

ADRIANO LUIZ NORMANDIA MONTEIRO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PEQUENOS ALUVIÕES COM IRRIGAÇÃO
ATRAVÉS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL**

Recife-PE, Março de 2003

ADRIANO LUIZ NORMANDIA MONTEIRO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PEQUENOS ALUVIÕES COM IRRIGAÇÃO
ATRAVÉS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Recife-PE, Março de 2003

Catálogo na Fonte
Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Central – UFRPE

M775a Monteiro, Adriano Luiz Normandia
Avaliação do potencial de pequenos aluviões com irrigação através de modelagem computacional / Adriano Luiz Normandia Monteiro – 2004.
86f. : il.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro
Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Agronomia.

Bibliografia

CDD 631.7

1. Águas subterrânea
 2. Modelagem numérica
 3. Aquífero aluvial
 4. Irrigação
- I. Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção
II. Título

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador do céu e da terra, que por sua generosidade nos mantém forte diante dos obstáculos e razão de nossa existência.

Ao prof. Abelardo Montenegro, educador na orientação dos trabalhos, psicólogo nos momentos difíceis. Além de amigo, foi irmão, pai e filho durante esta batalha.

Aos meus Pais Delmiro Monteiro da Purificação Filho e Tânia Maria Monteiro Normandia, que sempre me apoiaram durante todas as fases de vida.

À minha noiva Márcia Alexandre dos Santos pela sua compreensão, amor e paciência nos momentos que estive ausente.

Aos geólogos James e Richards, pela amizade, aprendizagem e cooperação em período de trabalho de campo.

Ao meus amigos, Fábio Santiago, Daniel Blackburn, Sandro Augusto, Alexandre Tavares, Rossini Corrêa, Silvana Espig, Adriana Moura, Abel Batista, Valéria Nogueira, Luiz Eduardo, Isaías Mendonça, companheiros de lutas que marcaram parte dessa fase de vida.

Ao Engenheiro Agrônomo Alcimar Rodrigues, pela indispensável participação, a nível de campo, na instalação dos piezômetros.

Ao técnico em Agrimensura Antônio Granja Júnior, pela sua participação no levantamento topográfico.

Aos estudantes de graduação Tiago e Júlio, pela contribuição na organização dos dados de campo.

À estudante de graduação Daniele Braga e ao grande amigo e Engenheiro Agrônomo José de Castro nas análises laboratoriais.

Aos professores José Júlio Villar Rodrigues, Suzana Montenegro, que sempre vêm somar nos trabalhos de pós graduação.

Ao professor Mateus Rosa Ribeiro pelo seu apoio durante esta fase especial de vida.

Ao coordenador de Pós-Graduação Fernando Freire, que acreditou na batalha e persistência em cada aluno.

Aos agricultores da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, pela paciência e auxílio durante a realização deste trabalho, em particular ao agricultor Vivaldo, durante a fase de campo.

Aos funcionários e além de tudo amigos, Socorro, Josué, “Seu Noca”, pela dedicação e apoio nos assuntos burocráticos.

A ciência é o conhecimento organizado

(Herbert Spencer)

DEDICATÓRIA

A minha Avó Hilda dos Reis Normandia e a minha Tia Sônia Maria dos Reis Normandia, que sempre acreditaram em nosso potencial e vem dedicando suas vidas com todo amor, em nossa educação e espiritualidade.

SUMÁRIO

ITEM		Página
	LISTA DE FIGURAS	iii
	LISTA DE TABELAS	v
	RESUMO	vi
	ABSTRACT	vii
1.	INTRODUÇÃO	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Águas subterrâneas	16
2.2	Ciclo hidrológico	17
2.3	Aqüífero	18
2.4	Equações que regem o fluxo de água subterrânea	20
2.5	Características físicas do aquífero	21
2.6	Modelos matemáticos e numéricos	22
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Área de Estudo	31
3.2	Dados Agroclimatológicos	31
3.3	Condutividade hidráulica	35
3.4	Instalação dos piezômetros em área experimental do aluvião	37
3.5	Avaliação complementar da condutividade hidráulica	42
3.6	Estimativa das vazões bombeadas nos poços e nos lotes irrigados	43
3.7	Monitoramento do aquífero	45
3.8	Modelo conceitual na área geral	46
3.9	Simulações de fluxos subterrâneos a partir de modelo computacional	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	Flutuação observada do lençol freático	51
4.2	Simulação computacional	55
4.3	Simulação em área específica	60
5.	CONCLUSÕES	64
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

7	ANEXOS	68
Anexo 1	Vista superior da Sub-área de estudo	69
Anexo 2	Seção transversal A B e C	70
Anexo 3	Perfil granulométrico seção transversal A B e C	73
Anexo 4	Teste de condutividade em sub-área de estudo	76

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1a	Representação do elemento no centro da célula.	28
1b	Malha tridimensional de diferenças finitas utilizada pelo modflow	29
2	Vista parcial do tanque classe “A” Instalado na Fazenda Nossa Senhora do Rosário	32
3	Faixas de condutividade hidráulica média ao longo da Fazenda Nossa do Rosário	36
4	Tradagem para instalação de piezômetros em detalhe, esquema de sondagem até área de condutividade hidráulica arenosa	37
5	Retirada do tubo de revestimento	38
6	Piezômetros e tubos de ferro de encamisamento	38
7	Martelo para instalação do piezômetro por impacto	39
8	Batedor para acoplamento do martelo ao tubo de encamisamento	39
9	Piezômetro instalado e protegido	40
10	Avaliação da condutividade do piezômetro	40
11	Disposição de piezômetro em campo	41
12	Esquema do piezômetro, do tubo de encamisamento, do batedor e do martelo	41
13	Critério Agrônômico assumido para estimar a taxa de bombeamento	44
14	Vista do Vale da Fazenda, faixa azul e verde representam recarga lateral	47
15	Cota do nível de água nos piezômetros localizados no contorno de montante da área	52
16	Cotas do nível de água nos piezômetros associados aos poços públicos	52
17	Cotas do nível de água nos piezômetros imediatamente a montante da sub-área estudada	53
18	Cotas do nível de água nos piezômetros imediatamente a jusante da sub-área estudada	53
19	Cotas do nível de água nos piezômetros a jusante da subárea estudada	54
20	Cotas do nível d’água nos piezômetros próximos ao contorno de jusante do aluvião	54

21	Cota das cargas simuladas e observadas no contorno de montante do aluvião	56
22	Cota das cargas simuladas e observadas imediatamente a montante da sub- área estudada	56
23	Cota das cargas simuladas e observadas imediatamente a jusante da sub-área estudada	57
24	Cota das cargas simuladas e observadas a jusante da sub-área estudada	57
25	Cota das cargas simuladas e observadas a jusante da sub-área estudada	58
26	Cota das cargas simuladas e observadas próximas ao contorno de jusante do aluvião	58
27	Cota das cargