram realizados *slug-tests* em praticamente todos os poços, sendo observada uma grande variação na condutividade hidráulica mesmo para poços próximos.
- Grandes alterações temporal e espacial nos níveis estáticos dos poços de monitoramento: Além das variações sazonais nos níveis estáticos, já esperadas devido a alternância de períodos de estiagem (abril a outubro) e de chuvas (dezembro a março), variações em intervalos de tempo inferiores a um mês foram comumente observadas. Como exemplo, cita-se o poço 9, que em apenas uma semana no mês de maio de 1999, variou seu nível em 0,93cm. Verificou-se também que as alterações temporais não se distribuíam uniformemente no espaço e que aquela variação espacial não poderia ser explicada somente pela estrutura espacial da condutividade hidráulica, o que sugere recargas diferenciadas no interior da área de estudo.
- Comportamento errático dos poluentes como função do tempo: Alguns poços apresentaram grande diminuição e posteriormente novo aumento em suas concentrações de nitrato e de cloreto ao longo de um ano. Tal comportamento não corresponde ao movimento de plumas em fluxos não transitórios, para quaisquer distribuições espaciais de coeficientes de dispersão e de retardamento. Uma explicação para o fato, sugerida por Varnier e Hirata (2000), seria a possibilidade de recargas intensas nos meses de chuva modificarem o traçado do fluxo de água subterrânea. A figura 2 ilustra esta proposição, mostrando que uma pluma bem monitorada em épocas de estiagem (figura 2a) possivelmente tem grande parte de sua massa desviada para profundidades maiores que as dos filtros dos poços de monitoramento pela recarga nas épocas de chuva (figura 2b), acarretando pequenos valores de concentração nas amostras coletadas naqueles poços. Posteriormente, um novo período de estiagem levaria a configuração do fluxo para a situação anterior, na qual seriam medidos valores altos de concentração.

Um comportamento de fluxo tão intrincado e de forte característica tridimensional trouxe dificuldades na interpretação do grande volume de dados coletados. Separar das observações

os efeitos de fenômenos hidroquímicos dos hidrodinâmicos demandou um grande esforço por parte da equipe que executou aquele projeto e pode-se supor que a mesma dificuldade deverá ser enfrentada em qualquer estudo de contaminação em aquíferos como aquele.

Salienta-se que, dentre os mais diversos aspectos abordados durante aquele projeto, nenhum deles evidencia a área estudada como uma porção não representativa ou especial de um aquífero livre e raso inserido em uma planície aluvionar. Desta forma, não é errado assumir que as propriedades de fluxo e transporte comentadas anteriormente sejam comuns à maioria dos aquíferos de mesma condição.

Além disso, ao menos no Estado de São Paulo, é relativamente comum o estabelecimento de indústrias nas proximidades de rios, seja pela possibilidade do uso de água fluvial na operação de produção dessas indústrias, seja pela facilidade de descarte de rejeitos, ainda que tratados, nessas vias. Esta política acaba por associar atividades potencialmente contaminantes a aquíferos livres e rasos e é comum que as empresas que prestam serviços de investigação ambiental e remediação executem trabalhos neste tipo de aquífero. Tendo em vista os resultados obtidos no projeto “Nitrogênio nas águas subterrâneas: fontes antrópicas, comportamento hidroquímico e manejo” a questão que se insinua é se os procedimentos de monitoramento adotado por essas empresas de investigação são ou não suficientes, seja em termos espaciais, seja em termos temporais, para determinar de modo significativo o comportamento de contaminantes neste tipo de aquífero.

1.3. Caracterização do problema

Devido às complexidades comentadas anteriormente, não há maneira simples de obter uma descrição pormenorizada do movimento de água subterrânea e de poluentes e de empregá-la em previsões do comportamento hidrodinâmico e de transporte para a área de estudo que não seja através de um modelo numérico computacional. Apenas um modelo numérico de grande detalhe pode representar a tridimensionalidade e a transiência do fluxo subterrâneo observado neste tipo de aquífero.

Visando à realização deste modelo detalhado, foram perfurados, em uma área contígua à da figura 1, vinte e sete poços de monitoramento, todos com filtros em três níveis distintos (aproximadamente 3m, 6m e 10m de profundidade), perfazendo um total de 81 pontos de observação, em uma área de 20m X 16m. As cargas hidráulicas observadas nestes 81 poços foram monitoradas diariamente por mais de um ano hidrogeológico, bem como a pluviosidade da área.

Figura 1. Poços perfurados próximos ao Casarão, Centro de Lazer Engenheiro Goulart – Parque Ecológico do Tietê.

Figura 2. Tubos de fluxo hipotéticos para períodos seco e úmido (Varnier e Hirata, 2000).

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais deste projeto foram:

- Produzir um modelo numérico computacional tridimensional e transiente que represente com precisão os fenômenos de fluxo de água subterrânea na zona saturada de um aquífero livre e raso, no caso, aquele que ocorre na área do PET-EG;
- Aprofundar o conhecimento sobre como a estrutura espacial da condutividade hidráulica e a alta variabilidade espacial e temporal da recarga relacionam-se à hidrodinâmica em um aquífero livre e raso, fornecendo assim embasamento para a formulação de estratégias de monitoramento naquele tipo de aquífero.

A confecção de modelos detalhados de aquíferos livres e rasos necessita da coleta de uma grande quantidade de dados relativos à área estudada, o que, de uma maneira geral, dificulta a

existência deste tipo de projeto. Muito embora seja possível argumentar que um aquífero livre e raso possa ser bem monitorado por meio de uma pequena densidade de poços amostrados esparsamente no tempo, tal hipótese ainda não foi apropriadamente comprovada e sua verificação representa um objetivo importante a ser alcançado neste projeto.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização da Área

A área de estudo está situada no Centro de Lazer Engenheiro Goulart- Parque Ecológico do Tietê (PET-EG) que localiza-se no município de São Paulo, divisa com Guarulhos (figura 3).

O PET-EG dista 35km do centro da capital sendo o acesso principal feito através da rodovia Ayrton Senna (SP-70).

Figura 3. Localização da área de estudo (Mondin, 2005).

3.2. Contexto Geológico Regional

A área de estudo está situada na Bacia Sedimentar de São Paulo, a qual integra o Rift Continental do Sudeste do Brasil, em conjunto com outras bacias tafrogênicas continentais,

como a de Curitiba, Taubaté, Resende e Volta Redonda (Riccomini, 1989). O embasamento de idade Proterozóica superior é formado essencialmente por rochas metamórficas (migmatitos, gnaisses graníticos, milonitos, xistos e quartzitos) e granitos sin e pós-tectônicos (Riccomini, 1989). Tal embasamento é coberto pelos sedimentos do Grupo Taubaté, de idade terciária, composto pelas formações Resende, Tremembé, São Paulo, superpostas pela Formação Itaquaquetuba (Riccomini e Coimbra, 1992).

A Formação Resende apresenta depósitos de leques aluviais que gradam para depósitos relacionados a rios entrelaçados. Já a Formação Tremembé corresponde a depósitos lacustres (sedimentos argilosos), enquanto a Formação São Paulo apresenta sedimentos de depósitos de sistema fluvial meandrante. Riccomini (1989) reconheceu duas litofácies principais nessa formação: a primeira composta por arenitos grossos, conglomeráticos e a segunda por arenitos de granulometria média a grossa com granodecrescência até sedimentos mais pelíticos. Na Formação Itaquaquetuba, os tipos de depósitos observados são associados a um sistema fluvial entrelaçado. As coberturas quaternárias presentes na bacia são representadas por coluviões e aluviões em várzeas e terraços baixos.

3.3. Contexto Hidrogeológico Regional

A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê é constituída de dois grandes sistemas aquíferos distintos: o Sistema Aquífero Cristalino, formado pelas rochas fraturadas/alteradas do embasamento da bacia, e o Sistema Aquífero Sedimentar, formado pelos sedimentos das formações presentes na bacia.

Sistema Aquífero Cristalino

Este sistema aquífero está desenvolvido no embasamento proterozóico da Bacia de São Paulo. O sistema de fluxo da água subterrânea por este sistema ocorre pela percolação da água através dos interstícios, gerados na rocha por meio da ação intempérica, e pelo fluxo da água nas fraturas existentes na rocha.

É possível distinguir duas unidades aquíferas nesse sistema avaliando-se o comportamento hidráulico. A primeira é de natureza livre, formada pela porosidade granular das rochas intemperizadas sendo bastante heterogênea, ao passo que a segunda é formada pelas fraturas e falhas sendo, portanto, heterogênea e anisotrópica. As duas unidades muitas vezes mostram-se conectadas hidráulicamente (Hirata e Ferreira, 2001), apresentando uma porosidade efetiva média da ordem de 0,03 (SABESP/CEPAS, 1994).

Do ponto de vista econômico, esse sistema aquífero apresenta baixa produtividade com uma capacidade específica média da ordem de $0,34\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, mas com condições de exploração (DAEE, 1975).

Sistema Aquífero Sedimentar

O sistema aquífero sedimentar da Bacia de São Paulo é formado pelos sedimentos terciários, das Formações São Paulo e Resende Membro Inferior e Superior (Riccomini e Coimbra, 1992), e pelos sedimentos quaternários depositados pelos rios principais e tributários menores.

Esse sistema aquífero é heterogêneo, como pode ser observado pelos testes de bombeamento realizados na Cidade Universitária por Iritani (1993), em que os valores de condutividade hidráulica variaram entre 3×10^{-3} e $7 \times 10^{-7} \text{cm/s}$. Suas características são de aquífero livre a semi-confinado, apresentando uma porosidade efetiva média de 0,06 (SABESP/CEPAS, 1994).

O Sistema Aquífero Sedimentar pode ser dividido em duas unidades aquíferas: uma associada à Formação São Paulo, com uma capacidade específica média de $0,48\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, e outra associada à Formação Resende, com capacidade específica média de $0,91\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ (Hirata e Ferreira, 2001).

A Formação Itaquaquecetuba, que apresenta condições aquíferas para exploração (Iritani, 1993), possui ligações hidráulicas com a Formação São Paulo, o que não permite diferenciá-las como aquíferos distintos.

3.4. Contexto Hidrogeológico Local

A área de estudo é formada por sedimentos aluvionares quaternários do rio Tietê. Este sedimento é composto por areias finas a grossas e camadas de material argiloso contendo matéria orgânica (Emplasa, 1984 *in* Ross, 1991).

O aquífero é livre e raso, com o nível freático variando de 2,70m (na época de estiagem) a 1,30m (na época de chuvas) da superfície do terreno, e heterogêneo quanto à condutividade hidráulica, que varia de 1×10^{-7} a $7 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (Varnier e Hirata, 2000) na profundidade de 3m.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Instalação de poços

Apesar do grande número de poços instalados na área, o caráter tridimensional de fluxo sugerido pelos resultados apresentados no projeto “Nitrogênio nas águas subterrâneas: fontes antrópicas, comportamento hidroquímico e manejo” (Hirata, 2000), não poderia ser observado por estes poços, já que todos possuem aproximadamente a mesma profundidade (3m). Para um monitoramento preciso do fluxo, decidiu-se pela instalação de uma rede de poços multiníveis na área.

a) *Localização e disposição dos novos poços*

A escolha da localização e da disposição da rede de poços levou em consideração os seguintes fatores:

- *Proximidade dos poços já existentes.* Procurou-se uma área contígua à dos poços perfurados no projeto “Nitrogênio nas águas subterrâneas: fontes antrópicas, comportamento hidroquímico e manejo” (Hirata, 2000) para que os fenômenos já observados e todo o conhecimento adquirido sobre a área pudessem ser úteis na modelagem numérica.
- *Instalação em uma malha retangular equiespaçada.* Os processos de avaliação que foram aplicados na determinação da estrutura espacial dos parâmetros hidrogeológicos necessários à modelagem numérica são consideravelmente facilitados quando os pontos de amostragem (no caso, os poços) desses parâmetros estão dispostos em uma malha equiespaçada quadrada ou retangular, quando vista em planta. O tamanho da área retangular foi definido em 20 X 16m, por possuir a mesma escala e eventualmente a mesma representatividade hidrogeológica da área dos antigos poços e por ser a maior área retangular contígua à rede já instalada e livre da presença de árvores de grande porte e construções.
- *Instalação de poços em três níveis.* Optou-se por instalar em cada ponto da malha retangular um poço com filtros em três níveis. Um filtro a 3m de profundidade, uma vez que essa é a profundidade média dos poços já instalados e que observaram os fenômenos a serem explicados pela modelagem. Outro filtro colocado a 10m de profundidade, pois segundo as sondagens realizadas na área, abaixo desta profundidade ocorre uma camada de argila rija, possivelmente pouco permeável e que poderia ser usada como base do aquífero a ser modelado e, finalmente um terceiro filtro, a 6m de profundidade. Obviamente

mais níveis de observação seriam desejáveis neste projeto. Todavia, a instalação desses níveis adicionais redundaria em maiores diâmetros de perfuração e temeu-se que a proximidade entre perfurações de grande diâmetro pudesse simplesmente descaracterizar o aquífero.

Tendo em vista esses fatores, foi definida uma malha com 30 pontos, mostrada em planta na figura 4 e esquematicamente em três dimensões, na figura 5.

Figura 4. Visão em planta da malha de novos poços (marcados em vermelho).

Figura 5. Esquema da disposição tridimensional dos novos poços na área de estudo. Os segmentos em verde representam os filtros e, à superfície do terreno, foi atribuída arbitrariamente a cota $z = 10\text{m}$.

b) *Perfuração e instalação dos poços.*

Os poços foram perfurados pela empresa *American Drilling do Brasil*, através de uma perfuratriz rotativa hidráulica montada sobre esteiras (figura 6), empregando trados ocos de $10\frac{1}{2}$ polegadas de diâmetro e 1,20m de comprimento (figura 7) e sem fluido de perfuração. Em cada ponto da malha, a perfuração estendeu-se até 10m de profundidade, após a qual foi descido um revestimento de PVC geomecânico com diâmetro de 50mm e comprimento 10,5m, com seção filtrante nos últimos 0,5m (ranhuras de 0,50mm), mostrado na figura 8. Após a colocação do revestimento, o furo foi preenchido com pré-filtro do tipo pérola de granulometria entre 1 e 2mm até a profundidade de 9m. Posteriormente, foram inseridos no furo sacos de PVC preenchidos com bentonita em pó (figura 9) que posteriormente foram perfurados através de uma haste pontiaguda. Os sacos de PVC foram empregados para garantir que a bentonita não compactasse na superfície freática observada nos furos, já que a rapidez da recuperação dos níveis d'água impossibilitou que os furos fossem esgotados para a instalação do revestimento. O procedimento foi repetido até que a camada de bentonita atingisse a profundidade de 6m, após o que foi descido o revestimento de polipropileno de 1" de diâmetro e 6,5m de comprimento, com seção filtrante semelhante ao tubo de 10,5m (figura 10) e novamente foi inserido o pré-filtro, desta vez até a profundidade de 5m. A bentonita foi mais uma vez adicionada através dos sacos de PVC até atingir a profundidade de 3m. Finalmente foi

descido um outro revestimento idêntico ao anterior, a menos no comprimento (3,5m), o furo foi preenchido com pré-filtro até 3m de profundidade e selado com bentonita do tipo Compactolit até a superfície. Os revestimentos foram então cortados para suas bocas ficassem com elevação levemente superior à da superfície da área e o acabamento foi realizado com concreto e câmaras de calçada. A figura 11 apresenta o perfil construtivo esquemático destes poços e a figura 12 mostra um conjunto recém-instalado.

Figura 6. Perfuratriz rotativa hidráulica montada sobre esteiras.

Figura 7. Trados ocos empregados na perfuração.

Figura 8. Seção filtrante do revestimento de PVC geomecânico de 50mm de diâmetro.

Figura 9. Bentonita em pó acondicionada em sacos de PVC.

Figura 10. Seção filtrante do revestimento de polipropileno de 1'' de diâmetro.

Figura 11. Perfil construtivo esquemático dos novos poços instalados na área do PET- EG.

Figura 12. Conjunto multinível recém-instalado.

Muito embora apareçam demarcados na figura 4, os poços multiníveis P15, P27 e P29 não foram instalados. No caso do P15, houve a quebra do revestimento de 50mm de diâmetro durante a retirada dos trados ocos e a instalação do poço iria requerer mais uma perfuração, o que poderia, como comentado anteriormente, descaracterizar a região em torno de P15. Os poços P27 e P29 não foram instalados simplesmente por economia. Todavia, eles aparecem demarcados, pois nesses pontos, assim como em todos os demais, o solo foi amostrado, como será visto no próximo item.

4.2. Amostragem de Solo

Além de uma boa avaliação de recarga, uma modelagem que consiga representar os efeitos observados na área do PET – EG não pode dispensar um grande detalhamento das características do material que compõe o aquífero. Para tanto, amostrou-se o solo em todos os pontos onde seriam instalados os novos poços.

O método de amostragem adotado foi o chamado *direct push system*. Neste método, um tubo de PVC denominado *liner*, de diâmetro interno de 1¼" e 1,20m de comprimento, é inserido em um tubo amostrador, também de 1,20m de comprimento, mas com diâmetro externo de 2" (figura 13). Na extremidade do tubo amostrador é rosqueada uma ponteira externa que pode estar com sua abertura livre (figura 14) ou fechada por uma ponteira interna (figura 15). Esse amostrador é então cravado à percussão verticalmente no solo através de uma máquina pneumática do tipo *Geoprobe* (figura 16) e quando a ponteira interna não está

presente, o material que constitui o aquífero preenche o *liner*, sendo assim coletado. Muito embora tal método não esteja livre de ressalvas, uma vez que as amostras coletadas são deformadas e que nem sempre a recuperação dos *liners* é completa, ocorrendo ocasionalmente a queda de material no momento da retirada do amostrador do furo realizado, foi o método mais indicado para as condições do PET – EG, onde a grande quantidade de árvores impedia a manobra de máquinas maiores e onde também, pela proximidade entre poços, não seria recomendado o uso de técnicas mais invasivas.

Figura 13. *Liner* no interior do tubo amostrador.

Figura 14. Ponteira externa.

Figura 15. Tubo amostrador com ponteiros interna e externa.

Figura 16. Máquina do tipo *Geoprobe* empregada para cravação do tubo amostrador.

a) *Dificuldades encontradas*

O esquema de amostragem inicialmente considerado para área consistia em amostrar através dos *liners* continuamente entre as profundidades de 0 a 10,8m nos pontos ímpares (P1, P3, P5, etc...) e apenas em três intervalos (2,4 a 3,6m, 4,8 a 6,0m e 8,8 a 10,0m), coincidentes com a posição das seções filtrantes nos pontos pares. Todavia, a intercalação de areias de diferentes granulometrias e argilas rijas acabou por danificar por três vezes a rosca da ponteira externa do amostrador, ocasionando uma mudança de estratégia. O novo procedimento consistiu em amostrar continuamente até ao menos a profundidade de 6m, deixando a cargo do sondador avaliar até qual profundidade poderia ser introduzido o amostrador sem danificá-lo. Esta nova estratégia resultou na coleta de 251 *liners*, um número consideravelmente maior que aquele que resultaria da primeira estratégia (180 *liners*), contudo cobrindo uma profundidade em geral menor que a considerada necessária. A falha de amostragens mais profundas foi suprida por sondagens SPT de até 11m realizadas no entorno da área.

Figura 17. Posição esquemática das sondagens realizadas através do método *direct push system*.

4.3. Análises Granulométricas

A fim de se construir perfis geológicos para embasar o modelo numérico, amostras coletadas por sondagens SPT foram analisadas quanto a sua granulometria. Essas análises

foram realizadas no Laboratório de Sedimentologia do IGc - USP, por um técnico do laboratório e acompanhado por um aluno de mestrado e uma aluna de iniciação científica. Essas análises encontram-se no trabalho de Mondin (2005).

Para análise das amostras, foram utilizadas duas técnicas de análise granulométrica: decantação (pipetagem) e peneiramento, respectivamente para frações mais finas (argila e silte) e mais grossas que $62\mu\text{m}$ (areia e grânulo).

A preparação das amostras para o início das análises (pipetagem e peneiramento) foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu em deixar a amostra em torno de 4h para secagem completa. A segunda etapa foi à desagregação a seco, feita com uso de um martelo de borracha. Com um quarteador tipo Jones, a amostra foi reduzida a aproximadamente 60g (massa máxima recomendada para não saturar a dispersão aquosa em 1000ml, nem sobrecarregar as peneiras). Na sequência, adicionou-se à amostra uma massa de pirofosfato de sódio, equivalente a 4% do peso estimado de partículas siltico-argilosas. Este sal age como antifloculante, evitando que a argila fique agregada sob a forma de partículas maiores, o que alteraria o resultado final de distribuição granulométrica.

Em seguida, adiciona-se água destilada em quantidade suficiente para cobrir a amostra, juntamente com o pirofosfato de sódio (cerca de 200ml). A dispersão aquosa assim obtida é então colocada num béquer, onde a agitação mecânica é feita com o uso de um misturador de polpa a hélice (marca Fisatom, modelo 710).

O material disperso foi colocado em uma proveta de 1000ml, destinada à realização do ensaio de decantação. Caso ainda houvesse material aglomerado, o mesmo foi destorroado em almofariz de porcelana, com o auxílio de um pistilo de borracha. O material foi considerado completamente desagregado, quando a água adicionada ao material destorroado mantinha-se limpa. Toda a água do destorroamento foi colocada na mesma proveta, tomando o cuidado para que o volume de água utilizado não ultrapasse a capacidade volumétrica do recipiente (1000ml). Para cada proveta foram numerados e pesados previamente em balança analítica (precisão mínima de três dígitos) cinco béqueres de 50ml, destinados à cada uma das faixas granulométricas que foram coletadas (intervalos abertos correspondentes às granulações menores que 62, 31, 16, 8 e $4\mu\text{m}$).

A primeira e a segunda pipetagens foram feitas com a pipeta mergulhada 20cm na dispersão, enquanto as três últimas foram realizadas a 10cm, para reduzir o tempo total de ensaio (2h e 30min para temperatura ambiente de 21°C). Recolheu-se a primeira alíquota pipetada no primeiro béquer numerado e assim por diante. Os béqueres, com as respectivas alíquotas de pipetagem, foram colocados na estufa a 60°C até que a água da dispersão evaporasse completamente, deixando apenas a amostra seca. Concluída a secagem, as alíquotas devem ser resfriadas dentro de um dessecador de vidro. Pesaram-se novamente

os béqueres de 50ml (agora com a amostra), anotando-se seus respectivos pesos na ficha de controle do ensaio.

A amostra restante na proveta foi submetida à elutriação, isto é, uma lavagem para eliminação de finos ($<62\mu\text{m}$). Este processo foi feito em um elutriador de funis utilizando-se água corrente em fluxo ascendente. Ao final da elutriação, a areia lavada foi filtrada a vácuo. A areia foi então seca em estufa e depois peneirada com o auxílio de um vibrador de peneiras. Cada faixa granulométrica foi pesada e armazenada em um saquinho de papel.

Os dados obtidos (pesos dos recipientes vazios e com amostras pipetadas, após a secagem, e peso de amostra em cada faixa granulométrica de peneiramento) foram analisados em seus parâmetros estatísticos (diâmetro médio, desvio padrão, assimetria e curtose) no Laboratório de Sedimentologia do IGc-USP.

4.4. Levantamento Topográfico

Foi contratado um topógrafo para a realização da topografia detalhada da área. Neste levantamento foi feita a localização dos poços e de 18 árvores. Para cada poço foi determinada uma cota altimétrica, em relação a um poço base, além da altimetria das árvores e do terreno a cada 2m a partir do centro dos poços nas quatro direções perpendiculares.

Através da determinação das cotas topográficas dos poços, foi possível calcular as cargas hidráulicas a partir dos níveis d'água medidos com um medidor elétrico, bem como restituir a topografia da área.

4.5. Dados Meteorológicos

Para a medição das precipitações foi instalado, a uma distância aproximada de 0,5km dos poços de monitoramento, um pluviômetro em uma área livre de árvores e construções próximas para evitar interferência.

O pluviômetro foi instalado no centro de uma área de 9m^2 cercada por uma tela de aço com aproximadamente 0,5m de altura.

Para alguns eventos esporádicos de chuva, nos meses de dezembro 2003 e janeiro de 2004, foram instalados coletores individuais sobre cada um dos poços para calcular e verificar a interceptação das árvores e sua influência sobre a recarga. Nos dias 15, 17, 21, 22, 23 de dezembro 2003 e 09 e 16 de janeiro de 2004, foram colocados coletores de chuva (recipientes de plástico circulares com raio de 10cm) sobre cada um dos poços e por meio destes e medida a heterogeneidade de precipitação sobre os mesmos.

4.6. Medições dos Níveis d'Água

As medidas dos níveis d'água dos poços de monitoramento foram estabelecidas por meio de um medidor elétrico da marca *Hidrosuprimentos*. O período de medições dos níveis d'água foi de dezembro de 2002 a janeiro de 2004. As medições dos 81 poços de monitoramento variaram de diárias a semanais, totalizando 254 campanhas com a geração de 19.526 dados.

4.7. Ensaios de Permeabilidade

Realizaram-se campanhas para o cálculo das condutividades hidráulicas para os poços da área. O ensaio de permeabilidade, conhecido como *bail-test*, é realizado pelo seguinte procedimento:

- Mede-se o nível d'água e depois é realizada a extração ou a adição de um certo volume d'água;
- Após a retirada ou a adição de um volume d'água é medido imediatamente o nível d'água (h_0) bem como sua recuperação (nível d'água) em intervalos regulares (h) por meio de um cronômetro (ou automaticamente por um transdutor) até atingir o valor do nível d'água antes do bombeamento;
- Aos valores do logaritmo natural do rebaixamento normalizado como função do tempo foram ajustadas retas por meio de um *software on-line* de ajuste por mínimos quadrados em um modelo de regressão não linear (Statpages, 2005). Através das equações dessas retas, foram determinados os tempos característicos de Hvorslev, T_0 , para cada poço (Hvorslev, 1951 *in* Fetter, 1994). Uma vez que nos poços perfurados o comprimento da seção filtrante L é inferior a oito vezes o raio da perfuração R , a condutividade hidráulica pode ser descrita através do fator de forma definido por Chapuis (1989),

$$K = \frac{r^2 \cdot \sqrt{\frac{L}{2R} + 0,25}}{4RT_0} \quad (1)$$

na qual:

K = condutividade hidráulica [L/T];

r = raio do revestimento [L];

R = raio da perfuração [L];

L = comprimento da seção filtrante [L];

Nos poços de 3 e 6m, foram feitos ensaios pelo método de extração de água através de uma mangueira com válvula-de-pé acoplada e medida a recuperação dos níveis d'água, ao passo que se utilizaram corpos de prova (tarugos feitos de tubos de PVC fechados nas pontas e preenchidos com areia) para os poços de 10m, com diâmetro de 2". O aumento do nível de água causado pelo tarugo foi medido com transdutores de pressão, que monitoraram a recuperação do nível ao longo do tempo.

Utilizaram-se quatro transdutores de pressão, da marca *In-Situ*, modelo *Minitroll* (30psi, ou 21m de coluna d'água de pressão máxima, com precisão de 5%). Eles foram programados previamente para as medições e depois imersos a 2m abaixo do nível d'água, após o que eram introduzidos os corpos de prova. Mediam-se, portanto, tanto a ascensão da coluna d'água quanto sua descensão, quando o corpo era retirado.

5. RESULTADOS

5.1. Descrição da área e parâmetros gerais

O material coletado nos 251 *liners* de 1,20m de comprimento retirados da área foram descritos, o que permitiu a avaliação da litologia em cada um dos pontos P demarcados na figura 17. A litologia encontrada é o assunto das figuras de número 18 ao número 27. Através dessas descrições foi possível determinar as 8 seções indicadas na figura 28 e apresentadas nas figuras 29 a 36. O que se observa nestes perfis é que na área de estudo são encontradas 7 camadas sedimentares principais. A 1ª camada (amarelo escuro) é formada por um solo arenoso – argiloso de coloração clara a amarronzada, mal selecionada, apresentando desde argila até areia grossa e grânulos (pontos P7, P9, P13, P27, P28, P29 e P30) contendo por vezes matéria orgânica. Esta camada tem espessura em torno de 0,5m diminuindo em direção ao ponto 3 e não aparece nos pontos P1 e P7 (seções B – B' e G – G'). A 2ª camada (cinza claro) é formada por um solo argiloso siltoso com matéria orgânica e de coloração preta. Na parte superior desta camada, ocorrem sedimentos mal selecionados (argila a grânulos) gradando para um sedimento argiloso na base, nos pontos P3, P5, P19, P23, P24, P29 e P30 tem-se uma argila plastificada. Esta camada é mais espessa na parte superior da área (seção C – C') ficando menos espessa na parte inferior (seção A – A'). Na 3ª camada (marrom) é encontrada uma areia fina a média com argila e silte de coloração marrom claro a escuro. Esta camada é mais espessa nos pontos P7, P13, P14, P17, P18, P21, P26, P27 e P28 com aproximadamente 2m de espessura. Nos pontos P7, P17 e P21, ocorre intercalação com uma camada contendo uma argila siltosa com areia fina de coloração marrom. A 3ª camada muda gradacionalmente para a 4ª camada (amarelo claro), onde passa a ocorrer predominantemente

uma areia grossa com muitos grânulos e seixos. A 4ª camada apresenta uma diminuição da espessura em direção aos poços P17, P21 e P26 (seções F – F' e H – H').

A 5ª camada (verde) é formada por uma argila siltosa compacta de coloração cinza a azulada, aparecendo por vezes lentes centimétricas de uma areia fina a grossa. Esta camada tem espessura média de 2m, aumentando de espessura do ponto P5 ao P21 (seção H- H').

A 6ª camada (vermelha) apresenta uma areia que varia de fina a grossa, podendo conter silte e argila em grandes quantidades (até 50%). Esta camada tem uma espessura média de 1,25m podendo ficar mais espessa como observado nos pontos P7, P11, P15 e P17. Na 7ª camada ocorre uma argila compacta de coloração azulada. A 5ª e a 7ª camadas podem ser consideradas uma única camada sendo que a 6ª seria uma lente métrica de areia que ocorre intercalada.

Poço 1		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,8	solo rico em matéria orgânica, mal selecionado, cor preta	
0,8 - 1,8	solo com menor quantidade de matéria orgânica, pouco de areia fina, fragmentos de mica	
1,8 - 3,0	material arenoso, mal selecionado, de cor acizentada	
3,0 - 4,2	matriz de areia fina a média contendo areia grossa	
4,2 - 5,1	areia grossa contendo grânulos e seixos	
5,1 - 5,4	material argiloso, de coloração azulada a bege	
5,4 - 7,0	argila siltosa com um pouco de mica, mais coeso	
7,0 - 7,5	areia bem argilosa de coloração amarela	
7,5 - 8,05	areia argilosa (50% de cada) de coloração azulada, compacta	
8,05 - 8,85	areia argilosa (60% de areia) de coloração azulada	
8,85 - 9,25	argila compacta	

Poço 2		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,4 - 2,9	argila arenosa (fina) de cor amarronzada	
2,9 - 3,2	areia fina a média, argilo siltosa, marrom clara com mica	
5,2 - 5,5	areia fina a grossa com grânulos e seixos	
5,5 - 6,0	argila cinza com pouco de silte	
9,0 - 10,0	areia média bem selecionada contendo argila que grada para uma areia fina com muita argila	

Poço 3		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,2	solo arenoso argiloso de coloração amarronzado	
0,2 - 1,40	solo argiloso siltoso com matéria orgânica coloração preta	
1,40 - 2,40	solo argiloso com matéria orgânica coloração preta, mais consolidado	
2,40 - 2,70	solo argiloso com matéria orgânica, bem plástico	
2,70 - 2,40	areia fina a média com pouca mica	
3,40 - 4,90	areia fina a média gradacionando para uma areia grossa com seixos	
4,90 - 8,20	argila compacta contendo seixos de coloração acizentada	
8,20 - 9,40	areia média a grossa ficando argilosa em direção a base	
9,40 - 10,40	argila compacta	

Figura 18. Descrição da litologia observada nos pontos P1, P2 e P3.

Poço 4		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,40 - 3,0	solo argiloso com matéria orgânica, coloração preta	
3,0 - 3,6	areia fina a média coloração marrom clara	
4,8 - 5,3	areia grossa, mal selecionada contendo grânulos e seixos	
5,3 - 6,0	argila cinza com pouco de silte	
8,8 - 10,0	areia fina a média com argila e areia grossa, coloração cinza	

Poço 5		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,3	solo arenoso siltoso de coloração clara	
0,3 - 2,40	solo argiloso com matéria orgânica, coloração preta	
2,40 - 2,55	solo argiloso com matéria orgânica, coloração preta (plástico)	
2,55 - 4,0	areia fina a média com pouco silte e argila	
4,0 - 5,60	areia grossa com grânulos e seixos	
5,0 - 7,20	argila compacta	
7,20 - 8,20	argila compacta com pouco de silte	
8,20 - 8,60	areia fina	
8,60 - 9,60	areia média contendo argila	

Poço 6		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,4 - 3,1	areia argilosa de coloração marrom clara passando a uma areia fina mal selecionada	
4,8 - 5,4	argila com pouco de coloração cinza clara	
8,2 - 9,1	areia bege clara, média, com pouca argila	
9,1 - 9,4	argila com areia fina, coloração cinza	

Figura 19. Descrição da litologia observada nos pontos P4, P5 e P6.

Poço 7		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,80	solo com matéria orgânica de coloração preta	
0,80 - 1,45	solo argiloso siltoso com matéria orgânica, cor preta	
1,45 - 1,90	areia siltosa consolidada coloração ocre	
1,90 - 2,05	argila siltosa consolidada marron escura	
2,05 - 3,10	areia média com pouco de mica	
3,10 - 4,30	areia grossa com grânulos e seixos	
4,30 - 5,10	argila de coloração acinzentada	
5,10 - 5,55	argila siltosa com pouco de seixos	
5,55 - 6,30	areia fina a média com pouca mica	
6,30 - 6,40	areia siltosa com pouca argila	
6,40 - 7,30	areia fina a média com pouco de silte	
7,30 - 8,40	areia siltosa de coloração amarelada-acinzentada mais consolidada na base	

Poço 8		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,4 - 2,7	argila com pouco de silte, marron escura	
2,7 - 3,1	areia média a fina com pouca argila com mica, marron clara	
4,8 - 6,0	argila cinza com pouco de silte	

Poço 9		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,30	solo orgânico, argiloso arenoso com areia grossa e grânulo cor marron	
0,30 - 1,55	solo argiloso de coloração preta	
2,4 - 3,1	solo argiloso plastificado	
3,1 - 3,75	areia fina com pouco de silte e argila	
3,75 - 4,5	areia fina a média com grânulos e seixos	
4,8 - 5,0	areia grossa com argila e grânulos	
5,0 - 5,7	argila cinza compacta	

Figura 20. Descrição da litologia observada nos pontos P7, P8 e P9.

Poço 10		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,4 - 3,0	solo argiloso de coloração preta	
3,0 - 3,6	areia fina a média com argila coloração marron	
4,8 - 5,1	areia grossa e grânulos com argila	
5,1 - 5,6	argila cinza com areia e silte	

Poço 11		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,4 - 3,65	areia fina com silte e argila e minerais máficos	
3,65 - 4,05	areia grossa contendo grânulos e seixos	
4,05 - 4,50	argila cinza escura com pouco de areia fina a média	
4,8 - 5,3	argila compacta	
6,0 - 6,30	argila compacta com pouca areia fina	
6,30 - 7,20	argila siltosa compacta	
7,20 - 7,50	areia fina com argila siltosa compacta	
7,50 - 8,80	areia fina com pouco de silte	
8,80 - 9,6	areia grossa com argila e quantidades subordinadas de silte e areia fina, coloração cinza	

Poço 12		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,4 - 2,45	areia fina com argila e matéria orgânica	
4,8 - 6,0	argila cinza compacta com pouco de silte	
8,8 - 9,15	areia fina, cor branco amarelada	
9,15 - 9,8	areia média a grossa com argila	

Figura 21. Descrição da litologia observada nos pontos P10, P11 e P12.

Poço 13		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,6	solo argilo arenoso com areia de fina a grossa	
0,6 - 2,0	solo argiloso com matéria orgânica de coloração preta	
2,4 - 2,85	areia fina coloração amarronzada	
3,6 - 4,10	areia fina a seixos com maior porcentagem de areia grossa	
4,8 - 6,0	argila compacta com algumas porções contendo um pouco de areia fina	

Poço 14		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,40	solo silte arenoso (areia fina)	
0,40 - 2,05	solo argiloso com matéria orgânica de coloração preta	
2,4 - 3,0	areia fina com silte coloração amarronzada	
3,6 - 4,40	areia fina a grossa com maior porcentagem de areia grossa	
4,40 - 4,95	areia fina a seixo com maior porcentagem de areia grossa	
4,95 - 6,0	argila compacta contendo algumas porções de areia	

Poço 15		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,5	solo com muita matéria orgânica, mal selecionado com pouco de seixos, coloração marron	
0,5 - 1,45	solo argiloso com matéria orgânica de coloração preta	
1,45 - 2,15	solo argiloso de coloração preta plastificado	
3,15 - 3,6	areia fina com pouco de silte	
3,6 - 4,95	areia fina a grossa com seixos e maior porcentagem de areia grossa	
4,95 - 6,0	material argilo siltoso, seco cor cinza escuro	
6,0 - 6,7	material siltoso argiloso cor cinza claro	
6,7 - 7,95	areia fina com expressivas quantidades de silte e menos de argila, cor amarelada	
7,95 - 8,4	areia fina com silte	

Figura 22. Descrição da litologia observada nos pontos P13, P14 e P15.

Poço 16		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
2,4 - 2,65	areia fina com argila e matéria orgânica	
4,8 - 6,0	argila cinza compacta com pouco de silte	
8,8 - 9,15	areia média com muita argila	
9,15 - 10,0	areia grossa com areia média e argila	

Poço 17		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,20	solo orgânico mal selecionado (argila a seixo) de coloração amarronzada, não consolidado	
0,20 - 1,30	solo argiloso com matéria orgânica de coloração preta	
1,30 - 2,0	areia fina com pouco de silte	
2,40 - 2,50	material argiloso siltoso com areia fina	
2,50 - 3,60	areia fina com pouco de silte	
3,60 - 4,00	areia média a grossa com seixos	
4,00 - 7,50	argila compacta cinza escura gradando para uma argila siltosa cinza clara	
7,50 - 8,40	areia fina siltosa	
8,40 - 9,60	areia média com bastante argila, pouco silte e areia fina	

Poço 18		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,90	solo argiloso arenoso (areia fina a média)	
0,90 - 1,20	solo argiloso com matéria orgânica coloração preta	
1,20 - 2,15	solo argiloso siltoso co matéria orgânica	
2,40 - 2,60	areia fina contendo argila e mica	
3,60 - 4,85	areia fina a seixos (maior porcentagem de areia grossa)	
4,85 - 6,0	argila compacta com algumas porções arenosas	

Figura 23. Descrição da litologia observada nos pontos P16, P17 e P18.

Poço 19		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,50	solo arenoso siltoso de coloração clara	
0,50 - 1,55	solo argiloso mal selecionado com matéria orgânica de coloração preta	
1,55 - 2,65	solo argiloso plastificado	
2,65 - 3,35	areia fina com pouca argila	
3,6 - 4,05	areia fina a média	
4,05 - 5,05	areia grossa com grânulos seixos	
5,05 - 6,0	argila compacta de coloração azulada com pouco silte	

Poço 20		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,55	solo silte arenoso	
0,55 - 1,50	solo argiloso contendo matéria orgânica de coloração preta	
2,4 - 3,0	areia fina contendo silte, coloração amarronzada	
3,6 - 5,3	areia fina a seixos (maior porcentagem de areia grossa)	
5,3 - 6,0	argila compacta contendo areia fina	

Poço 21		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,35	solo mal selecionado (argila a seixos) com matéria orgânica, coloração marron	
0,35 - 0,95	solo argiloso com matéria orgânica coloração preta	
1,20 - 1,35	areia fina com pouco de silte	
1,35 - 2,15	material siltoso argiloso com grãos de areia média	
2,4 - 2,65	areia fina com argila	
3,6 - 4,0	areia grossa com bastante grânulo e seixos e um pouco de argila e silte	
4,0 - 6,7	silte argiloso compacto com pouco de mica	
6,7 - 7,2	argila siltosa com pouca areia fina	
7,2 - 7,4	argila compacta com pouco de silte	
7,4 - 8,4	areia fina	

Figura 24. Descrição da litologia observada nos pontos P19, P20 e P21.

Poço 22		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
4,8 - 6,0	argila cinza compacta com pouco de silte	
7,2 - 7,5	areia fina de coloração amarelada	
7,5 - 8,4	areia média com quantidades subordinadas de argila, silte e areia fina	
8,8 - 9,75	areia fina a grossa com argila	

Poço 23		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,4	solo arenoso siltoso de coloração clara	
0,4 - 1,50	solo argiloso mal selecionado com matéria orgânica de coloração preta	
1,50 - 2,5	argila plástica com matéria orgânica de coloração preta	
2,5 - 3,7	areia fina com argila	
3,7 - 4,4	areia fina a seixo (maior porcentagem de areia grossa)	
4,8 - 5,15	argila compacta	
5,15 - 6,0	argila siltoso compacta	

Poço 24		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,5	solo arenoso siltoso de coloração clara	
0,5 - 1,75	solo argiloso mal selecionado com matéria orgânica de coloração preta	
1,75 - 2,7	argila plástica com matéria orgânica de coloração preta	
2,7 - 3,7	areia fina com argila	
3,7 - 4,8	areia fina a seixo (maior porcentagem de areia grossa e grânulos)	
4,8 - 6,8	argila com bastante silte	

Figura 25. Descrição da litologia observada nos pontos P22, P23 e P24.

Poço 25		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,45	solo silte arenoso	
0,45 - 2,85	solo argiloso com matéria orgânica	
2,85 - 3,15	areia fina com silte de coloração marron escura	
3,6 - 3,75	areia fina a grossa (maior porcentagem de areia grossa) com seixos	
4,8 - 5,20	areia média a seixos (maior porcentagem de grânulos)	
5,20 - 6,0	argila compacta com pouca areia	

Poço 26		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,3	solo arenoso siltoso coloração clara	
0,3 - 1,35	solo argiloso mal selecionado com matéria orgânica de coloração preta	
1,35 - 3,6	areia fina com argila com pouco de areia média na base	
3,6 - 4,0	areia fina a seixo (maior porcentagem de areia grossa)	
4,8 - 6,0	argila compacta de coloração azulada com pouco de silte na base	

Poço 27		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,25	solo com areia fina mal selecionado	
0,25 - 1,80	solo argiloso mal selecionado (areia grossa) de coloração preta	
1,80 - 2,4	areia fina com argila	
2,4 - 3,3	areia fina com porções argilosas	
3,6 - 4,1	areia fina a seixo (maior porcentagem de areia grossa e grânulo)	
4,8 - 5,35	argila compacta de coloração amarronzada	

Figura 26. Descrição da litologia observada nos pontos P25, P26 e P27.

Poço 28		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,35	solo com areia fina com matéria orgânica mal selecionado	
0,35 - 0,95	solo argiloso com matéria orgânica de coloração preta	
1,2 - 1,8	solo argiloso mal selecionado (grânulos)	
1,8 - 2,80	areia fina com argila de coloração marron	
3,6 - 4,8	areia grossa a seixo (predomina areia grossa)	
4,9 - 6,0	argila com pouco silte de coloração cinza	

Poço 29		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,35	solo arenoso (areia fina), mal selecionado (argila a grânulo)	
0,35 - 1,4	solo argiloso mal selecionado (areia grossa)	
1,4 - 2,5	solo argiloso plastificado de coloração preta	
2,5 - 3,3	areia fina com argila (coloração marron)	
3,6 - 5,2	areia grossa a seixos	
5,2 - 5,55	argila compacta de coloração cinza	

Poço 30		
Profundidade (m)	Descrição Geológica	
0 - 0,45	solo arenoso (areia fina) mal selecionada (argila a areia grossa)	
0,45 - 1,35	solo argiloso mal selecionado (grânulos) com matéria orgânica de coloração preta	
1,35 - 2,4	solo argiloso plastificado com matéria orgânica de coloração preta	
2,4 - 3,1	areia fina com argila e silte de coloração marron escuro	
3,6 - 4,2	areia média a grossa (maior porcentagem de areia média)	
4,2 - 4,8	areia grossa (predominante) com areia fina a média	
4,8 - 5,25	areia grossa com grânulos e seixos	
5,25 - 5,85	material argilo siltoso	

Figura 27. Descrição da litologia observada nos pontos P28, P29 e P30.

Figura 28. Localização das seções verticais construídos através da descrição dos liners.

Figura 29. Seção vertical segundo o segmento A – A' da figura 28.

Figura 30. Seção vertical segundo o segmento B – B' da figura 28.

Figura 31. Seção vertical segundo o segmento C – C' da figura 28.

Figura 32. Seção vertical segundo o segmento D – D' da figura 28.

Figura 33. Seção vertical segundo o segmento E – E' da figura 28.

Figura 34. Seção vertical segundo o segmento F – F' da figura 28.

Figura 35. Seção vertical segundo o segmento G – G' da figura 28.

Figura 36. Seção vertical segundo o segmento H – H' da figura 28.

5.2. Topografia

Os dados obtidos do levantamento topográfico mostram uma topografia bastante suave, com gradiente aproximado de 0,03m/m e cotas variando entre 9,44m e 100,10m (coordenadas locais). Na figura 37, é apresentado o mapa topográfico da área, adotando-se origem e orientação mais apropriadas para a modelagem numérica.

Figura 37. Topografia da superfície da área de estudo (coordenadas e escala em metros).

5.3. Precipitações

Segundo Mondin (2005), o total de precipitação meteórica no período de dezembro de 2002 a janeiro de 2004 foi de 1353mm sendo a média mensal de 97mm. A distribuição das precipitações mensais caracteriza duas estações distintas: uma estação chuvosa e uma seca. Na estação chuvosa, os valores mensais totais de precipitação encontram-se acima de 80mm (dez/02 a mar/03 e out/03 a jan/04) e a média mensal é de 149mm, enquanto a estação seca apresenta valores abaixo de 41mm (abr/03 a set/03) e média mensal inferior a 27mm, conforme observado na figura 38.

Figura 38. Total mensal de precipitação (Mondin, 2005).

5.4. Variação temporal das cargas hidráulicas

A figura 39 apresenta a carga média para cada profundidade ao longo de todo o monitoramento realizado para este projeto. Observa-se claramente a existência de dois padrões distintos de cargas, coincidentes com as estações chuvosas e secas, o que é esperado. Todavia, verifica-se que dentro de cada estação existe uma grande variação nas cargas médias. Se por um lado estas cargas médias variaram entre 97,72m e 98,18m no período entre 10/12/02 e 29/04/03 e entre 97,46m e 97,71 entre 19/05 e 17/08 de 2003, em um período de apenas 11 dias dentro da estação chuvosa (entre 18 e 28 de fevereiro de 2002), houve uma variação de carga média de aproximadamente 90cm. Associada a essa intensa variabilidade temporal, existe também uma complexa distribuição espacial das cargas. Tomando-se as campanhas de 29 de janeiro e 28 de junho de 2003, não só existe a diferença entre os potenciômetros típicos de cada estação, mas também a variação entre a potenciometria de cada profundidade (figuras 40 e 41). A figura 42 apresenta um mapa de isovalores do desvio padrão entre as cargas nas três profundidades de cada ponto de amostragem, também para as campanhas de 29 de janeiro e 28 de junho de 2003. Verifica-se mais claramente que existe uma uniformidade entre os padrões potenciométricos nas três profundidades na estação seca, que por outro lado não é observada na estação chuvosa.

Figura 39. Dados de carga hidráulica média dos poços nas profundidades de 3, 6 e 10m (Mondin, 2005).

Figura 40. Mapas potenciométricos para 29 de janeiro de 2003 nas profundidades 3m (a), 6m (b) e 10m (c).

Figura 41. Mapas potenciométricos para 28 de junho de 2003 nas profundidades 3m (a), 6m (b) e 10m (c).

Figura 42. Mapas de isovalores para o desvio padrão entre as cargas de diferentes níveis para as campanhas de 29 de janeiro (a) e 28 de junho (b) de 2003.

Outro aspecto importante observado na figura 40 é a semelhança entre os mapas potenciométricos nas profundidades 3m e 10m, muito embora o mapa na profundidade 6m seja discordante. Esta configuração não é incomum para a área, sendo observada em várias campanhas da estação chuvosa.

5.5. Condutividades hidráulicas

5.5.1. Resultados dos *Bail-Tests*

As condutividades hidráulicas calculadas através dos *bail-tests* (tabelas 1, 2 e 3) variam significativamente no interior da área de estudo. Os valores obtidos se encontram entre $3,27 \cdot 10^{-9} \text{m/s}$ a $1,98 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$. A média do logaritmo natural das condutividades é $\langle L \rangle = -15,11079$, resultando em uma condutividade média calculada, considerando-se todos os valores, através de $\exp(\langle L \rangle)$ de aproximadamente $2,74 \cdot 10^{-7} \text{m/s}$. O histograma dos valores medidos de condutividade hidráulica (figura 43) sugere que a função densidade de probabilidade deste parâmetro na área de estudo é provavelmente log-normal, o que é esperado (Kitanidis, 1997).

Muito embora os poços de monitoramento tenham sido instalados sistematicamente nas profundidades de 3m, 6m e 10m, devido à variação topográfica das interfaces entre as camadas litológicas, poços de mesma profundidade podem ter seções filtrantes predominantemente em camadas litológicas distintas. A tabela 4 apresenta quais poços têm seções filtrantes em cada uma das camadas litológicas, segundo os perfis indicados nas figuras de 29 a 36. Quando separados os poços segundo as litologias onde se encontram suas seções filtrantes, obtêm-se as médias e desvios verificados na tabela 5. Observa-se que os valores médios das condutividades hidráulicas calculadas através da exponencial dos valores médios de $\ln(K)$ são condizentes com a descrição litológica em cada uma das camadas, com exceção da primeira e última camadas, onde se esperariam condutividades respectivamente maiores e menores que as calculadas. No caso da última camada, os valores calculados contradizem a hipótese de ser esta uma camada que poderia ser empregada como base impermeável para o aquífero raso.

Observa-se que a heterogeneidade das condutividades no interior das camadas é até mesmo maior que as variações existentes entre camadas litologicamente distintas. Muito embora a utilização de *bail* ou *slug-tests* na determinação de condutividades hidráulicas (K) seja passiva de críticas quanto à adequação do método ao aquífero em questão, acredita-se que o nível de heterogeneidade observado seja uma estimativa confiável da real heterogeneidade das camadas do aquífero no PET-EG.

Analogamente à figura 43, os histogramas da distribuição de condutividades nas camadas 3, 5 e 7 (nas demais camadas não existem dados suficientes para a confecção de histogramas), apresentados nas figuras 44, 45 e 46, indicam que a função densidade de probabilidade de K em cada uma destas camadas é também log-normal. Para confirmar esta hipótese inicialmente foi verificado, através do teste *Shapiro-Wilk* (Green e Margerison, 1978), se os valores de K obtidos em cada camada obedeceriam a uma distribuição normal de probabilidades, hipótese rejeitada nos três casos. Posteriormente, foram testados os valores de $\ln(K)$ e a hipótese de normalidade foi aceita, sem exceção, com 5% de significância. Os gráficos de $\ln$ do rebaixamento como função do tempo para os *bail-tests* realizados na área encontram-se no Anexo A.

Tabela 1. Valores de condutividade obtidos através dos ensaios de permeabilidade para os poços de 3m de profundidade.

	PM01	PM02	PM03	PM04	PM05	PM06	PM07	PM09	PM10	PM11	PM12	PM14	PM16	PM17	PM19	PM20	PM21	PM22	PM23	PM24	PM25	PM26	PM28	PM30
n	9	6	4	6	9	9	7	5	17	7	8	5	19	3	4	17	16	15	8	8	6	3	7	4
T ₀ (s)	144228.7373	2250.173	32421.18	52476.73	91334.38	10110.81	12881.63	6238.103	14905.04	481.1239	3215.656	6585.32	1108.74	4351.937	1224.526	1024.837	851.2877	3165.104	3296.097	711.9916	38023.27	348.6108	1289.615	1414.508
σT ₀ (s)	3220.460474	185.876	3618.999	11487.82	3425.441	1992.418	605.4965	1096.113	492.9641	65.58749	397.1751	1009.191	120.4683	1926.51	96.2408	61.32884	63.53891	291.5766	340.8332	27.39136	2451.42	109.1303	198.9564	187.7613
σR (m)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.025	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
K (m/s)	3.27885E-09	2.1E-07	1.46E-08	9.01E-09	5.18E-09	4.68E-08	3.67E-08	7.58E-08	3.17E-08	9.83E-07	1.47E-07	7.18E-08	4.27E-07	1.09E-07	3.86E-07	4.61E-07	5.56E-07	1.49E-07	1.43E-07	6.64E-07	1.24E-08	1.36E-06	3.67E-07	3.34E-07
σK (m/s)	9.49241E-10	6.31E-08	4.51E-09	3.26E-09	1.51E-09	1.63E-08	1.07E-08	2.56E-08	9.22E-09	3.14E-07	4.62E-08	2.35E-08	1.32E-07	5.47E-08	1.16E-07	1.36E-07	1.66E-07	4.53E-08	4.4E-08	1.93E-07	3.68E-09	5.78E-07	1.2E-07	1.06E-07
ln(K)	-19.53577181	-15.3754	-18.0432	-18.5247	-19.0789	-16.878	-17.1202	-16.395	-17.2661	-13.8327	-15.7324	-16.4492	-14.6676	-16.035	-14.7669	-14.5889	-14.4034	-15.7166	-15.7571	-14.2247	-18.2026	-13.5106	-14.8187	-14.9112
σ(ln K)	0.289503855	0.300229	0.309474	0.362266	0.291068	0.349494	0.292444	0.337918	0.29053	0.319214	0.313958	0.326801	0.308414	0.503807	0.29915	0.29478	0.298136	0.302986	0.306605	0.291194	0.295754	0.425805	0.327284	0.317701
ln(K) min	-20.11477952	-15.9758	-18.6621	-19.2493	-19.661	-17.577	-17.7051	-17.0709	-17.8471	-14.4712	-16.3603	-17.1028	-15.2844	-17.0426	-15.3652	-15.1785	-14.9996	-16.3225	-16.3703	-14.8071	-18.7941	-14.3622	-15.4733	-15.5466
ln(K) max	-18.9567641	-14.7749	-17.4242	-17.8002	-18.4968	-16.179	-16.5353	-15.7192	-16.685	-13.1943	-15.1045	-15.7956	-14.0508	-15.0274	-14.1686	-13.9993	-13.8071	-15.1106	-15.1439	-13.6423	-17.6111	-12.659	-14.1641	-14.2758
K _{mínimo} (m/s)	1.83765E-09	1.15E-07	7.85E-09	4.37E-09	2.89E-09	2.32E-08	2.05E-08	3.86E-08	1.77E-08	5.19E-07	7.85E-08	3.74E-08	2.3E-07	3.97E-08	2.12E-07	2.56E-07	3.06E-07	8.15E-08	7.77E-08	3.71E-07	6.88E-09	5.79E-07	1.91E-07	1.77E-07
K _{máximo} (m/s)	5.85035E-09	3.83E-07	2.71E-08	1.86E-08	9.27E-09	9.41E-08	6.59E-08	1.49E-07	5.67E-08	1.86E-06	2.76E-07	1.38E-07	7.9E-07	2.98E-07	7.02E-07	8.32E-07	1.01E-06	2.74E-07	2.65E-07	1.19E-06	2.25E-08	3.18E-06	7.06E-07	6.31E-07
σT ₀ (%)	0.005948722	0.075702	0.130098	0.365163	0.016603	0.317914	0.025834	0.270385	0.012959	0.182375	0.154769	0.2199	0.124113	0.772057	0.069024	0.041212	0.062676	0.092445	0.113743	0.017455	0.04752	0.54049	0.222201	0.174568
σR (%)	0.994051278	0.924298	0.869902	0.634837	0.983397	0.682086	0.974166	0.729615	0.987041	0.817625	0.845231	0.7801	0.875887	0.227943	0.930976	0.958788	0.937324	0.907555	0.886257	0.982545	0.95248	0.45951	0.777799	0.825432

Legenda:

n : número de dados empregado no ajuste de reta

T₀ : tempo característico de HvorslevσT₀ : erro na determinação de T₀ devido à incerteza na determinação da relação entre ln(rebaixamento) e tempo

σR : erro atribuído à não centralização dos poços em relação à perfuração

K : condutividade hidráulica

σK : erro na determinação de K devido à σT₀ e à σR

ln(K) : logaritmo natural de K

σ(ln K) : erro na determinação de ln (K) devido à σT₀ e à σR

ln(K) min : ln(K) – 2*σ(ln K)

ln(K) max : ln(K) + 2*σ(ln K)

K_{mínimo} : exp[ln(K) min]K_{máximo} : exp[ln(K) max]σT₀ (%) : parcela do erro de determinação de K devido à imprecisão no ajuste de T₀

σR (%) : parcela do erro de determinação de K devido à não centralização dos poços em relação à perfuração

Tabela 2. Valores de condutividade obtidos através dos ensaios de permeabilidade para os poços de 6m de profundidade.

	PM01	PM02	PM04	PM05	PM06	PM07	PM08	PM09	PM10	PM11	PM12	PM13	PM14	PM16	PM17	PM18	PM19	PM20	PM21	PM22	PM23	PM24	PM25	PM26	PM28	PM30
n	5	10	9	5	13	14	6	5	8	9	10	8	24	19	8	18	21	15	10	9	4	3	14	7	4	5
T ₀ (s)	212.820036	3566.730346	1604.197578	600.0330365	251.7804632	5278.931191	451.049756	1076.039558	2575.428271	119.5325871	2433.989886	318.1870296	791.3287717	1069.642717	2849.228736	1891.426	677.9661	697.4257	1612.569	892.1859	4537.878	4575.826	2405.294	6986.229	7323.655	457.9995
σT ₀ (s)	45.56189428	291.8918314	97.14161464	63.38181937	21.04009834	314.8843071	68.10377309	236.6186225	238.8307349	9.174673339	109.2766437	27.83801193	20.10297374	84.17486285	229.8493795	73.98619	13.304	69.37669	77.07689	76.9214	1883.367	1774.51	150.186	894.3993	1336.537	167.7208
σR (m)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
K (m/s)	2.22208E-06	1.32588E-07	2.94792E-07	7.88132E-07	1.87824E-06	8.95835E-08	1.04845E-06	4.39487E-07	1.83622E-07	3.95629E-06	1.94292E-07	1.48625E-06	5.97609E-07	4.42115E-07	1.65976E-07	2.5E-07	6.98E-07	6.78E-07	2.93E-07	5.3E-07	1.04E-07	1.03E-07	1.97E-07	6.77E-08	6.46E-08	1.03E-06
σK (m/s)	7.98552E-07	3.97788E-08	8.69416E-08	2.42242E-07	5.64402E-07	2.64039E-08	3.41532E-07	1.59473E-07	5.56691E-08	1.18163E-06	5.67551E-08	4.48267E-07	1.73161E-07	1.3227E-07	4.97436E-08	7.28E-08	2.02E-07	2.07E-07	8.58E-08	1.6E-07	5.27E-08	5E-08	5.81E-08	2.14E-08	2.21E-08	4.81E-07
ln(K)	-13.01706294	-15.83602062	-15.03699499	-14.05360075	-13.18517357	-16.22809497	-13.76819369	-14.63765854	-15.51038715	-12.44020507	-15.45390315	-13.41925539	-14.33032956	-14.631696	-15.61141965	-15.2017	-14.1757	-14.204	-15.0422	-14.4503	-16.0768	-16.0852	-15.442	-16.5083	-16.5555	-13.7835
σln(K)	0.359370185	0.300018766	0.294925025	0.307362519	0.300494687	0.29474046	0.325747957	0.362862257	0.303172515	0.298672346	0.29211224	0.301609534	0.289757264	0.299176719	0.299702641	0.291281	0.289308	0.305302	0.292572	0.301243	0.505642	0.483429	0.295318	0.315759	0.341641	0.466282
ln(K) min	-13.73580331	-16.43065815	-15.62684504	-14.66832579	-13.78616294	-16.81757589	-14.41868961	-15.36336305	-16.11673218	-13.03754976	-16.03812763	-14.02247446	-14.90894409	-15.23004946	-16.21082493	-15.7843	-14.7543	-14.8146	-15.6273	-15.0528	-17.0891	-17.052	-16.0327	-17.1398	-17.2388	-14.716
ln(K) max	-12.29832257	-15.23598309	-14.44714495	-13.43887571	-12.58419419	-15.83861405	-13.11669778	-13.91193403	-14.9040212	-11.84286037	-14.86967867	-12.81603632	-13.75081503	-14.0334255	-15.01201437	-14.6191	-13.5971	-13.5934	-14.4571	-13.8478	-15.0855	-15.1183	-14.8514	-15.6768	-15.8722	-12.8509
K _{mínimo} (m/s)	1.08297E-06	7.2763E-08	1.63436E-07	4.26213E-07	1.02978E-06	4.96843E-08	5.48523E-07	2.127E-07	1.00136E-07	2.17703E-06	1.08325E-07	8.13049E-07	3.34763E-07	2.43038E-07	9.1144E-08	1.4E-07	3.91E-07	3.68E-07	1.63E-07	2.9E-07	3.79E-08	3.93E-08	1.09E-07	3.6E-08	3.26E-08	4.06E-07
K _{máximo} (m/s)	4.55939E-06	2.416E-07	5.31722E-07	1.45737E-06	3.42577E-06	1.61524E-07	2.01136E-06	9.08079E-07	3.36711E-07	7.18971E-06	3.48482E-07	2.71685E-06	1.06683E-06	8.04261E-07	3.02249E-07	4.48E-07	1.24E-06	1.25E-06	5.26E-07	9.68E-07	2.86E-07	2.72E-07	3.55E-07	1.27E-07	1.28E-07	2.62E-06
σT ₀ (%)	0.354890548	0.074405748	0.042157192	0.118107442	0.077335319	0.040957225	0.21484737	0.367247461	0.093562556	0.066041747	0.02362201	0.084143652	0.007686666	0.069188158	0.072452087	0.018039	0.004601	0.106163	0.02669	0.081913	0.67414	0.643506	0.044704	0.164386	0.286197	0.616804
σR (%)	0.645109452	0.925594252	0.957842808	0.881892558	0.922664681	0.959042775	0.78515263	0.632752539	0.906437444	0.933958253	0.97637799	0.915856348	0.992313334	0.930811842	0.927547913	0.981961	0.995399	0.893837	0.97331	0.918087	0.32586	0.356494	0.955296	0.835614	0.713803	0.383196

Legenda:

n : número de dados empregado no ajuste de reta

T₀ : tempo característico de HvorslevσT₀ : erro na determinação de T₀ devido à incerteza na determinação da relação entre ln(rebaixamento) e tempo

σR : erro atribuído à não centralização dos poços em relação à perfuração

K : condutividade hidráulica

σK : erro na determinação de K devido à σT₀ e à σR

ln(K) : logaritmo natural de K

σ(ln K) : erro na determinação de ln (K) devido à σT₀ e à σR

ln(K) min : ln(K) – 2*σ(ln K)

ln(K) max : ln(K) + 2*σ(ln K)

K_{mínimo} : exp[ln(K) min]K_{máximo} : exp[ln(K) max]σT₀ (%) : parcela do erro de determinação de K devido à imprecisão no ajuste de T₀

σR (%) : parcela do erro de determinação de K devido à não centralização dos poços em relação à perfuração

Tabela 3. Valores de condutividade obtidos através dos ensaios de permeabilidade para os poços de 10m de profundidade.

	PM02	PM03	PM04	PM05	PM06	PM07	PM08	PM09	PM10	PM11	PM12	PM13	PM14	PM16	PM17	PM18	PM19	PM20	PM21	PM22	PM23	PM24	PM25	PM26	PM28	PM30
n	220	501	38	200	301	320	330	301	190	251	121	226	86	301	246	109	321	226	372	154	721	56	451	551	115	574
T ₀ (s)	2526.058052	10300.38424	1290.214116	12932.96499	4795.545422	5377.484377	6127.108757	4689.66931	1740.130758	2746.829726	1151.202977	3570.392677	1336.056066	1978.470648	2716.746259	1132.512	4743.442	3088.725	11102.22	35266.99	6208.535	905.2689	10426.46	95.53766	4106.051	54241.43
σT ₀ (s)	20.43376377	29.51977709	30.81543828	61.69160205	36.94936381	24.15428202	48.02140214	24.50860258	18.94671191	42.73411047	20.49633559	58.20405227	32.8855286	23.89079419	36.75084676	40.76807	55.49427	41.1296	68.04967	1258.018	28.24727	38.80457	81.46119	4.893461	88.38663	613.6199
σR (m)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
K (m/s)	7.48993E-07	1.83682E-07	1.46642E-06	1.46293E-07	3.94533E-07	3.51837E-07	3.08792E-07	4.0344E-07	1.08727E-06	6.88794E-07	1.6435E-06	5.29914E-07	1.41611E-06	9.56294E-07	6.96421E-07	1.67E-06	3.99E-07	6.13E-07	1.7E-07	5.36E-06	5.36E-06	2.09E-06	1.81E-07	1.98E-05	4.61E-07	3.49E-08
σK (m/s)	5.43754E-08	1.32624E-08	1.11443E-07	1.05775E-08	2.86258E-08	2.54328E-08	2.24091E-08	2.91828E-08	7.93307E-08	5.08359E-08	1.22129E-07	3.91949E-08	1.07949E-07	6.99524E-08	5.11195E-08	1.35E-07	2.92E-08	4.49E-08	1.23E-08	4.32E-09	4.32E-09	1.75E-07	1.32E-08	1.75E-06	3.47E-08	2.55E-09
ln(K)	-14.10453609	-15.51005729	-13.43268427	-15.73765556	-14.74556354	-14.86009676	-14.99059907	-14.72323816	-13.73183635	-14.18832351	-13.31868355	-14.45055167	-13.46759813	-13.86020023	-14.17731102	-13.3023	-14.7346	-14.3056	-15.585	-16.7408	-16.7408	-13.0784	-15.5222	-10.8296	-14.5903	-17.1713
σln(K)	0.072597952	0.072202777	0.075996525	0.072303399	0.072556141	0.072285568	0.072570342	0.072334913	0.072962855	0.073804247	0.074310294	0.073964711	0.076229069	0.073149453	0.073403144	0.080628	0.073088	0.073364	0.072406	0.080483	0.080483	0.083919	0.072568	0.088479	0.075289	0.073027
ln(K) min	-14.249732	-15.85446284	-13.58467732	-15.89226236	-14.89067582	-15.0046679	-15.13573976	-14.86790798	-13.87776206	-14.335932	-13.46730414	-14.59848109	-13.62005628	-14.00649914	-14.32411731	-13.4636	-14.8808	-14.4524	-15.7298	-16.9018	-16.9018	-13.2462	-15.8674	-11.0066	-14.7408	-17.3174
ln(K) max	-13.35934019	-15.36565173	-13.28069122	-15.59304977	-14.80045125	-14.71552563	-14.94458309	-14.57856833	-13.58591064	-14.04071501	-13.17062296	-14.30262225	-13.31513999	-13.71390133	-14.03050474	-13.1411	-14.5885	-14.1589	-15.4402	-16.5799	-16.5799	-12.9105	-15.3771	-10.6827	-14.4398	-17.0253
K _{mínimo} (m/s)	6.47768E-07	1.58984E-07	1.25965E-06	1.26596E-07	3.41241E-07	3.04478E-07	2.67074E-07	3.491E-07	9.39647E-07	5.9427E-07	1.41652E-06	4.57046E-07	1.21586E-06	8.26142E-07	6.01333E-07	1.42E-06	3.45E-07	5.29E-07	1.47E-07	4.57E-06	4.57E-06	1.77E-06	1.57E-07	1.66E-05	3.96E-07	3.01E-08
K _{máximo} (m/s)	8.66035E-07	2.12218E-07	1.70714E-06	1.69054E-07	4.56147E-07	4.06564E-07	3.57026E-07	4.66239E-07	1.2581E-06	7.98353E-07	1.90684E-06	6.14398E-07	1.64933E-06	1.10695E-06	8.06546E-07	1.96E-06	4.62E-07	7.09E-07	1.97E-07	6.3E-08	6.3E-08	2.47E-06	2.1E-07	2.36E-05	5.36E-07	4.04E-08
σT ₀ (%)	0.012415418	0.001575475	0.098770137	0.004352497	0.011276896	0.00386124	0.011663803	0.005219835	0.022268978	0.044434792	0.057405128	0.048576404	0.104260322	0.027250833	0.033963092	0.199334	0.025622	0.032944	0.007166	0.196441	0.196441	0.260907	0.011592	0.335122	0.081746	0.023997
σR (%)	0.987584582	0.998424525	0.901229863	0.995647503	0.988723104	0.99613876	0.988336197	0.984780165	0.977731022	0.955565208	0.942594874	0.951423596	0.895739678	0.972749167	0.966036908	0.800666	0.974378	0.967056	0.992834	0.803559	0.803559	0.739093	0.988408	0.664878	0.918254	0.976003

Legenda:

n : número de dados empregado no ajuste de reta

T₀ : tempo característico de HvorslevσT₀ : erro na determinação de T₀ devido à incerteza na determinação da relação entre ln(rebaixamento) e tempo

σR : erro atribuído à não centralização dos poços em relação à perfuração

K : condutividade hidráulica

σK : erro na determinação de K devido à σT₀ e à σR

ln(K) : logaritmo natural de K

σ(ln K) : erro na determinação de ln (K) devido à σT₀ e à σR

ln(K) min : ln(K) – 2*σ(ln K)

ln(K) max : ln(K) + 2*σ(ln K)

K_{mínimo} : exp[ln(K) min]K_{máximo} : exp[ln(K) max]σT₀ (%) : parcela do erro de determinação de K devido à imprecisão no ajuste de T₀

σR (%) : parcela do erro de determinação de K devido à não centralização dos poços em relação à perfuração

Figura 43. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas.

Tabela 4. Distribuição dos poços com seções filtrantes em cada uma das camadas litológicas. Nos poços entre parêntesis não foi possível realizar *bail-test*.

Camada	Litologia	Poços
1	solo arenoso – argiloso de coloração clara a amarronzada, mal selecionada, apresentando desde argila até areia grossa e grânulos.	-
2	solo argiloso siltoso com matéria orgânica e de coloração preta.	PM03-3, PM04-3, PM09-3, PM10-3, PM25-3
3	areia fina a média com argila e silte de coloração marrom claro a escuro.	PM01-3, PM02-3, PM05-3, PM06-3, PM07-3, (PM08-3), PM11-3, PM12-3, PM13-3, PM14-3, PM16-3, PM17-3, (PM18-3), PM19-3, PM20-3, PM21-3, PM22-3, PM23-3, PM24-3, PM26-3, PM28-3, PM30-3
4	areia grossa com bastante grânulos e seixos.	(PM03-6), PM08-6
5	argila siltosa compacta de coloração cinza a azulada, aparecendo por vezes lentes centimétricas de uma areia fina a grossa.	PM01-6, PM02-6, PM04-6, PM05-6, PM06-6, PM07-6, PM09-6, PM10-6, PM11-6, PM12-6, PM13-6, PM14-6, PM16-6, PM17-6, PM18-6, PM19-6, PM20-6, PM21-6, PM22-6, PM23-6, PM24-6, PM25-6, PM26-6, PM28-6, PM30-6, (PM01-10)
6	areia que varia de fina a grossa, podendo conter silte e argila em grandes quantidades.	PM11-10, PM22-10
7	argila compacta de coloração azulada.	PM02-10, PM03-10, PM04-10, PM05-10, PM06-10, PM07-10, PM08-10, PM09-10, PM10-10, PM12-10, PM13-10, PM14-10, PM16-10, PM17-10, PM18-10, PM19-10, PM20-10, PM21-10, PM23-10, PM24-10, PM25-10, PM26-10, PM28-10, PM30-10,

Tabela 5. Distribuição dos poços com seções filtrantes em cada uma das camadas litológicas. Nos poços entre parêntesis não foi possível realizar *bail-test*.

Camada	Média de $\ln(K)$	Desvio padrão de $\ln(K)$	$\ln(K)_{\text{mínimo}}$	$\ln(K)_{\text{máximo}}$	$K_{\text{médio}} \text{ (m/s)}$	$K_{\text{mínima}} \text{ (m/s)}$	$K_{\text{máxima}} \text{ (m/s)}$
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-17.6863225	0.857439439	-18.5438	-16.8289	2.0841E-08	9.01E-09	7.58E-08
3	-15.6527964	1.615615308	-17.2684	-14.0372	1.5925E-07	3.28E-08	1.36E-06
4	-13.7681937	*	*	*	1.0485E-06	1.0485E-06	1.0485E-06
5	-14.7767403	1.112235012	-15.889	-13.6645	3.8242E-07	6.46E-08	3.96E-06
6	-15.7190807	1.350235479	-17.0693	-14.3688	1.4904E-07	5.36E-08	6.89E-07
7	-14.4571217	1.306485526	-15.7636	-13.1506	5.2644E-07	3.49E-08	1.98E-05

Legenda:

 $\ln(K)_{\text{mínimo}}$: Média de $\ln(K)$ - Desvio padrão de $\ln(K)$ $\ln(K)_{\text{máximo}}$: Média de $\ln(K)$ + Desvio padrão de $\ln(K)$ $K_{\text{médio}}$: $\exp[\text{Média de } \ln(K)]$ $K_{\text{mínima}}$: valor mínimo de K medido na camada $K_{\text{máxima}}$: valor máximo de K medido na camada

* Valores não calculados por insuficiência de dados

Figura 44. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas na camada 3.

Figura 45. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas na camada 5.

Figura 46. Histograma dos valores medidos de condutividades hidráulicas na camada 7.

5.5.2. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica

Para avaliar quantitativamente a variabilidade espacial da condutividade hidráulica, foram calculados os semi-variogramas experimentais (Kitanidis, 1997) com os dados de $\ln(K)$ nas camadas 3, 5 e 7. Tais semi-variogramas não permitem a determinação da correlação espacial entre valores medidos de K . Apesar de ser possível se ajustarem diversos modelos teóricos a esses semi-variogramas, eles sugerem que a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente (*range*) é inferior a 4m, menor distância entre duas medições de K . Desta forma, os valores de K medidos nos poços não apresentam correlação espacial entre eles, o que torna inviável a criação de um mapa de isovalores de K através da interpolação dos valores medidos. Neste tipo de estrutura de correlação espacial, a melhor estimativa de K em pontos não amostrados é o próprio valor exp [média de $\ln(K)$] em cada camada.

Figura 47. Semi-variograma experimental para dados de $\ln(K)$ na camada 3.

Figura 48. Semi-variograma experimental para dados de $\ln(K)$ na camada 5.

Figura 49. Semi-variograma experimental para dados de $\ln(K)$ na camada 7.

6. MODELO NUMÉRICO ESTACIONÁRIO

Uma das motivações para a realização deste projeto foi a observação do grande dinamismo da distribuição de cargas hidráulicas na área de estudos, onde é possível verificar variações diárias dos níveis d'água em cada poço. O objetivo final deste trabalho é o de, principalmente, produzir um modelo numérico computacional que represente esta transiência do fluxo. A estratégia escolhida para a realização desta empreitada foi a de inicialmente calibrar para a área um modelo estacionário. A vantagem nesse procedimento é, através do modelo estacionário calibrado, a de obter valores iniciais de condutividades hidráulicas que facilitarão a calibração do modelo transiente. O *software* empregado para realizar todos os modelos deste trabalho foi o *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996) na versão 2.8.2. Este programa resolve a equação de água subterrânea através do método de diferenças finitas e sua eficiência é plenamente reconhecida.

6.1. Escolha da campanha para o modelo estacionário

Muito embora o padrão de cargas na área estudada seja essencialmente transiente, é possível calibrar um modelo estacionário para a área, desde que ele tente reproduzir um período de tempo no qual as cargas hidráulicas medidas na área não variem significativamente. Desta forma, foram empregadas as campanhas do período 31 de janeiro a 3 de fevereiro de 2003, pois este período, denominado arbitrariamente de T1, foi aquele em que as cargas variaram menos em cada poço (desvio padrão médio em cada poço foi de 1,1cm).

Os valores assumidos para cada poço de monitoramento foi o valor médio das quatro campanhas do período.

6.2. Condições de contorno, volume modelado e discretização espacial

Não existem feições naturais na área de estudo que possam ser empregadas como condições de contorno. Desta forma, as únicas condições possíveis de serem usadas foram as médias das cargas dos poços externos PM01-3, PM02-3, PM03-3, PM04-3, PM05-3, PM06-3, PM10-3, PM11-3, PM16-3, PM20-3, PM21-3, PM25-3, PM28-3, PM30-3, PM01-6, PM02-6, PM03-6, PM04-6, PM05-6, PM06-6, PM10-6, PM11-6, PM16-6, PM20-6, PM21-6, PM25-6, PM28-6 e PM30-6 (condições do tipo I), definindo-se assim o volume modelado e seu contorno (figura 50). Verticalmente, o modelo é limitado superiormente pela própria superfície topográfica e inferiormente pela cota 89m, onde se encontram os filtros dos poços de 10m. Essa superfície inferior também foi considerada como do tipo I, onde os dados médios de carga de todos os poços de 10m de profundidade foram empregados como valores conhecidos de carga.

O volume modelado foi dividido em aproximadamente 65 colunas, 79 linhas e 16 camadas horizontais, perfazendo um total de 81.552 células, com proporções médias de 0,250cm X 0,254cm X 60cm, grade considerada refinada o suficiente para representar as variações bastante localizadas de carga hidráulica, mas com elementos seguramente maiores que o volume elementar representativo.

A inserção das condições de contorno demandou alguma atenção. Através dos dados médios de carga no período T1 dos poços do contorno, foram interpolados quatro mapas potenciométricos, um para cada parede da fronteira do volume modelado. Os valores das cargas médias dos poços do contorno não obedecem à uma distribuição normal de probabilidades, o que impediu a utilização da krigagem ordinária como método de interpolação. Desse modo, as interpolações foram realizadas pelo método do inverso do cubo da distância e os mapas gerados assim encontram-se nas figuras 51 a 54. Como comentado anteriormente, a camada de argila compacta que existe na profundidade de 10m não deve ser usada como base impermeável do modelo. Assim, foi necessário estabelecer também para a base do modelo um mapa potenciométrico através dos valores médios das cargas em T1 para os poços de 10m de profundidade (figura 55). Os valores destas interpolações foram inseridos, célula a célula, em todo o contorno do modelo, como condições de carga determinada (tipo I).

Figura 50. Área modelada.

Figura 51. Condições de contorno do tipo I para a parede norte do modelo estacionário.

Figura 52. Condições de contorno do tipo I para a parede sul do modelo estacionário.

Figura 53. Condições de contorno do tipo I para a parede leste do modelo estacionário.

Figura 54. Condições de contorno do tipo I para a parede oeste do modelo estacionário.

Figura 55. Condições de contorno do tipo I para a parede inferior do modelo estacionário.

6.3. Parâmetros hidrogeológicos

6.3.1. Calibração Automática

Um dos pontos principais deste projeto é o uso da calibração automática através do método de regressão não linear (Doherty, 2000), aplicado pelo módulo *PEST* do programa computacional *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996). O procedimento para a calibração automática de um modelo cuja distribuição de cargas hidráulicas é estacionária pode ser resumido em 4 passos:

1. Definição do número de parâmetros hidráulicos distintos dentro do volume modelado;

2. Definição da distribuição espacial dos parâmetros hidráulicos definidos no item 1;
3. Definição dos valores máximos e mínimos possíveis para cada parâmetro;
4. Processamento do código de calibração automática (no caso, o *PEST*). Tal código define uma função denominada função objetivo, ϕ , que nada mais é que a soma dos quadrados das diferenças entre os valores medidos e os valores calculados de carga hidráulica em cada poço. Através de avaliações numéricas da influência de cada parâmetro hidráulico no valor de ϕ , o código procura iterativamente os valores de cada parâmetro, dentro de sua faixa de validade, que levam a um mínimo da função objetivo. Este conjunto de valores de parâmetros que levam ao mínimo de ϕ é a chamada configuração otimizada de parâmetros.

Caso os valores ajustados pelo programa sejam razoáveis e a diferença entre valores medidos e calculados pelo modelo na configuração otimizada de parâmetros seja aceitável, o modelo está calibrado. Caso contrário deve ser procedida alguma alteração nas definições dos itens 1, 2 e 3.

Muito embora o método de calibração automática seja bastante eficiente e de grande utilidade, não está livre de algumas limitações. Primeiramente, o número de parâmetros a serem ajustados não deve superar o número de observações de carga hidráulica na área. Uma vez que os poços que estão no contorno do volume não podem ser empregados na calibração, já que as condições neste contorno são do tipo 1, existem então apenas 22 observações de carga no volume modelado e, portanto, este é o número máximo de parâmetros que podem ser simultaneamente otimizados nesta modelagem. Esta limitação é independente do código, sendo comum a todos os métodos matemáticos de solução de problemas inversos.

6.3.2. Recarga e evapotranspiração

As avaliações darcynianas de recarga para a área de estudo indicam que a recarga residual efetiva, aquela relativa apenas ao ingresso de água na área estudada, é de cerca de 5% da precipitação (Mondin, 2005), o que representa, para o período T1, um valor de aproximadamente 0,117mm/dia. Decidiu-se por simplicidade dividir a área em 30 subáreas distintas de recarga (figura 56), cada uma delas um quadrado aproximadamente centrado em cada ponto da figura 17. A cada uma destas subáreas foi associado como mínimo o valor de 100mm/ano e máximo de 600mm/ano.

Foi estabelecido arbitrariamente para toda a área apenas um valor de evapotranspiração, E1, com profundidade de extinção, PE, igual a 3m. Muito embora nem E1, nem PE sejam parâmetros calibráveis através do módulo *PEST* (Doherty, 2000) do programa *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996), a calibração dos valores de recarga, combinados a esse

valor fixo de evapotranspiração levaram a valores de recarga residual efetiva (Recarga não contabilizada nas condições de contorno – Evapotranspiração), concordantes com o levantado por Mondin (2005).

Figura 56. Zonas de diferentes intensidades de recarga para ao modelo estacionário.

6.3.3. Condutividades hidráulicas

Inicialmente, realizou-se uma simplificação das características litológicas observadas na área e descritas nas figuras 18 a 36 para apenas seis camadas litologicamente distintas, definidas na tabela 6, combinando-se, para tanto, as camadas 1 e 2 definidas na tabela 4 em uma única camada litológica. Esta combinação foi realizada visando-se contornar uma limitação do software *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996). Neste *software*, é possível definirem-se taxas de evapotranspiração para o modelo, todavia, as evapotranspirações só são

aplicadas na camada matemática mais superficial. Para áreas onde o nível d'água no modelo encontra-se abaixo da primeira camada matemática, a perda de água por evapotranspiração não pode ser representada. A combinação das duas primeiras camadas litológicas (contadas a partir da superfície topográfica) garantiu, nas modelagens realizadas, que os níveis d'água representados no modelo estivessem na camada matemática mais superficial. Uma vez que a primeira camada litológica é, além de não amostrada em termos de condutividade hidráulica, não saturada, parece não haver perda de representatividade ao se considerar esta combinação. Salienta-se que ao longo do restante deste texto, serão consideradas e mencionadas então apenas 6 camadas litológicas.

As interfaces entre as diferentes litologias foram determinadas pela descrição de cada poço e posteriormente interpoladas linearmente. A figura 57 mostra uma seção vertical apresentando as camadas litológicas e matemáticas empregadas nesta modelagem.

A definição das zonas de condutividade seguiu dois padrões distintos, baseados na quantidade de medições de K em cada camada litológica. Para cada uma das camadas com várias medidas de condutividade hidráulica (camadas litológicas 2, 4 e 6) foram atribuídas 30 zonas de condutividades distintas em torno de cada poço de monitoramento. Para as camadas 1 e 5, foram atribuídas zonas em torno dos poços onde haviam medições de condutividade e o restante da área englobado em uma única zona. Finalmente, para toda a camada litológica 3, onde há apenas um valor medido de K, foi associada apenas uma zona (figuras 58 a 63). Este procedimento redundou em 100 zonas de K, número máximo de zonas com as quais o módulo *PEST* (Doherty, 2000) do programa *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996) consegue operar. Para cada uma das 100 zonas, foram associados valores mínimo e máximo respectivamente iguais à metade do menor valor de K e ao dobro do maior valor de K medidos na camada à qual ela pertence. Tais valores podem ser verificados na tabela 5, lembrando-se da reformulação das camadas litológicas.

Não foi admitida nenhuma anisotropia horizontal no modelo, todavia para cada uma das 100 condutividades em questão, foi permitida, *a priori*, que a respectiva condutividade vertical fosse menor que a horizontal, perfazendo-se assim, um total de 200 valores de condutividade hidráulica para serem ajustados na calibração. Para as condutividades verticais, o valor mínimo atribuído foi o de uma ordem de grandeza inferior ao valor mínimo da respectiva condutividade horizontal, enquanto o valor máximo conferido foi exatamente o mesmo da condutividade horizontal condizente.

Tabela 6. Correlação entre camadas matemáticas e litologias.

Camada Matemática	Descrição
1	solo arenoso argiloso + solo argiloso com matéria orgânica
2,3,4	areia fina a média contendo silte e argila
5,6	areia fina a seixos
7,8,9,10,11	argila siltosa com lentes de areia fina a grossa
12,13,14,15	areia fina a grossa com silte e argila em grande proporção
16	argila compacta

Figura 57. Seção vertical ($y = 11\text{m}$) apresentando as camadas litológicas e matemáticas empregadas nas modelagens numéricas.

Figura 58. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 1.

Figura 59. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 2.

Figura 60. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 3.

Figura 61. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 4.

Figura 62. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 5.

Figura 63. Distribuição de condutividades hidráulicas na camada litológica 6.

6.3.4. Procedimento de calibração

Como comentado anteriormente, a existência de um número maior de observações que o de parâmetros a serem calibrados é um requerimento de métodos inversos e o método empregado pelo *PEST* (Doherty, 2000) não é exceção. Neste caso, o fato de existir 230 parâmetros a serem calibrados (100 condutividades horizontais, 100 condutividades verticais e 30 valores de recargas) e apenas 22 observações exige um procedimento de calibração alternativo. O procedimento adotado foi iterativo, visando não otimizar mais que 15 parâmetros de cada vez e não misturar parâmetros de camadas distintas no mesmo passo de otimização. Uma vantagem adicional desta metodologia é que ela previne o surgimento de zonas onde a

condutividade vertical é maior que horizontal sem que seja necessário se definir *a priori* o grau de anisotropia de cada zona. Tal procedimento consta dos seguintes passos:

1. Inserção dos valores iniciais dos 230 parâmetros no modelo;
2. Otimização via *PEST* dos parâmetros de R1 a R15;
3. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
4. Otimização via *PEST* dos parâmetros de R16 a R30;
5. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
6. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K1 a K6;
7. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
8. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K7 a K21;
9. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
10. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K22 a K36;
11. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
12. Otimização via *PEST* da condutividade vertical K37;
13. Inserção no modelo do parâmetro ajustado no passo anterior;
14. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K38 a K52;
15. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
16. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K53 a K67;
17. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
18. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K68, K69 e K70;
19. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
20. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K71 a K85;
21. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
22. Otimização via *PEST* das condutividades verticais de K86 a K100;
23. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
24. Inserção dos valores das condutividades verticais de K1 a K100 como valores mínimos para as respectivas condutividades horizontais;
25. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K1 a K6;
26. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
27. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K7 a K21;
28. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
29. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K22 a K36;
30. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
31. Otimização via *PEST* da condutividade vertical K37;
32. Inserção no modelo do parâmetro ajustado no passo anterior;
33. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K38 a K52;
34. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;

35. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K53 a K67;
36. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
37. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K68, K69 e K70;
38. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
39. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K71 a K85;
40. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
41. Otimização via *PEST* das condutividades horizontais de K86 a K100;
42. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior.
43. Execução do modelo e avaliação do erro de calibração. Em caso de erro acima do tolerável, voltar ao passo 2.

O valor inicial de recarga necessário no passo 1 para as zonas de R1 a R30 foi de 200mm/ano, enquanto que para as condutividades verticais e horizontais foram atribuídos neste passo os valores medidos nos *bail-tests*, quando existiam, ou o valor de $K_{\text{médio}}$ da tabela 5 para a camada em questão, quando não havia medições de K na zona.

6.3.5. Processamento do modelo

a) Parâmetros de processamento

O método numérico para resolver o sistema de equações lineares gerado pela discretização espacial da equação de água subterrânea na área foi o *WHS (Waterloo Hydrogeologic Solver)*, um dos quatro métodos existentes no programa *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996) na versão empregada, baseado no método de gradiente pré-conjugado para inversão das matrizes necessárias à solução do problema. Os parâmetros empregados foram os fornecidos pelo fabricante, com exceção do número máximo de iterações externas, modificado para 500, e do fator de amortecimento, alterado para 0,2.

b) Análise da qualidade do modelo

A qualidade numérica dos resultados obtidos nesta modelagem é atestada pelas seguintes características:

- Convergência do método de inversão de matrizes. O método *WHS* convergiu em menos de 100 iterações em todos os ensaios processados, o que atesta a estabilidade do modelo e a conseqüente confiabilidade dos resultados.

- **Balanço de Massa.** A discrepância entre as massas de água que entram e saem do volume modelado através de seu contorno, calculadas pelo modelo adotado como calibrado, foi de 1,3%, o que indica que a grade de elementos gerada é plenamente satisfatória para a resolução numérica da equação de fluxo de água subterrânea no volume.

6.3.6. Resultados

Segundo o exposto anteriormente, a configuração otimizada dos parâmetros é definida como o conjunto dos valores dos 230 parâmetros hidráulicos (30 recargas e 200 condutividades hidráulicas) que levaria a menor diferença entre cargas calculadas e observadas. Os valores de condutividade hidráulica e de recarga que levaram à menor diferença entre cargas calculadas e observadas encontram-se nas tabelas 7 e 8.

Observa-se, na tabela 8, que as recargas residuais, com raras exceções, estabeleceram-se nos limites de variação considerados para elas (entre 100 e 600mm/ano). Este conjunto de recargas residuais, quando descontada a evapotranspiração, gera no modelo um ingresso de água por recarga residual efetiva de 0,134mm/dia, próximo ao valor de 0,117mm/dia comentado anteriormente. Todavia, é notável a falta de sensibilidade deste modelo a alterações dos parâmetros hidráulicos, sendo possível afirmar que os erros de calibração observados são governados principalmente pela condição de contorno do tipo I.

A configuração descrita nas tabelas 7 e 8 gerou um erro médio quadrático normalizado (EMQN) da comparação entre cargas calculadas e observadas de 21,4%, com erro absoluto médio de (6 ± 1) cm. Apesar do valor de EMQN ser maior que o valor padrão de 10%, observa-se que a diferença entre valores calculados e observados é na média 6cm, bastante reduzida. Tendo em vista os eventuais erros inerentes à medição dos níveis e também que o modelo representa um comportamento médio para um período de quatro dias, poder-se-ia considerar o modelo apropriado para descrever o comportamento do fluxo na área em períodos de distribuições estacionárias de cargas hidráulicas, ainda mais quando se analisa a concordância entre recargas residuais efetivas geradas pelo modelo e a encontrada na literatura (Mondin, 2005). Entretanto, o baixo efeito das variações dos parâmetros sobre a diferença entre cargas calculadas e observadas, diferença esta apresentada graficamente na figura 64, evidencia a inadequação do modelo estacionário na descrição do fluxo subterrâneo na área, já que distribuições bastante distintas dos parâmetros hidráulicos geram modelos com EAM e EMQN semelhantes. Apenas como exemplo desta insensibilidade, foi gerado um modelo onde foi imposta a isotropia entre condutividades verticais e horizontais em todas as zonas, mantendo-se os valores de recarga idênticos aos do modelo anisotrópico. O modelo de menor diferença entre cargas medidas e calculadas nestas condições, cujos valores otimizados de

condutividades encontram-se na tabela 9, gerou um EAM de (6 ± 1) cm, idêntico ao do modelo anisotrópico, com EMQN igual a 24,6%, muito próximo do modelo anisotrópico. Devido a essa insensibilidade, o objetivo principal da produção deste modelo transiente, o de fornecer valores de condutividades que pudessem ser usados como estimativas iniciais para a calibração do modelo transiente, não pôde ser alcançado.

Tabela 7. Configuração otimizada das condutividades hidráulicas (modelo estacionário).

zona	Condutividade Horizontal (m/s)	Condutividade Vertical (m/s)
K1	2.43E-08	1.87E-08
K2	2.03E-07	1.50E-07
K3	8.79E-09	7.96E-09
K4	1.99E-07	1.47E-07
K5	3.33E-08	1.28E-08
K6	1.24E-08	9.94E-09
K7	2.52E-09	3.52E-09
K8	2.91E-07	9.16E-08
K9	1.39E-06	9.01E-07
K10	1.53E-07	1.53E-07
K11	3.47E-08	3.47E-08
K12	1.66E-08	4.52E-09
K13	6.35E-08	4.96E-08
K14	1.59E-06	1.02E-07
K15	2.52E-07	2.52E-07
K16	3.44E-07	1.58E-07
K17	1.80E-06	1.80E-06
K18	1.60E-06	1.32E-06
K19	2.58E-07	1.45E-08
K20	2.28E-08	1.12E-08
K21	1.23E-07	9.09E-08
K22	9.03E-07	5.48E-07
K23	1.37E-07	1.10E-07
K24	1.99E-07	1.57E-07
K25	3.49E-07	3.00E-07
K26	8.37E-07	7.49E-07
K27	5.46E-07	4.52E-07
K28	3.24E-07	2.06E-07
K29	2.27E-07	1.38E-07
K30	7.69E-07	4.65E-07
K31	1.77E-07	1.33E-07
K32	1.87E-06	1.36E-06
K33	1.72E-07	1.72E-07
K34	3.73E-07	2.93E-07
K35	1.76E-07	1.66E-07
K36	3.21E-07	3.21E-07
K37	1.36E-06	1.05E-06
K38	8.00E-06	2.22E-06
K39	7.71E-07	1.33E-07
K40	3.60E-07	3.60E-07
K41	3.28E-07	2.95E-07
K42	7.88E-07	7.88E-07
K43	8.00E-06	1.88E-06
K44	8.00E-06	8.96E-08
K45	5.95E-07	3.60E-07
K46	4.40E-07	4.40E-07
K47	2.42E-06	1.84E-07
K48	3.96E-06	3.96E-06
K49	4.32E-06	1.94E-07
K50	4.33E-06	1.49E-06

Tabela 7. (continuação)

zona	Condutividade Horizontal (m/s)	Condutividade Vertical (m/s)
K51	1.06E-06	5.98E-07
K52	1.82E-06	3.60E-07
K53	4.42E-07	4.42E-07
K54	1.86E-07	1.66E-07
K55	2.69E-07	2.50E-07
K56	7.22E-07	6.98E-07
K57	6.80E-07	6.78E-07
K58	2.93E-07	2.93E-07
K59	5.83E-07	5.30E-07
K60	1.83E-07	1.04E-07
K61	1.36E-07	1.03E-07
K62	2.31E-07	1.97E-07
K63	6.77E-08	6.77E-08
K64	4.09E-07	3.60E-07
K65	2.10E-07	6.46E-08
K66	4.81E-07	3.60E-07
K67	1.54E-07	1.03E-06
K68	1.92E-07	1.92E-07
K69	6.89E-07	6.89E-07
K70	5.37E-08	5.37E-08
K71	5.26E-07	5.19E-07
K72	7.49E-07	8.26E-07
K73	1.84E-07	1.73E-07
K74	1.47E-06	1.48E-06
K75	1.46E-07	1.41E-07
K76	3.95E-07	3.92E-07
K77	3.59E-07	3.52E-07
K78	3.11E-07	3.09E-07
K79	4.03E-07	3.88E-07
K80	1.09E-06	1.05E-06
K81	5.26E-07	4.73E-07
K82	1.74E-06	1.64E-06
K83	5.70E-07	5.30E-07
K84	1.68E-06	1.42E-06
K85	5.26E-07	4.77E-07
K86	9.56E-07	9.56E-07
K87	6.96E-07	6.96E-07
K88	1.67E-06	1.67E-06
K89	3.99E-07	3.99E-07
K90	6.13E-07	6.13E-07
K91	1.70E-07	1.70E-07
K92	5.26E-07	5.26E-07
K93	5.37E-08	5.37E-08
K94	2.09E-06	2.09E-06
K95	1.82E-07	1.82E-07
K96	1.98E-05	1.98E-05
K97	5.36E-07	5.36E-07
K98	4.61E-07	4.61E-07
K99	5.26E-07	5.26E-07
K100	3.49E-08	3.49E-08

**Tabela 8. Configuração otimizada
das recargas residuais (modelo
estacionário).**

zona	Recarga Residual (mm/ano)
R1	555
R2	600
R3	100
R4	130
R5	128
R6	600
R7	600
R8	100
R9	100
R10	100
R11	100
R12	100
R13	100
R14	100
R15	100
R16	100
R17	100
R18	100
R19	100
R20	100
R21	600
R22	600
R23	100
R24	100
R25	100
R26	530
R27	100
R28	120
R29	100
R30	100

**Tabela 9. Configuração alternativa de condutividades
hidráulicas (modelo estacionário).**

zona	Condutividade Horizontal (m/s)	Condutividade Vertical (m/s)
K1	2.08E-08	2.08E-08
K2	1.46E-08	1.46E-08
K3	9.01E-09	9.01E-09
K4	7.58E-08	7.58E-08
K5	3.17E-08	3.17E-08
K6	1.24E-08	1.24E-08
K7	3.28E-09	3.28E-09
K8	2.10E-07	2.10E-07
K9	1.59E-07	1.59E-07
K10	1.59E-07	1.59E-07
K11	5.18E-09	5.18E-09
K12	4.68E-08	4.68E-08
K13	3.67E-08	3.67E-08
K14	1.59E-07	1.59E-07
K15	1.59E-07	1.59E-07
K16	1.59E-07	1.59E-07
K17	3.83E-07	3.83E-07
K18	1.47E-07	1.47E-07
K19	1.59E-07	1.59E-07
K20	7.18E-08	7.18E-08
K21	1.59E-07	1.59E-07
K22	4.27E-07	4.27E-07
K23	1.09E-07	1.09E-07
K24	1.59E-07	1.59E-07
K25	3.86E-07	3.86E-07
K26	4.61E-07	4.61E-07
K27	5.56E-07	5.56E-07
K28	1.49E-07	1.49E-07
K29	1.44E-07	1.44E-07
K30	6.64E-07	6.64E-07
K31	1.59E-07	1.59E-07
K32	1.36E-06	1.36E-06
K33	1.59E-07	1.59E-07
K34	3.67E-07	3.67E-07
K35	1.59E-07	1.59E-07
K36	3.34E-07	3.34E-07
K37	1.05E-06	1.05E-06
K38	2.22E-06	2.22E-06
K39	1.33E-07	1.33E-07
K40	3.60E-07	3.60E-07
K41	2.95E-07	2.95E-07
K42	7.88E-07	7.88E-07
K43	1.88E-06	1.88E-06
K44	8.96E-08	8.96E-08
K45	3.60E-07	3.60E-07
K46	4.40E-07	4.40E-07
K47	1.84E-07	1.84E-07
K48	3.96E-06	3.96E-06
K49	1.94E-07	1.94E-07
K50	1.49E-06	1.49E-06

Tabela 9. (continuação)

zona	Condutividade Horizontal (m/s)	Condutividade Vertical (m/s)
K51	5.98E-07	5.98E-07
K52	3.60E-07	3.60E-07
K53	4.42E-07	4.42E-07
K54	1.66E-07	1.66E-07
K55	2.50E-07	2.50E-07
K56	6.98E-07	6.98E-07
K57	6.78E-07	6.78E-07
K58	2.93E-07	2.93E-07
K59	5.30E-07	5.30E-07
K60	1.04E-07	1.04E-07
K61	1.03E-07	1.03E-07
K62	1.97E-07	1.97E-07
K63	6.77E-08	6.77E-08
K64	3.60E-07	3.60E-07
K65	6.46E-08	6.46E-08
K66	3.60E-07	3.60E-07
K67	1.03E-06	1.03E-06
K68	1.92E-07	1.92E-07
K69	6.89E-07	6.89E-07
K70	5.37E-08	5.37E-08
K71	5.26E-07	5.26E-07
K72	7.49E-07	7.49E-07
K73	1.84E-07	1.84E-07
K74	1.47E-06	1.47E-06
K75	1.46E-07	1.46E-07
K76	3.95E-07	3.95E-07
K77	3.52E-07	3.52E-07
K78	3.09E-07	3.09E-07
K79	4.03E-07	4.03E-07
K80	1.09E-06	1.09E-06
K81	5.26E-07	5.26E-07
K82	1.64E-06	1.64E-06
K83	5.30E-07	5.30E-07
K84	1.42E-06	1.42E-06
K85	5.26E-07	5.26E-07
K86	9.56E-07	9.56E-07
K87	6.96E-07	6.96E-07
K88	1.67E-06	1.67E-06
K89	3.99E-07	3.99E-07
K90	6.13E-07	6.13E-07
K91	1.70E-07	1.70E-07
K92	5.26E-07	5.26E-07
K93	5.37E-08	5.37E-08
K94	2.09E-06	2.09E-06
K95	1.82E-07	1.82E-07
K96	1.98E-05	1.98E-05
K97	5.36E-07	5.36E-07
K98	4.61E-07	4.61E-07
K99	5.26E-07	5.26E-07
K100	3.49E-08	3.49E-08

Figura 64. Comparação entre cargas observadas em campo e calculadas pelo modelo estacionário de menor Erro Absoluto Médio.

7. MODELO NUMÉRICO TRANSIENTE

7.1. Escolha do período simulado

Segundo o exposto no item anterior, um modelo estacionário para a área de estudo é inadequado até mesmo para um período em que as cargas hidráulicas não variam significativamente, o que é mais uma evidência em favor da necessidade de um modelo transiente para descrever o fluxo em aquíferos livres e rasos.

Para a realização do modelo transiente proposto, inicialmente foi determinado o período de tempo a ser simulado. Apesar de ser possível se realizar um modelo que representasse menos detalhadamente a porção do aquífero estudado por um ano hidrológico, com o objetivo de estudar o efeito dos eventos de recarga rápida e intensa sugerido em Varnier (2001), decidiu-

se por simular o período de 19 de janeiro a 10 de fevereiro de 2003 (período T_2), por este se destacar como um intervalo de tempo com variação abrupta nas cargas médias nas profundidades 3m, 6m e 10m, como pode ser verificado na figura 39. Quando as cargas médias são calculadas para as seis camadas definidas no modelo estacionário (figura 65), outras feições se evidenciam, principalmente quando se analisam os padrões desta figura com as precipitações ocorridas na área de estudo no mesmo período (figura 66). Observa-se inicialmente um decrescimento discreto nas cargas médias de todas as camadas até o dia 20 de janeiro, seguido de um crescimento monotônico a partir do dia 21 de janeiro, precisamente a data de início de um período de chuvas mais intensas. As cargas médias elevam-se até atingirem picos, coincidentes em todas as camadas, no dia 2 de fevereiro, 8 dias após o dia de maior precipitação. A relação hidráulica entre camadas adjacentes pode ser melhor analisada através da tabela 10. Verifica-se que cada par de camadas adjacentes relacionam-se de maneira distinta. Destacadamente, nota-se que a camada 3 recebe água tanto da camada 2 quanto da 4 durante todo o período T_2 . Salienta-se que este resultado é baseado nos valores médios de carga hidráulica e que especificamente na camada 3, esses valores foram obtidos através de apenas dois poços de monitoramento, os poços P03-6 e P08-6, e que ao longo de T_2 , as cargas de P08-6 foram em média 0,53m superiores às de P03-6, o que sugere que os valores médios nesta camada podem não ser representativos. Outro aspecto que se destaca é o fato da relação entre c1 e c2 ser praticamente inversa à relação entre c5 e c6.

Figura 65. Cargas médias nas camadas litológicas definidas no modelo estacionário para o período de 18 de janeiro a 10 de fevereiro de 2003.

Figura 66. Precipitação ocorrida na área de estudo entre os dias 16 de janeiro e 13 de fevereiro de 2003.

Tabela 10. Interação entre camadas adjacentes levantada através dos valores de carga média. A letra “a” denota dias de fluxo ascendente, enquanto “d” os de fluxo descendente.

	19/1	20/1	21/1	22/1	23/1	24/1	25/1	26/1	27/1	28/1	29/1	30/1	31/1	1/2	2/2	3/2	4/2	5/2	6/2	7/2	8/2	9/2	10/2
fluxo entre as camadas c1 e c2	a	a	a	a	a	a	a	a	a	d	d	d	d	d	d	d	a	a	a	a	a	d	d
fluxo entre as camadas c2 e c3	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
fluxo entre as camadas c3 e c4	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
fluxo entre as camadas c4 e c5	a	a	a	a	a	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
fluxo entre as camadas c5 e c6	d	d	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	d	d	d	d	d	a	a

7.2. Condições de contorno, volume modelado e discretização espacial.

Por simplicidade, o volume modelado e a malha de elementos finitos do modelo transiente foram os mesmos do modelo estacionário. A definição das condições de contorno foi realizada de forma semelhante ao caso estacionário. Através das cargas dos poços localizados nos limites do volume modelado (PM01-3, PM02-3, PM03-3, PM04-3, PM05-3, PM06-3, PM10-3, PM11-3, PM16-3, PM20-3, PM21-3, PM25-3, PM28-3, PM30-3, PM01-6, PM02-6, PM03-6, PM04-6, PM05-6, PM06-6, PM10-6, PM11-6, PM16-6, PM20-6, PM21-6, PM25-6, PM28-6 e PM30-6 e todos os poços de profundidade 10m), foram interpolados, pelo método do inverso do cubo da distância, mapas potenciométricos para cada parede do volume modelado (norte, sul, leste, oeste e parede inferior), para cada um dos dias do período T_2 . Os valores destas interpolações foram inseridos, célula a célula, em todo o contorno do modelo, para cada um dos dias de T_2 , como condições do tipo I. O Anexo B apresenta como exemplo os mapas potenciométricos para todas as paredes do contorno nos dias 19 de janeiro, 02 e 10 de fevereiro de 2003.

7.3. Condição inicial.

No caso de modelos transientes, a simulação necessita de uma distribuição inicial de cargas hidráulicas, ou seja, a distribuição de cargas no volume modelado para o chamado *dia zero* da simulação, no caso o dia 19 de janeiro de 2003. Especificamente no programa *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996), essa condição inicial é inserida em cada uma das camadas matemáticas. Esta peculiaridade do programa a princípio se constituiu uma dificuldade, já que apenas as camadas c2, c4 e c6 são bem amostradas no que tange a valores de carga hidráulica. Para contornar esse problema, foram associados às camadas matemáticas relativas às litológicas c2, c4 e c6 os valores de carga hidráulica medidas nestas camadas no dia 19 de janeiro. Para as camadas matemáticas referentes à litologia 3, foram designadas as médias das cargas associadas a c2 e c4. Analogamente, às camadas matemáticas referentes a c5 associaram-se as médias dos valores de carga de c4 e c6. Finalmente, na camada matemática condizente à c1, foram empregados os mesmos valores de c2. Todos esses valores de carga em cada camada foram interpolados linearmente pelo próprio *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996), gerando-se assim a condição inicial necessária.

7.4. Procedimento inicial de calibração do modelo estacionário

As mesmas 100 zonas de condutividades hidráulicas definidas no item 6.3.3. para o modelo estacionário foram empregadas no modelo transiente. Em cada uma das zonas foi permitida a existência de anisotropia entre condutividades horizontais e verticais e os valores mínimos e máximos para as condutividades horizontais e verticais em cada zona também foram idênticos aos adotados no modelo estacionário. Para cada camada litológica foi designada uma zona de armazenamento específico, empregando-se como limites os valores mínimo e máximo de 0,01 e 0,5, valores respectivamente inferior e superior às porosidades efetivas esperadas para as litologias encontradas na área de estudo. Desta forma, apenas considerando as condutividades hidráulicas horizontais e verticais e também as vazões específicas, seriam 206 os parâmetros a serem calibrados.

Quanto à recarga, inicialmente, as mesmas 30 zonas usadas no modelo estacionário foram empregadas no transiente. Como existem 22 dias no período T_2 , cada dia com o seu valor de precipitação e, a princípio, de recarga, a utilização destas zonas gerou 660 parâmetros de recarga a serem calibrados, já que o módulo *PEST* considera cada recarga diária dentro de cada zona um parâmetro de calibração distinto. Adotou-se como mínimo para todas as 660 recargas o valor de 0mm/dia. Como valor máximo para cada dia do período T_2 empregou-se 5% da soma da precipitação do dia em questão e as dos dois dias anteriores a ele, como

exemplificado na equação 2. O que motivou esta escolha foi o fato de haver, na área, correlação linear entre as cargas médias medidas no dia i e a soma das precipitações dos dias i , $i-1$ e $i-2$ (Mondin, 2005). Não houve distinção entre valores máximos e mínimos para zonas diferentes.

$$\text{VMR}_{25 \text{ de janeiro}} = 0,05 * (\text{P}_{25 \text{ de janeiro}} + \text{P}_{24 \text{ de janeiro}} + \text{P}_{23 \text{ de janeiro}}) \quad (2)$$

na qual:

$\text{VMR}_{25 \text{ de janeiro}}$ é o valor máximo de recarga no dia 25 de janeiro;

P_i é o valor da precipitação do dia i .

Esta configuração de zonas de condutividades, recargas e vazões específicas, além de redundar em um número de parâmetros proibitivo (866), também leva ao problema de haver um número maior de parâmetros que o de observações (462 observações, resultantes de 22 poços monitorados em 21 dias). Inicialmente, a calibração foi realizada mais uma vez em um esquema iterativo, descrito a seguir, com os valores iniciais de condutividades os mesmos empregados inicialmente no modelo estacionário e valores de recarga e vazão específica as médias entre valores máximos e mínimos.

1. Inserção dos valores iniciais dos 866 parâmetros no modelo;
2. Otimização via PEST dos parâmetros de R1 a R330;
3. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
4. Otimização via PEST dos parâmetros de R331 a R660;
5. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
6. Otimização via PEST das condutividades verticais de K1 a K100;
7. Inserção dos valores das condutividades verticais de K1 a K100 como valores mínimos para as respectivas condutividades horizontais;
8. Otimização via PEST das condutividades horizontais de K1 a K100;
9. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
10. Otimização via PEST das vazões específicas Sy1 a Sy6;
11. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
12. Execução do modelo e avaliação do erro de calibração. Em caso de erro acima do tolerável, voltar ao passo 2.

Apesar do número de passos do procedimento de calibração do modelo transiente ser consideravelmente menor que o do modelo estacionário, a execução de uma iteração do procedimento transiente é muito mais dispendiosa em termos de tempo, devido não só ao

grande número de parâmetros, mas também ao tempo necessário para a execução do modelo transiente. Após as primeiras iterações do procedimento considerado, observou-se que a sensibilidade dos erros de calibração aos 660 valores de recarga é, no geral, 10.000 vezes inferior à sensibilidade referente às condutividades hidráulicas horizontais, verticais e às vazões específicas. Desta forma, decidiu-se seguir um procedimento alternativo de calibração. Neste novo algoritmo, descrito a seguir, as recargas foram retiradas da calibração, que foi realizada apenas com as condutividades hidráulicas e as vazões específicas. Em contrapartida, através dos comportamentos dos poços de monitoramento da profundidade de 3m em relação à variação da carga hidráulica com o tempo, a camada 1 foi dividida em zonas distintas com três diferentes valores de vazões específicas, como pode ser visto na figura 67;

1. Inserção dos valores iniciais dos 208 parâmetros no modelo;
2. Otimização via PEST das condutividades verticais de K1 a K100;
3. Inserção dos valores das condutividades verticais de K1 a K100 como valores mínimos para as respectivas condutividades horizontais;
4. Otimização via PEST das condutividades horizontais de K1 a K100;
5. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
6. Otimização via PEST das vazões específicas Sy1 a Sy8;
7. Inserção no modelo dos parâmetros ajustados no passo anterior;
8. Execução do modelo e avaliação do erro de calibração. Em caso de erro acima do tolerável, voltar ao passo 2.

Os valores iniciais para as condutividades verticais e horizontais foram os medidos nos *bail-tests*, quando existiam, ou o valor de $K_{\text{médio}}$ da tabela 5 para a camada em questão, quando não havia medições de K na zona. Os valores máximos e mínimos para estes parâmetros foram tomados sem modificações das definições do modelo estacionário. Quanto às vazões específicas, os valores mínimos e máximos para cada uma delas foram 0,001 e 0,5. com valores iniciais de 0,3 para Sy3, 0,01 para Sy4 e Sy6 e 0,2 para as demais zonas.

Após ser alcançado o menor EAM possível no processo, a distribuição espacial dos erros foi analisada e decidiu-se por empregar apenas as zonas de recarga representadas na figura 68. Os valores mínimos e máximos para as recargas diárias em cada zona desta figura foram respectivamente zero e os definidos através da equação 2.

Figura 67. Zonas de vazões específicas distintas, apresentadas esquematicamente tanto em seção como em planta na camada 1.

Figura 68. Zonas de recargas distintas.

7.5. Processamento do modelo

Analogamente ao modelo estacionário, o método numérico para resolver o sistema de equações lineares gerado pela discretização espacial da equação de água subterrânea na área para o modelo transiente foi o WHS (*Waterloo Hydrogeologic Solver*). Os parâmetros empregados foram os fornecidos pelo fabricante, com exceção no número máximo de iterações externas, modificado para 5000 e do fator de amortecimento, alterado para 0,27.

A qualidade numérica dos resultados obtidos nesta modelagem é atestada pelas seguintes características:

- Convergência do método de inversão de matrizes. Não houve problemas de convergência em todas as simulações realizadas.

- **Balanço de Massa.** A discrepância entre as massas de água que entram e saem do volume modelado através de seu contorno, calculadas pelo modelo adotado como calibrado foi de -5,9%, quando contabilizados cumulativamente todos os dias do período T_2 . Quando se observa a evolução da discrepância cumulativa (figura 68), verifica-se que existe um salto considerável em 23 de janeiro, após o qual ocorre uma queda gradual até 5 de fevereiro, a partir do que novo crescimento ocorre, desta vez no sentido inverso (massa saindo do volume modelado maior que a massa entrando). Acredita-se que, através do resultado do balanço de massa do modelo estacionário, que a malha de elementos finitos seja suficientemente densa para bem representar o fluxo subterrâneo na área de estudo. Neste caso, os problemas observados com o balanço de massa podem se dever a uma má representação temporal do problema. Provavelmente, o dinamismo do aquífero durante um evento de recarga rápida só poderia ser representado com baixos erros no balanço de massa através de modelos baseados em medições mais freqüentes de cargas hidráulicas, que não apenas a freqüência diária.

Figura 69. Discrepância cumulativa do balanço de massa para o período T_2 . O dia 1 da simulação corresponde a 20 de janeiro de 2003.

7.6. Apresentação e discussão dos resultados

7.6.1. Erros de calibração.

O procedimento de calibração foi continuado até que os valores de EMQN e EAM não mais se alterassem significativamente. Posteriormente, foram otimizados os valores de recarga também até que os erros médios quadráticos normalizados e absolutos médios se estabilizassem. Os valores de condutividades hidráulicas horizontais e verticais, bem como os de recarga e de vazões específicas que levaram às menores diferenças entre cargas calculadas e medidas para cada dia de T_2 são o assunto das tabelas 11, 12 e 13. Este conjunto de valores otimizados define o modelo transiente mais representativo para a área, denominado modelo MT.

Os valores de condutividades, recargas residuais e vazões específicas otimizados produziram valores de diferenças entre cargas medidas e calculadas pelo modelo MT, ao longo do período T_2 , apresentados na tabela 14. Verifica-se nesta tabela que os erros EMQN foram superiores ao valor padrão de 10 %, em todos os dias simulados. A razão para isso é o baixo valor do fator de normalização (FN) do erro quadrático médio normalizado, definido como:

$$FN = \text{carga observada máxima} - \text{carga calculada mínima} \quad (3)$$

Uma vez que este fator se estabelece em aproximadamente 30cm para os dias simulados, apenas modelos com erro médio quadrático inferiores a 3cm teriam EMQN inferior ao valor padrão. Devido às imprecisões acumuladas não só na produção e calibração do modelo transiente, mas também nos procedimentos experimentais, como a instalação e o monitoramento de poços e a determinação das condutividades hidráulicas, acredita-se que um valor tão reduzido de erro quadrático médio seja inalcançável. Tendo este fato em vista, a análise dos erros absolutos médios e erros quadráticos médios da tabela 14 mostra que estes valores estiveram respectivamente entre 5cm e 9cm e entre 8cm e 11cm, com valores médios iguais a $(7 \pm 1)\text{cm}$ e $(9 \pm 1)\text{cm}$. Tais valores são considerados suficientemente baixos para considerar o modelo MT como calibrado. Uma comparação entre valores de carga hidráulica calculados pelo modelo e medidos em campo, individualizado para cada poço e para cada dia do período T_2 pode ser observada no Anexo C.

Tabela 11. Configuração otimizada das condutividades hidráulicas (modelo transiente).

zona	Condutividade Horizontal (m/s)	Condutividade Vertical (m/s)
K1	1.500E-07	1.500E-07
K2	1.500E-07	1.500E-07
K3	1.052E-08	7.546E-09
K4	1.511E-07	1.500E-07
K5	3.382E-08	1.902E-08
K6	1.503E-08	1.094E-08
K7	3.323E-09	3.323E-09
K8	3.711E-07	9.067E-08
K9	1.996E-06	1.102E-06
K10	1.750E-07	1.543E-07
K11	3.308E-08	2.386E-08
K12	1.785E-08	5.579E-09
K13	7.848E-08	3.548E-08
K14	1.578E-06	9.811E-08
K15	3.968E-07	3.968E-07
K16	2.922E-07	1.655E-07
K17	2.693E-06	1.922E-06
K18	1.805E-06	1.146E-06
K19	1.582E-07	1.617E-08
K20	2.107E-08	8.602E-09
K21	9.558E-08	9.558E-08
K22	1.060E-06	5.244E-07
K23	1.872E-07	1.872E-07
K24	2.490E-08	2.490E-08
K25	3.600E-07	2.992E-07
K26	6.839E-07	6.388E-07
K27	6.893E-07	2.900E-07
K28	4.458E-07	1.181E-07
K29	1.837E-07	9.298E-08
K30	6.681E-07	4.310E-07
K31	1.533E-07	1.516E-07
K32	2.527E-06	8.473E-07
K33	1.893E-07	1.479E-07
K34	3.434E-07	1.884E-07
K35	1.884E-07	1.884E-07
K36	3.144E-07	3.090E-07
K37	1.360E-06	1.050E-06
K38	5.707E-06	2.263E-06
K39	6.283E-07	1.556E-07
K40	3.397E-07	3.216E-07
K41	4.445E-07	2.615E-07
K42	1.135E-06	6.296E-07
K43	8.000E-06	2.018E-06
K44	7.253E-06	1.034E-07
K45	4.365E-07	2.800E-07
K46	3.654E-07	3.654E-07
K47	2.924E-06	1.657E-07
K48	3.963E-06	3.501E-06
K49	4.522E-06	2.544E-07
K50	4.129E-06	1.444E-06

Tabela 11. (continuação)

zona	Condutividade Horizontal (m/s)	Condutividade Vertical (m/s)
K51	1.634E-06	6.938E-07
K52	7.871E-07	4.797E-07
K53	1.007E-06	3.734E-07
K54	1.833E-07	1.833E-07
K55	8.174E-07	2.355E-07
K56	6.330E-07	6.330E-07
K57	6.551E-07	6.551E-07
K58	3.033E-07	3.033E-07
K59	5.825E-06	4.974E-07
K60	1.160E-07	1.160E-07
K61	1.477E-07	1.153E-07
K62	2.103E-06	1.919E-07
K63	2.203E-07	7.003E-08
K64	3.580E-07	3.580E-07
K65	4.603E-07	6.079E-08
K66	3.707E-06	3.078E-07
K67	1.303E-06	9.616E-07
K68	2.094E-07	2.094E-07
K69	1.400E-06	6.412E-07
K70	8.761E-08	6.087E-08
K71	5.260E-07	4.443E-07
K72	8.000E-07	7.933E-07
K73	1.837E-07	1.733E-07
K74	1.500E-06	1.476E-06
K75	1.463E-07	1.326E-07
K76	3.945E-07	3.805E-07
K77	3.518E-07	3.183E-07
K78	3.088E-07	2.485E-07
K79	4.034E-07	3.442E-07
K80	1.087E-06	9.004E-07
K81	5.260E-07	4.765E-07
K82	1.700E-06	1.655E-06
K83	5.700E-07	5.694E-07
K84	2.200E-06	2.107E-06
K85	5.260E-07	5.028E-07
K86	1.000E-06	9.918E-07
K87	6.964E-07	6.101E-07
K88	1.671E-06	1.610E-06
K89	5.300E-07	5.225E-07
K90	7.000E-07	6.645E-07
K91	2.000E-07	1.777E-07
K92	5.260E-07	5.001E-07
K93	7.000E-08	6.505E-08
K94	2.500E-06	2.347E-06
K95	2.100E-07	2.033E-07
K96	2.100E-06	2.041E-06
K97	7.000E-07	6.343E-07
K98	7.100E-07	7.098E-07
K99	5.700E-07	5.647E-07
K100	3.488E-08	3.399E-08

Tabela 12. Configuração otimizada das recargas residuais (modelo transiente). *R total* representa a soma das recargas ponderadas pela área superficial de cada uma das zonas de recarga.

dia	ao dia	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	R4 (mm)	R total
0	1	1.378082	1.58	1.14411	0.074247	0.983307
1	2	1.874247	0.974795	0.974795	0.974795	1.470606
2	3	0	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0	0
4	5	0.543562	0.575068	0.575068	0.575068	0.557621
5	6	0.986301	1.144932	1.144932	1.144932	1.057317
6	7	1.074795	1.074795	1.074795	1.074795	1.074655
7	8	2.659178	2.04	2.04	2.04	2.381136
8	9	2.130137	1.634795	1.634795	1.634795	1.907703
9	10	0.144658	0.224932	0.224932	0.224932	0.180641
10	11	0.249041	0.724932	0.724932	0.724932	0.462441
11	12	0.875342	1.2	1.2	1.2	1.020835
12	13	0.875616	0.6	0.6	0.6	0.751891
13	14	0.493151	0.244932	0.244932	0.244932	0.381762
14	15	0.400274	0.42	0.42	0.42	0.409069
15	16	0.297808	0.224932	0.224932	0.224932	0.265085
16	17	0.09589	0.049863	0.049863	0.049863	0.075235
17	18	0	0	0	0	0
18	19	0	0	0	0	0
19	20	0	0	0	0	0
20	21	0	0	0	0	0
21	22	0	0	0	0	0

Tabela 13. Configuração otimizada das vazões específicas (modelo transiente).

zona	Vazão Específica
Sy1	0.49
Sy2	0.27
Sy3	0.30
Sy4	0.01
Sy5	0.20
Sy6	0.01
Sy7	0.28
Sy8	0.17

Tabela 14. Erros de calibração do modelo transiente

dia	erro absoluto médio (m)	erro médio quadrático (m)	erro médio quadrático normalizado (%)
1	0.06	0.09	18.87
2	0.09	0.11	21.62
3	0.09	0.1	21.43
4	0.07	0.09	22.13
5	0.09	0.1	26.32
6	0.09	0.1	27.23
7	0.07	0.09	24.25
8	0.07	0.09	24.14
9	0.06	0.08	24.2
10	0.05	0.08	23.52
11	0.05	0.08	24.16
12	0.06	0.08	24.8
13	0.06	0.09	25.28
14	0.06	0.09	22.8
15	0.06	0.09	22.62
16	0.06	0.09	23.61
17	0.06	0.09	23.14
18	0.07	0.09	24.91
19	0.07	0.09	26.69
20	0.06	0.08	35
21	0.08	0.1	28.87
22	0.08	0.1	28.81
Valores médios	0.069	0.091	24.75
Desvios Padrão	0.013	0.008	3.30

7.6.2. Sensibilidade dos parâmetros calibrados

Para auxiliar a análise do significado dos valores calibrados, foram determinadas através do módulo *PEST* do programa *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996) as sensibilidades dos erros relativamente a cada parâmetro de calibração, apresentadas nas tabelas 15, 16 e 17. Os valores destas tabelas encontram-se resumidos através das médias para cada tipo de parâmetro na tabela 18. Nota-se que, muito embora o grande dinamismo das cargas durante o período T_2 seja relacionado ao evento de precipitação e conseqüentemente recarga, as recargas resíduas, aquelas que ocorrem devido apenas a chuvas que caem sobre o volume modelado, pouco têm relação com os valores calculados de carga. Isso pode ser explicado pela soma de dois mecanismos. O primeiro deles diz respeito à profundidade de influência da recarga residual. Provavelmente o aumento e a diminuição da entrada de água através de recarga residual não sejam suficientemente intensos para alterar as cargas dos poços de 6m de profundidade, o que minimizaria o efeito desse parâmetro na variação global das cargas na área estudada. O segundo mecanismo seria o de defasagem temporal da recarga residual e da recarga de base, aquela que faz variar as cargas no contorno do volume modelado. Como a recarga residual é controlada pela precipitação na área modelada e a recarga de base por fatores regionais, é possível que haja uma defasagem no tempo característico de cada recarga e o efeito da residual sobre os poços deve assim ser minimizado.

Verifica-se também na tabela 18 que as sensibilidades médias das condutividades hidráulicas verticais e horizontais se encontram próximas e um pouco mais elevadas que a referente às vazões específicas.

Quando se observam as sensibilidades não pelas médias, mas pelos valores unitários das tabelas 15 e 17, conclui-se inicialmente que apenas as vazões específicas das camadas litológicas 1 e 2 influenciam os resultados da calibração. Em termos de condutividades hidráulicas verifica-se que praticamente todas as zonas designadas para o volume modelado têm importância semelhante.

Tabela 15. Sensibilidade das condutividades hidráulicas.

zona	Condutividade Horizontal	Condutividade Vertical
K1	7.33E-02	1.15E-02
K2	4.62E-02	5.29E-02
K3	1.91E-02	1.66E-02
K4	5.08E-02	9.00E-03
K5	5.57E-03	6.47E-03
K6	4.46E-03	1.12E-02
K7	7.22E-03	1.27E-02
K8	7.49E-03	1.42E-02
K9	1.72E-02	1.37E-02
K10	3.54E-02	1.11E-02
K11	1.27E-02	1.05E-02
K12	6.24E-03	1.22E-02
K13	1.26E-02	8.48E-03
K14	3.30E-03	1.26E-02
K15	9.48E-03	9.65E-03
K16	7.81E-03	6.18E-03
K17	7.77E-03	7.04E-03
K18	1.02E-02	5.75E-03
K19	3.11E-03	9.99E-03
K20	8.70E-03	3.70E-03
K21	1.01E-02	1.14E-02
K22	7.88E-03	9.31E-03
K23	3.36E-03	5.55E-03
K24	5.05E-03	3.58E-03
K25	5.13E-03	1.12E-02
K26	7.09E-03	8.12E-03
K27	8.66E-03	9.40E-03
K28	6.57E-03	1.56E-02
K29	6.35E-03	8.53E-03
K30	1.07E-02	6.89E-03
K31	1.50E-02	8.90E-03
K32	1.08E-02	7.95E-03
K33	9.24E-03	1.39E-02
K34	1.03E-02	8.84E-03
K35	5.39E-03	3.93E-03
K36	2.01E-02	1.06E-02
K37	8.68E-03	8.68E-03
K38	6.07E-03	3.15E-03
K39	6.45E-03	1.04E-02
K40	5.43E-03	6.10E-03
K41	9.44E-03	9.99E-03
K42	1.31E-02	9.38E-03
K43	9.07E-03	4.19E-03
K44	4.96E-03	6.89E-03
K45	6.89E-03	9.10E-03
K46	4.81E-03	1.09E-02
K47	4.83E-03	8.70E-03
K48	4.37E-03	9.13E-03
K49	5.49E-03	9.57E-03
K50	1.63E-02	7.46E-03

Tabela 15 – (continuação).

zona	Condutividade Horizontal	Condutividade Vertical
K51	1.19E-02	1.19E-02
K52	6.75E-03	6.75E-03
K53	7.34E-03	7.34E-03
K54	4.38E-03	4.38E-03
K55	6.99E-03	6.99E-03
K56	3.29E-03	3.29E-03
K57	6.57E-03	6.57E-03
K58	8.21E-03	8.21E-03
K59	5.78E-03	5.78E-03
K60	3.77E-03	3.77E-03
K61	5.35E-03	5.35E-03
K62	1.31E-02	1.31E-02
K63	4.83E-03	4.83E-03
K64	6.09E-03	6.09E-03
K65	1.14E-02	1.14E-02
K66	8.71E-03	8.71E-03
K67	6.28E-03	6.28E-03
K68	6.71E-03	6.71E-03
K69	8.86E-03	8.86E-03
K70	4.86E-03	4.86E-03
K71	8.48E-03	8.48E-03
K72	5.17E-02	5.17E-02
K73	6.70E-03	6.70E-03
K74	2.72E-03	2.72E-03
K75	6.37E-03	6.37E-03
K76	3.92E-03	3.92E-03
K77	5.97E-03	5.97E-03
K78	7.40E-03	7.40E-03
K79	6.10E-03	6.10E-03
K80	3.04E-03	3.04E-03
K81	4.78E-03	4.78E-03
K82	2.63E-03	2.63E-03
K83	1.87E-03	1.87E-03
K84	4.82E-03	4.82E-03
K85	5.30E-03	5.30E-03
K86	9.05E-03	9.05E-03
K87	7.76E-03	7.76E-03
K88	3.61E-02	3.61E-02
K89	1.11E-02	1.11E-02
K90	4.28E-03	4.28E-03
K91	7.31E-03	7.31E-03
K92	1.31E-02	1.31E-02
K93	5.55E-03	5.55E-03
K94	4.98E-03	4.98E-03
K95	6.14E-03	6.14E-03
K96	8.85E-03	8.85E-03
K97	3.95E-03	3.95E-03
K98	4.89E-03	4.89E-03
K99	6.94E-03	6.94E-03
K100	3.99E-03	3.99E-03

Tabela 16. Sensibilidade das recargas residuais.

dia	ao dia	R1	R2	R3	R4
0	1	5.32E-07	1.54E-06	2.43E-06	9.02E-06
1	2	5.14E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	3	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18
3	4	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18
4	5	1.70E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	6	4.80E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6	7	8.34E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7	8	2.94E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8	9	3.79E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9	10	1.10E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	11	2.00E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
11	12	1.27E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
12	13	3.08E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
13	14	2.16E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
14	15	2.19E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
15	16	2.55E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	17	3.68E-08	1.89E-20	0.00E+00	0.00E+00
17	18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18
18	19	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18
19	20	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18
20	21	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18
21	22	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18	5.25E-18

Tabela 17. Sensibilidade das vazões específicas.

zona	Sensibilidade
Sy1	3.03E-02
Sy2	8.77E-03
Sy3	0.00E+00
Sy4	0.00E+00
Sy5	0.00E+00
Sy6	0.00E+00
Sy7	7.17E-03
Sy8	6.92E-03

Tabela 18. Sensibilidades médias dos parâmetros do modelo transiente

parâmetro	sensibilidade média
condutividade hidráulica horizontal	9.94E-03
condutividade hidráulica vertical	9.00E-03
vazão específica	6.65E-03
recarga residual	5.04E-07

7.6.3. Condutividades hidráulicas e recargas

A inspeção da tabela 11 mostra que em praticamente todas as zonas de K ocorreu a anisotropia entre as condutividades verticais e horizontais. No geral, as zonas isotrópicas são as que têm sensibilidades reduzidas, muito embora salienta-se que existem zonas anisotrópicas de baixa sensibilidade. Os valores médios das condutividades calibradas para cada camada litológica encontram-se na tabela 19, bem como o fator de anisotropia entre esses valores médios. Observa-se, através dos valores desta tabela, que as condutividades hidráulicas são condizentes com as litologias encontradas em cada camada.

Tabela 19. Média dos valores calibrados em cada camada

camada	Kx (m/s)	Ky (m/s)	Kx/Ky
1	5.13E-08	4.18E-08	1.23
2	2.43E-07	1.34E-07	1.82
3	1.36E-06	1.05E-06	1.30
4	1.00E-06	3.55E-07	2.82
5	2.95E-07	2.01E-07	1.46
6	5.33E-07	4.99E-07	1.07

Nas figuras 70 a 74, encontram-se comparações gráficas entre os valores medidos de condutividade hidráulica em cada poço (K) e os valores calibrados (Kx e Ky) para as zonas coincidentes com suas seções filtrantes. Constata-se, como padrão geral para todas as camadas, que os valores medidos de K são inferiores a Kx, com algumas exceções, o que pode indicar que o procedimento comum de se desprezar o início da curva de rebaixamento como função do tempo levantada em campo na determinação das condutividades hidráulicas experimentais pode ter sido excessivo.

Figura 70. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 1.

Figura 71. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 2.

Figura 72. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 4.

Figura 73. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 5.

Figura 74. Comparação entre condutividades medidas e calibradas para os poços com seções filtrantes na camada 6

Em relação às recargas residuais, constata-se que elas estiveram próximas do valor definido na equação (2), o de 5% da soma das precipitações de até dois dias antes do dia em questão. Tal fato não surpreende, pois a baixa sensibilidade dos valores de recarga residual faz com que o procedimento de calibração pouco altere os valores iniciais destes parâmetros, que já se encontravam próximos aos valores definidos na equação (2).

Tabela 20. Comparação entre recargas residuais calibradas e P, onde P é a soma da precipitação do dia da comparação e dos dois dias anteriores.

dia	ao dia	R total	P	R total/P
0	1	0.983307	25.2	0.03902
1	2	1.470606	19.5	0.075416
2	3	0	0	-
3	4	0	11.5	0
4	5	0.557621	22.9	0.02435
5	6	1.057317	33	0.03204
6	7	1.074655	52.2	0.020587
7	8	2.381136	42.8	0.055634
8	9	1.907703	35.2	0.054196
9	10	0.180641	16.5	0.010948
10	11	0.462441	26.5	0.017451
11	12	1.020835	24	0.042535
12	13	0.751891	16.9	0.044491
13	14	0.381762	8.4	0.045448
14	15	0.409069	9.4	0.043518
15	16	0.265085	4.5	0.058908
16	17	0.075235	1	0.075235
17	18	0	0	-
18	19	0	0	-
19	20	0	0	-
20	21	0	0	-
21	22	0	0	-

7.6.4. Padrões potenciométricos

O caráter especialmente dinâmico do fluxo de água subterrânea ao longo do período T_2 encontra-se demonstrado nas figuras 75 a 134, onde se apresentam os mapas potenciométricos para todas as camadas litológicas e para 5 diferentes seções nos dias 20, 24 e 29 de janeiro e 2, 5 e 9 de fevereiro. A primeira característica que se destaca nestes mapas é a existência de um alto pronunciado na posição dos poços PM018 e de valores mais reduzidos de carga na posição dos poços PM08 na camada 1 (figuras 75 a 80). Quando analisados em seção (figuras 111 a 116), o padrão potenciométrico destas regiões indica que os fluxos verticalizados inerentes a esses alto e baixo de cargas não ultrapassam a camada litológica 3. A inspeção das características hidráulicas destas regiões mostram as condutividades da camada 2 nessas áreas (zonas K14 e K24) são especialmente menores que as verificadas no entorno. Uma vez que não são encontradas outras características especiais nessas áreas, infere-se que a existência desses alto e baixo potenciométricos seja controlada por esse contraste de condutividade.

Outro aspecto marcante dos mapas potenciométricos é a reversão do fluxo ao longo do evento de recarga. Muito embora exista fluxo tanto para fora quanto para dentro do volume modelado em cada um dos dias de simulação, do dia 19 de janeiro até pico das chuvas o fluxo

é predominantemente para dentro da área de estudo. A partir do pico de chuva, entretanto, o fluxo passa a ser predominantemente para fora da área, como pode ser verificado em todos os mapas potenciométricos. É possível se observar que as direções de fluxo de cada camada são menos discordantes quando ocorre o pico das chuvas. Também é observada nos mapas a existência de zonas de entrada e de saída de água pela parede inferior do modelo, zonas estas que mudam de localização ao longo do período simulado (figuras 105 a 134), muito embora salienta-se que sempre existem esses dois tipos de zonas no modelo, tanto para o período sem chuva como para o período chuvoso.

As figuras 75 a 134 mostram que as camadas litológicas 3 e 4 são as de fluxo mais intenso, sendo pouco afetadas pelas componentes verticais das camadas superiores e inferiores. Tal característica não varia consideravelmente ao longo do período T_2 .

A associação destas constatações permite inferir um modelo conceitual de circulação de águas subterrâneas mais acurado para a área:

- Durante o pico das chuvas, o fluxo é predominantemente para fora do volume estudado e nos períodos secos para dentro. Em ambos os casos, o trânsito de água subterrânea se dá predominantemente pelas camadas 3 e 4. Quando o fluxo é para fora do volume modelado, ele penetra o volume modelado predominantemente pela parede leste do modelo e sai pelas demais paredes verticais.
- As cargas observadas no interior do volume modelado são controladas predominantemente pelo fluxo horizontal trocado entre o contorno e o volume modelado. Para o período imediatamente posterior ao pico de chuva, esta predominância é maior, enquanto para o período anterior a esse pico, os efeitos ligados a características locais das camadas 1, 2, 5 e 6 são mais facilmente perceptíveis.
- De uma forma geral, é possível dizer que as camadas 3 e 4 separam o aquífero em duas regiões distintas, de modo que as variações que ocorrem no fluxo das camadas 1 e 2 não são sentidas nas camadas 5 e 6 e vice-versa.

Figura 75. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 76. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 77. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 78. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 79. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 80. Mapa potenciométrico da camada matemática 1, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 81. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 82. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 83. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 84. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 85. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 86. Mapa potenciométrico da camada matemática 2, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 87. Mapa potenciométrico da camada matemática 6, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 88. Mapa potenciométrico da camada matemática 6, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 89. Mapa potenciométrico da camada matemática 6, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 90. Mapa potenciométrico da camada matemática 6, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 91. Mapa potenciométrico da camada matemática 6, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 92. Mapa potenciométrico da camada matemática 6, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 93. Mapa potenciométrico da camada matemática 9, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 94. Mapa potenciométrico da camada matemática 9, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 95. Mapa potenciométrico da camada matemática 9, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 96. Mapa potenciométrico da camada matemática 9, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 97. Mapa potenciométrico da camada matemática 9, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 98. Mapa potenciométrico da camada matemática 9, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 99. Mapa potenciométrico da camada matemática 14, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 100. Mapa potenciométrico da camada matemática 14, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 101. Mapa potenciométrico da camada matemática 14, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 102. Mapa potenciométrico da camada matemática 14 gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 103. Mapa potenciométrico da camada matemática 14, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 104. Mapa potenciométrico da camada matemática 14, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 105. Mapa potenciométrico da seção $x = 4,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 106. Mapa potenciométrico da seção $x = 4,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 107. Mapa potenciométrico da seção $x = 4,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 108. Mapa potenciométrico da seção $x = 4,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 109. Mapa potenciométrico da seção $x = 4,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 110. Mapa potenciométrico da seção $x = 4,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 111. Mapa potenciométrico da seção $x = 7,8\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 112. Mapa potenciométrico da seção $x = 7,8\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 113. Mapa potenciométrico da seção $x = 7,8\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 114. Mapa potenciométrico da seção $x = 7,8\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 115. Mapa potenciométrico da seção $x = 7,8\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 116. Mapa potenciométrico da seção $x = 7,8\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 117. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 118. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 119. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 120. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 121. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 122. Mapa potenciométrico da seção $x = 11,9\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 123. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 124. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 125. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 126. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 127. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 128. Mapa potenciométrico da seção $y = 8,7\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 129. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 20/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 130. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 24/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 131. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 29/01/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 132. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 02/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 133. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 05/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

Figura 134. Mapa potenciométrico da seção $y = 16,0\text{m}$, gerado pelo modelo MT para o dia 09/02/03. As setas correspondem ao fluxo de água subterrânea (cargas hidráulicas e coordenadas em metros).

7.6.5. Balanço de fluxo

Para melhor compreender a hidrodinâmica do aquífero estudado foi realizado o balanço de fluxo de água subterrânea no volume modelado através do módulo *ZBUD* do programa *Visual MODFLOW* (Guiguer e Franz, 1996). Inicialmente, foram analisadas as entradas de água no volume modelado (figura 135). Observa-se que durante o evento de recarga praticamente 90% da água que entra ao volume modelado são provenientes das condições de contorno do modelo. Tal constatação se constitui em mais uma evidência da falta de importância da recarga residual em um aquífero raso. Esta hipótese é corroborada pela figura 136, onde se comparam a vazão que penetra a camada 1 via recarga residual e a vazão que deixa a camada 1 e penetra a camada 2. Nota-se claramente nesta figura que, embora a entrada de água devida à recarga residual sofra flutuações devidas principalmente a flutuações do próprio regime de chuvas no período modelado, a passagem de água da camada 1 para a camada 2 mantém-se praticamente constante ao longo de todo período, sugerindo que os efeitos de variações da recarga residual só podem ser sentidos a poucos metros de profundidade.

Figura 135. Vazões de entrada de água subterrânea no volume modelado.

Figura 136. Vazões que entram na camada 1 por recarga residual e que deixam a camada 1 em direção à camada 2.

8. CONCLUSÕES

Através dos modelos estacionário e transiente construídos com base em observações detalhadas de uma área de 320m² localizada no Parque Ecológico do Tietê, foi avaliado o modo como o fluxo de água subterrânea se comporta em um aquífero livre e raso durante um evento de recarga rápida. Os resultados mostram que, muito embora a recarga regional seja responsável pelo padrão de fluxo geral para a área, a recarga residual, aquela derivada apenas das precipitações que ocorrem localmente na área de estudo, pouca influência tem sobre os padrões potenciométricos. Na área estudada tais padrões são controlados pelas condições de contorno do modelo, pelas condutividades hidráulicas horizontal e vertical e pelas vazões específicas das camadas 1 e 2, nesta ordem de importância. Muito embora as camadas superiores do aquífero acusam a entrada de água no sistema através da recarga residual, esse efeito é logo atenuado para camadas mais profundas. Tal afirmação contradiz a hipótese de que durante os eventos de recarga rápida, o aprofundamento dos tubos de fluxo ocasionado pela recarga residual seria responsável pela variação das concentrações observadas em poços de monitoramento rasos. Esta questão permanece então ainda em aberto.

A dominância das condições de contorno sobre o fluxo é especialmente alta após o pico de chuva, sendo menos intensa no período anterior. Neste caso, as demais características passam a ter importância maior sobre o padrão de fluxo. De qualquer forma, parece evidente que avaliações precisas de fluxo em aquíferos livres e rasos não necessitam de determinações de recarga residual para o seu êxito. Por outro lado, essas avaliações precisas necessitariam de uma densidade maior de medidas de condutividade hidráulica que as comumente empregadas em estudos de aquíferos livres e rasos, pois esta, além de ser a característica local dominante, é especialmente heterogênea. Ressalta-se que a condutividade hidráulica vertical mostrou-se tão significativa para a representatividade do modelo quanto a horizontal. Este aspecto é especialmente importante quando se leva em conta que na maioria dos trabalhos de modelagem numérica, tanto na iniciativa privada quanto em termos acadêmicos, essa propriedade é apenas inferida a partir dos valores de condutividade horizontal.

A falta de sensibilidade dos erros de calibração do modelo estacionário à variação dos parâmetros otimizados sugere que a aproximação de estacionariedade para esse tipo de aquífero deve acarretar uma avaliação equivocada do movimento de água subterrânea. Mesmo o modelo transiente produzido levando-se em conta um grande detalhamento da área estudada apresentou discrepâncias no balanço de massa acima dos valores normais, sugerindo que modelos realmente precisos para este aquífero devem ser baseados em observações de carga hidráulica mais freqüentes que as diárias.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chapuis, R.P., 1989. Shape factors for permeability tests in boreholes and piezometers. *Ground Water* 27 (5), p647–654

Departamento de Águas e Energia do Estado de São Paulo, 1975. Estudo de águas subterrâneas, região administrativa I - Grande São Paulo. São Paulo, SOMA, v. 1. 220p.

Doherty, John, 2000. *PEST – Model-Independent Parameter Estimation*. Watermark Numerical Computing, 255 p.

Fetter, C. W., 1994. *Contaminant Hydrogeology*. Macmillan Publishing Company, New York, 458p.

Foster, S. & Hirata, R., 1988. Groundwater pollution risk evaluation: a survey manual using available data. Lima, CEPIS-PAHO/WHO. 89p.

Green, J. R. e Margerison, D., 1978. Statistical treatment of experimental data. Elsevier Science Publishing Company, New York, 382p.

Guiguer, N. e Franz, T., 1996. *Visual MODFLOW. User's manual*. Waterloo, WHI. 231p.

Hirata, R., 2000. Nitrogênio nas águas subterrâneas: fontes antrópicas, comportamento hidroquímico e manejo. Relatório Final de Projeto (Hirata, 2000), São Paulo, 89 p.

Hirata, R. e Ferreira, L.M.R., 2001. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. Revista Brasileira de Geociências.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 1991. Censo demográfico do Brasil. Vol 1. FIBGE, Rio de Janeiro, citado em Hirata, R. 2000. Nitrogênio nas águas subterrâneas: fontes antrópicas, comportamento hidroquímico e manejo. Relatório Final de Projeto (Hirata, 2000), São Paulo, 89 p.

Iritani, M., 1993. Potencial hidrológico da Cidade Universitária de São Paulo. São Paulo, 108p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Kitanidis, P.K., 1997. Introduction to Geostatistics – Applications in Hydrogeology. Cambridge University Press, 249p.

Mondin, M., 2005. Avaliação e quantificação do processo de recarga do aquífero livre e raso no Parque Ecológico do Tietê – SP. São Paulo, 115p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Riccomini, C., 1989. O rift continental do sudeste do Brasil. São Paulo, 256p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Riccomini, C. e Coimbra, A. M., 1992. Geologia da Bacia Sedimentar. *In*: Negro Jr., A.; Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.A.C. eds. Solos da Cidade de São Paulo. São Paulo, ABMS/ABEF. p. 37-94.

Ross, S. D., 1991. Hydrological study of river connected aquifers in greater São Paulo, Brazil. Ontário, Canadá 187p. Dissertação (Mestrado) – University of Waterloo.

Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo/ Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (SABESP/CEPAS), 1994. Diagnóstico hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo. Relatório final. Convênio SABESP/CEPAS-IG/USP. 75p.

Statpages (acesso em 2005). Site: <http://statpages.org/nonlin.html>.

Varnier, C.L., 2001. O Efeito do Nitrogênio Proveniente de Sistemas de Saneamento in situ na Qualidade das Águas Subterrâneas em Aquíferos Livres e Rasos. São Paulo, 150p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Varnier, C. L. e Hirata, R., 2000. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo, Brasil. In: 1º Congresso Mundial Integrado de Água Subterrânea, Fortaleza, Brasil, 2000, 12p.

ANEXO A

Figura A1. Ensaio de permeabilidade para o poço PM01-3.

Figura A2. Ensaio de permeabilidade para o poço PM02-3.

Figura A3. Ensaio de permeabilidade para o poço PM03-3.

Figura A4. Ensaio de permeabilidade para o poço PM04-3.

Figura A5. Ensaio de permeabilidade para o poço PM05-3.

Figura A6. Ensaio de permeabilidade para o poço PM06-3.

Figura A7. Ensaio de permeabilidade para o poço PM07-3.

Figura A8. Ensaio de permeabilidade para o poço PM09-3.

Figura A9. Ensaio de permeabilidade para o poço PM10-3.

Figura A10. Ensaio de permeabilidade para o poço PM11-3.

Figura A11. Ensaio de permeabilidade para o poço PM12-3.

Figura A12. Ensaio de permeabilidade para o poço PM14-3.

Figura A13. Ensaio de permeabilidade para o poço PM16-3.

Figura A14. Ensaio de permeabilidade para o poço PM17-3.

Figura A15. Ensaio de permeabilidade para o poço PM19-3.

Figura A16. Ensaio de permeabilidade para o poço PM20-3.

Figura A17. Ensaio de permeabilidade para o poço PM21-3.

Figura A18. Ensaio de permeabilidade para o poço PM22-3.

Figura A19. Ensaio de permeabilidade para o poço PM23-3.

Figura A20. Ensaio de permeabilidade para o poço PM24-3.

Figura A21. Ensaio de permeabilidade para o poço PM25-3.

Figura A22. Ensaio de permeabilidade para o poço PM26-3.

Figura A23. Ensaio de permeabilidade para o poço PM28-3.

Figura A24. Ensaio de permeabilidade para o poço PM30-3.

Figura A25. Ensaio de permeabilidade para o poço PM01-6.

Figura A26. Ensaio de permeabilidade para o poço PM02-6.

Figura A27. Ensaio de permeabilidade para o poço PM04-6.

Figura A28. Ensaio de permeabilidade para o poço PM05-6.

Figura A29. Ensaio de permeabilidade para o poço PM06-6.

Figura A30. Ensaio de permeabilidade para o poço PM07-6.

Figura A31. Ensaio de permeabilidade para o poço PM08-6.

Figura A32. Ensaio de permeabilidade para o poço PM09-6.

Figura A33. Ensaio de permeabilidade para o poço PM10-6.

Figura A34. Ensaio de permeabilidade para o poço PM11-6.

Figura A35. Ensaio de permeabilidade para o poço PM12-6.

Figura A36. Ensaio de permeabilidade para o poço PM13-6.

Figura A37. Ensaio de permeabilidade para o poço PM14-6.

Figura A38. Ensaio de permeabilidade para o poço PM16-6.

Figura A39. Ensaio de permeabilidade para o poço PM17-6.

Figura A39. Ensaio de permeabilidade para o poço PM18-6.

Figura A40. Ensaio de permeabilidade para o poço PM19-6.

Figura A41. Ensaio de permeabilidade para o poço PM20-6.

Figura A42. Ensaio de permeabilidade para o poço PM21-6.

Figura A43. Ensaio de permeabilidade para o poço PM22-6.

Figura A44. Ensaio de permeabilidade para o poço PM23-6.

Figura A45. Ensaio de permeabilidade para o poço PM24-06.

Figura A46. Ensaio de permeabilidade para o poço PM25-6.

Figura A47. Ensaio de permeabilidade para o poço PM26-6.

Figura A48. Ensaio de permeabilidade para o poço PM28-6.

Figura A49. Ensaio de permeabilidade para o poço PM30-6.

Figura A50. Ensaio de permeabilidade para o poço PM02-10.

Figura A51. Ensaio de permeabilidade para o poço PM03-10.

Figura A52. Ensaio de permeabilidade para o poço PM04-10.

Figura A53. Ensaio de permeabilidade para o poço PM05-10.

Figura A54. Ensaio de permeabilidade para o poço PM06-10.

Figura A55. Ensaio de permeabilidade para o poço PM07-10.

Figura A56. Ensaio de permeabilidade para o poço PM08-10.

Figura A57. Ensaio de permeabilidade para o poço PM09-10.

Figura A58. Ensaio de permeabilidade para o poço PM10-10.

Figura A59. Ensaio de permeabilidade para o poço PM11-10.

Figura A60. Ensaio de permeabilidade para o poço PM12-10.

Figura A61. Ensaio de permeabilidade para o poço PM13-10.

Figura A62. Ensaio de permeabilidade para o poço PM14-10.

Figura A63. Ensaio de permeabilidade para o poço PM16-10.

Figura A64. Ensaio de permeabilidade para o poço PM17-10.

Figura A65. Ensaio de permeabilidade para o poço PM18-10.

Figura A66. Ensaio de permeabilidade para o poço PM19-10.

Figura A67. Ensaio de permeabilidade para o poço PM20-10.

Figura A68. Ensaio de permeabilidade para o poço PM21-10.

Figura A69. Ensaio de permeabilidade para o poço PM22-10.

Figura A70. Ensaio de permeabilidade para o poço PM23-10.

Figura A71. Ensaio de permeabilidade para o poço PM24-10.

Figura A72. Ensaio de permeabilidade para o poço PM25-10.

Figura A73. Ensaio de permeabilidade para o poço PM26-10.

Figura A74. Ensaio de permeabilidade para o poço PM28-10.

Figura A75. Ensaio de permeabilidade para o poço PM30-10.

ANEXO B

Figura B1. Condições de contorno do tipo I para a parede norte no dia 19/01/03.

Figura B2. Condições de contorno do tipo I para a parede norte no dia 02/02/03.

Figura B3. Condições de contorno do tipo I para a parede norte no dia 10/02/03.

Figura B4. Condições de contorno do tipo I para a parede sul no dia 19/01/03.

Figura B5. Condições de contorno do tipo I para a parede sul no dia 02/02/03.

Figura B6. Condições de contorno do tipo I para a parede sul no dia 10/02/03.

Figura B7. Condições de contorno do tipo I para a parede leste no dia 19/01/03.

Figura B8. Condições de contorno do tipo I para a parede leste no dia 02/02/03.

Figura B9. Condições de contorno do tipo I para a parede leste no dia 10/02/03.

Figura B10. Condições de contorno do tipo I para a parede oeste no dia 19/01/03.

Figura B11. Condições de contorno do tipo I para a parede oeste no dia 02/02/03.

Figura B12. Condições de contorno do tipo I para a parede oeste no dia 10/02/03.

Figura B13. Condições de contorno do tipo I para o fundo no dia 19/01/03.

Figura B14. Condições de contorno do tipo I para o fundo no dia 02/02/03.

Figura B15. Condições de contorno do tipo I para o fundo no dia 10/02/03.

ANEXO C

Tabela C1. Comparação entre cargas hidráulicas calculadas pelo modelo transiente e as medidas em campo.

POÇO	20/01/03				21/01/03				22/01/03				23/01/03				24/01/03				25/01/03				26/01/03				27/01/03				28/01/03				29/01/03				30/01/03			
	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.				
P07-3	97.85	97.85	0.00	0.00	97.86	97.80	0.04	0.04	97.87	97.91	0.04	0.04	97.89	97.85	0.06	0.06	97.91	97.95	0.04	0.04	97.93	97.97	0.04	0.04	97.97	98.04	0.07	0.07	97.99	98.04	0.05	0.05	98.00	98.00	0.00	0.00	98.01	98.08	0.07	0.07	98.03	98.04	0.01	0.01
P07-6	97.73	97.87	0.14	0.14	97.74	97.89	0.15	0.15	97.76	97.91	0.15	0.15	97.82	97.84	0.12	0.12	97.84	97.96	0.14	0.14	97.88	98.01	0.13	0.13	97.90	98.04	0.14	0.14	97.92	98.06	0.14	0.14	97.93	98.06	0.13	0.13	97.94	98.06	0.12	0.12	97.94	98.06	0.12	0.12
P08-3	97.75	97.76	0.01	0.01	97.76	97.84	0.08	0.08	97.77	97.86	0.09	0.09	97.83	97.92	0.09	0.09	97.85	97.96	0.11	0.11	97.87	97.98	0.11	0.11	97.89	97.97	0.06	0.06	97.92	98.00	0.08	0.08	97.94	97.99	0.05	0.05	97.95	97.98	0.03	0.03	97.95	97.98	0.03	0.03
P09-3	97.83	97.85	0.02	0.02	97.84	97.87	0.03	0.03	97.85	97.94	0.09	0.09	97.87	97.85	0.08	0.08	97.89	97.96	0.07	0.07	97.91	97.99	0.08	0.08	97.95	98.00	0.05	0.05	97.96	98.00	0.04	0.04	97.97	97.99	0.02	0.02	97.99	97.97	-0.02	0.02	97.99	97.98	-0.01	0.01
P09-6	97.84	97.84	0.00	0.00	97.85	97.89	0.04	0.04	97.86	97.91	0.05	0.05	97.88	97.92	0.04	0.04	97.90	97.96	0.06	0.06	97.92	98.03	0.11	0.11	97.96	98.05	0.09	0.09	97.98	98.07	0.09	0.09	98.00	98.07	0.07	0.07	98.01	98.00	-0.01	0.01	98.02	98.02	0.00	0.00
P12-3	97.79	97.86	0.07	0.07	97.80	97.89	0.09	0.09	97.81	97.90	0.09	0.09	97.85	97.85	0.10	0.10	97.87	97.96	0.09	0.09	97.88	97.98	0.10	0.10	97.90	97.99	0.09	0.09	97.94	97.99	0.05	0.05	97.95	97.99	0.04	0.04	97.96	97.98	0.02	0.02	97.96	97.98	0.02	0.02
P12-6	97.85	97.86	0.01	0.01	97.86	97.89	0.03	0.03	97.87	97.90	0.03	0.03	97.90	97.91	0.01	0.01	97.91	97.97	0.06	0.06	97.93	98.00	0.07	0.07	97.97	98.03	0.06	0.06	97.99	98.06	0.07	0.07	98.00	98.08	0.08	0.08	98.02	98.05	0.03	0.03	98.03	98.02	-0.01	0.01
P13-3	97.82	97.85	0.03	0.03	97.83	97.89	0.06	0.06	97.85	97.86	0.01	0.01	97.87	97.92	0.05	0.05	97.89	97.96	0.07	0.07	97.90	97.98	0.08	0.08	97.93	97.99	0.06	0.06	97.95	97.99	0.04	0.04	97.97	97.97	0.00	0.00	97.98	97.97	-0.01	0.01	97.99	97.95	-0.04	0.04
P13-6	97.81	97.86	0.05	0.05	97.82	97.85	0.13	0.13	97.84	97.94	0.10	0.10	97.86	97.81	0.05	0.05	97.88	97.96	0.08	0.08	97.90	97.98	0.08	0.08	97.93	97.99	0.06	0.06	97.94	97.99	0.05	0.05	97.95	97.99	0.04	0.04	97.96	98.08	0.12	0.12	97.97	98.08	0.11	0.11
P14-3	97.85	97.88	0.03	0.03	97.86	97.92	0.06	0.06	97.88	97.94	0.06	0.06	97.90	97.85	0.05	0.05	97.91	97.98	0.08	0.08	97.93	98.02	0.09	0.09	97.98	98.04	0.06	0.06	97.99	98.04	0.05	0.05	98.01	98.03	0.02	0.02	98.02	98.03	0.01	0.01	98.04	98.06	0.04	0.04
P14-6	97.83	97.88	0.05	0.05	97.84	97.92	0.08	0.08	97.85	97.95	0.10	0.10	97.88	97.86	-0.02	0.02	97.89	97.97	0.08	0.08	97.91	97.99	0.08	0.08	97.96	97.95	-0.01	0.01	97.97	97.95	-0.02	0.02	97.98	97.95	-0.03	0.03	97.99	98.07	0.08	0.08	98.00	97.97	-0.03	0.03
P17-3	97.81	97.91	0.10	0.10	97.82	97.93	0.11	0.11	97.84	97.91	0.07	0.07	97.86	97.93	0.07	0.07	97.88	97.96	0.08	0.08	97.90	97.99	0.09	0.09	97.93	97.98	0.05	0.05	97.94	98.05	0.11	0.11	97.95	98.07	0.12	0.12	97.97	97.98	0.01	0.01	97.98	97.97	-0.01	0.01
P17-6	97.82	97.87	0.05	0.05	97.83	97.90	0.07	0.07	97.85	97.91	0.06	0.06	97.87	97.92	0.05	0.05	97.89	97.95	0.06	0.06	97.91	97.94	0.03	0.03	97.94	98.00	0.06	0.06	97.95	97.99	0.04	0.04	97.97	97.98	0.01	0.01	97.98	97.99	0.01	0.01	97.99	97.96	-0.03	0.03
P18-6	97.83	97.87	0.04	0.04	97.84	97.90	0.06	0.06	97.85	97.92	0.07	0.07	97.88	97.81	0.03	0.03	97.89	98.00	0.11	0.11	97.91	98.03	0.12	0.12	97.96	97.98	0.02	0.02	97.97	97.99	0.02	0.02	97.98	98.06	0.08	0.08	98.00	97.94	-0.06	0.06	98.00	98.07	0.07	0.07
P19-3	97.78	97.91	0.13	0.13	97.78	97.95	0.17	0.17	97.80	97.96	0.16	0.16	97.85	97.91	0.06	0.06	97.85	97.97	0.12	0.12	97.87	98.00	0.13	0.13	97.89	98.00	0.11	0.11	97.91	98.00	0.09	0.09	97.93	97.96	0.03	0.03	97.95	97.95	0.00	0.00	97.96	97.93	-0.03	0.03
P19-6	97.85	97.89	0.04	0.04	97.86	97.92	0.06	0.06	97.88	97.95	0.07	0.07	97.90	97.96	0.06	0.06	97.92	98.00	0.08	0.08	97.94	98.03	0.09	0.09	97.99	97.91	-0.08	0.08	98.00	97.95	-0.05	0.05	98.02	97.98	-0.04	0.04	98.04	97.98	-0.06	0.06	98.05	97.99	-0.06	0.06
P22-3	97.85	97.91	0.06	0.06	97.86	97.94	0.08	0.08	97.89	97.90	0.01	0.01	97.88	97.85	-0.03	0.03	98.01	97.98	-0.03	0.03	98.02	98.03	0.01	0.01	98.04	98.05	0.01	0.01	98.05	98.06	0.01	0.01	98.06	98.07	0.01	0.01	98.08	98.06	-0.02	0.02	98.09	98.05	-0.04	0.04
P22-6	97.80	97.87	0.07	0.07	97.81	97.90	0.09	0.09	97.82	97.91	0.09	0.09	97.86	97.92	0.06	0.06	97.87	97.99	0.12	0.12	97.88	98.03	0.15	0.15	97.92	98.04	0.12	0.12	97.93	98.07	0.14	0.14	97.94	98.08	0.14	0.14	97.95	98.08	0.13	0.13	97.96	98.07	0.11	0.11
P23-3	97.81	97.89	0.08	0.08	97.83	97.92	0.09	0.09	97.84	97.93	0.09	0.09	97.87	97.87	0.00	0.00	97.89	97.92	0.03	0.03	97.90	97.98	0.08	0.08	97.93	97.99	0.06	0.06	97.95	97.98	0.03	0.03	97.96	97.98	0.02	0.02	97.97	97.98	0.01	0.01	97.98	97.97	-0.01	0.01
P23-6	97.83	97.87	0.04	0.04	97.84	97.90	0.06	0.06	97.86	97.94	0.08	0.08	97.88	97.94	0.06	0.06	97.90	97.87	-0.03	0.03	97.91	97.99	0.08	0.08	97.96	98.02	0.06	0.06	97.97	98.04	0.07	0.07	97.99	97.99	0.00	0.00	98.00	97.99	-0.01	0.01	98.01	97.93	-0.08	0.08
P24-3	98.22	97.89	-0.33	0.33	98.23	97.83	-0.30	0.30	98.24	97.94	-0.30	0.30	98.21	97.82	-0.29	0.29	98.21	97.96	-0.25	0.25	98.23	97.99	-0.24	0.24	98.25	98.00	-0.25	0.25	98.26	98.00	-0.26	0.26	98.27	98.01	-0.26	0.26	98.28	98.01	-0.27	0.27	98.29	97.99	-0.29	0.29
P24-6	97.83	97.87	0.04	0.04	97.84	97.90	0.06	0.06	97.86	97.92	0.06	0.06	97.88	97.97	0.09	0.09	97.90	98.01	0.11	0.11	97.92	97.99	-0.03	0.03	97.96	98.00	0.04	0.04	97.98	98.01	0.03	0.03	98.00	98.04	0.04	0.04	98.01	98.03	0.02	0.02	98.01	98.00	-0.01	0.01

Tabela C1. (cont.)

POÇO	31/01/03				1/2/2003				2/2/2003				3/2/2003				4/2/2003				5/2/2003				6/2/2003				7/2/2003				8/2/2003				9/2/2003				10/2/2003			
	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.	Obs.	Calc.	Calc.-Obs.	Calc.-Obs.				
P07-3	98.04	98.03	-0.01	0.01	98.05	98.03	-0.02	0.02	98.02	97.91	-0.11	0.11	98.01	97.91	-0.10	0.10	98.00	97.89	-0.11	0.11	97.99	97.89	-0.10	0.10	98.00	97.88	-0.12	0.12	97.99	98.06	0.07	0.07	98.01	98.01	0.00	0.00	98.00	98.01	0.01	0.01	98.00	98.01	0.01	0.01
P07-6	97.95	98.07	0.12	0.12	97.95	98.07	0.12	0.12	97.87	97.90	0.03	0.03	97.86	97.89	0.03	0.03	97.85	97.87	0.02	0.02	97.83	97.87	0.04	0.04	97.84	97.87	0.03	0.03	97.86	97.87	0.01	0.01	97.83	97.95	0.12	0.12	97.81	97.95	0.14	0.14	97.81	97.95	0.14	0.14
P08-6	97.96	97.98	0.02	0.02	97.97	97.98	0.01	0.01	97.93	98.07	0.14	0.14	97.92	98.07	0.15	0.15	97.91	98.07	0.16	0.16	97.90	98.07	0.17	0.17	97.86	97.96	0.10	0.10	97.87	97.96	0.08	0.08	97.85	97.87	0.02	0.02	97.84	98.06	0.22	0.22	97.84	98.06	0.22	0.22
P09-6	97.97	97.99	0.02	0.02	97.98	97.99	0.01	0.01	97.94	98.04	0.10	0.10	97.93	97.95	0.02	0.02	97.93	97.95	0.02	0.02	97.93	97.95	0.02	0.02	97.93	97.95	0.02	0.02	97.93	97.95	0.02	0.02	97.93	97.95	0.02	0.02	97.93	97.95	0.02	0.02	97.93	97.95	0.02	0.02
P09-6	97.98	98.01	0.01	0.01	98.03	97.99	-0.04	0.04	98.01	98.07	0.06	0.06	98.00	98.07	0.07	0.07	97.99	98.06	0.07	0.07	97.98	98.06	0.08	0.08	97.98	98.06	0.08	0.08	97.99	97.94	-0.05	0.05	97.98	97.88	-0.10	0.10	98.00	98.09	0.09	0.09	98.00	98.09	0.09	0.09
P12-3	97.97	97.98	0.01	0.01	97.98	97.98	0.00	0.00	97.96	97.97	0.01	0.01	97.95	97.95	0.00	0.00	97.94	98.05	0.11	0.11	97.93	98.05	0.12	0.12	97.92	98.05	0.13	0.13	97.91	98.05	0.14	0.14	97.89	98.04	0.15	0.15	97.87	97.94	0.07	0.07	97.87	97.94	0.07	0.07
P12-6	98.04	98.02	-0.02	0.02	98.05	98.08	0.03	0.03	98.02	98.01	-0.01	0.01	98.01	98.01	0.00	0.00	98.00	97.99	-0.01	0.01	97.99	98.00	0.01	0.01	98.01	97.99	-0.02	0.02	98.01	97.99	-0.02	0.02	98.01	97.99	-0.02	0.02	98.01	97.93	-0.08	0.08	98.01	97.93	-0.08	0.08
P13-3	98.05	97.95	-0.05	0.05	98.01	97.95	-0.06	0.06	97.99	97.93	-0.06	0.06	97.98	97.93	-0.05	0.05	97.97	97.93	-0.04	0.04	97.95	97.82	-0.03	0.03	97.94	97.92	-0.02	0.02	97.95	98.09	0.14	0.14	97.94	98.09	0.15	0.15	97.91	97.90	-0.01	0.01	97.91	97.90	-0.01	0.01
P13-6	98.05	98.08	0.03	0.03	98.05	98.02	-0.03	0.03	98.03	98.02	-0.01	0.01	98.02	98.02	0.00	0.00	98.01	98.00	-0.01	0.01	98.00	98.00	0.00	0.00	98.01	97.99	-0.02	0.02	97.98	97.93	-0.05	0.05	97.98	98.01	-0.01	0.01	98.05	98.06	0.01	0.01	98.05	98.06	0.01	0.01
P14-6	98.01	97.97	-0.04	0.04	98.02	97.97	-0.05	0.05	98.00	98.07	0.07	0.07	97.99	97.93	-0.06	0.06	97.98	97.91	-0.07	0.07	97.96	97.99	0.03	0.03	97.97	97.93	-0.04	0.04	97.97	97.90	-0.07	0.07	97.94	98.06	0.12	0.12	97.94	98.06	0.12	0.12	97.94	98.06	0.12	0.12
P17-3	97.99	97.97	-0.02	0.02	98.00	97.97	-0.03	0.03	97.97	97.95	-0.02	0.02	97.97	97.95	-0.02	0.02	97.95	97.94	-0.01	0.01	97.94	97.94	0.00	0.00	97.93	97.93	0.00	0.00	97.94	97.91	-0.03	0.03	97.92	97.91	-0.01	0.01	97.89	97.93	0.04	0.04	97.89	97.93	0.04	0.04
P17-6	98.00	97.95	-0.05	0.05	98.01	97.95	-0.06	0.06	97.99	98.01	0.02	0.02	97.97	97.91	-0.06	0.06	97.96	97.93	-0.03	0.03	97.95	98.09	0.14	0.14	97.95	97.99	0.04	0.04	97.95	97.93	-0.02	0.02	97.94	97.88	-0.06	0.06	97.94	97.88	-0.06	0.06				
P18-6	98.01	98.07	0.06	0.06	98.02	98.01	-0.01	0.01	97.95	98.01	0.06	0.06	97.98	98.07	0.09	0.09	97.97	97.94	-0.03	0.03	97.97	97.91	-0.06	0.06	97.98	97.93	-0.05	0.05	97.98	97.96	0.02	0.02	97.94	97.98	0.04	0.04	97.94	97.88	-0.06	0.06	97.94	97.88	-0.06	0.06
P19-3	97.97	97.99	0.02	0.02	97.98	97.99	0.01	0.01	97.95	98.06	0.11	0.11	97.95	98.06	0.11	0.11	97.94	98.06	0.12	0.12	97.93	98.06	0.13	0.13	97.92	98.06	0.14	0.14	97.91	98.06	0.15	0.15	97.90	98.06	0.16	0.16	97.89	98.06	0.17	0.17	97.88	98.06	0.18	0.18
P19-6	98.06	98.00	-0.06	0.06	98.07	98.01	-0.06	0.06	98.05	98.03	-0.04	0.04	98.04	98.03	-0.01	0.01	98.03	98.02	-0.01	0.01	98.02	98.01	-0.01	0.01	98.03	98.01	-0.02	0.02	98.04	98.01	-0.03	0.03	98.03	97.94	-0.09	0.09	98.05	97.98	-0.08	0.08	98.06	97.98	-0.08	0.08
P22-3	98.10	98.05	-0.05	0.05	98.11	98.05	-0.06	0.06	98.08	98.03	-0.04	0.04	98.06	98.02	-0.04	0.04	98.05	98.02	-0.03	0.03	98.04	98.02	-0.02	0.02	98.05	98.01	-0.04	0.04	98.05	97.99	-0.06	0.06	98.15	98.01	-0.14	0.14	98.15	98.01	-0.14	0.14	98.15	98.01	-0.14	0.14
P22-6	97.97	98.08	0.11	0.11	97.98	98.08	0.10	0.10	97.96	97.95	-0.01	0.01	97.96	98.10	0.14	0.14	97.94	97.94	0.00	0.00	97.93	97.94	0.01	0.01	97.92	97.94	0.02	0.02	97.92	97.94	0.02	0.02	97.90	97.94	0.04	0.04	97.87	97.87	0.00	0.00	97.87	97.87	0.00	0.00
P23-3	97.99	97.96	-0.03	0.03	98.00	97.96	-0.04	0.04	97.99	97.95	-0.04	0.04	97.98	97.95	-0.03	0.03	97.96	97.92	-0.04	0.04	97.95	97.90	-0.05	0.05	97.94	97.93	-0.01	0.01	97.92	97.93	0.01	0.01	97.90	97.91	0.01	0.01	97.90	97.91	0.01	0.01	97.90	97.91	0.01	0.01
P23-6	98.02	97.93	-0.09	0.09	98.03	97.97	-0.06	0.06	98.04	97.94	-0.09	0.09	98.07	97.86	-0.21	0.21	98.09	97.86	-0.23	0.23	98.11	97.86	-0.25	0.25	98.13	97.86	-0.27	0.27	98.15	97.86	-0.29	0.29	98.17	97.86	-0.31	0.31	98.19	97.86	-0.33	0.33	98.21	97.86	-0.35	0.35
P24-3	97.97	97.99	0.02	0.02	98.00	97.99	-0.01	0.01	97.98	97.97	-0.01	0.01	97.97	97.97	-0.01	0.01	97.96	97.97	-0.01	0.01	97.95	97.97	-0.02	0.02	97.94	97.97	-0.03	0.03	97.93	97.97	-0.04	0.04	97.92	97.97	-0.05	0.05	97.91	97.97	-0.06	0.06	97.90	97.97	-0.07	0.07
P24-6	98.02	97.99	-0.03	0.03	98.03	98.02	-0.01	0.01	98.01	97.98	-0.03	0.03	98.00	97.98	-0.02	0.02	97.97	97.96	-0.01	0.01	97.96	97.96	0.00	0.00	97.95	97.94	-0.01	0.01	97.94	97.94	0.00	0.00	97.93	97.94	0.01	0.01	97.92	97.94	0.02	0.02	97.91	97.94	0.03	0.03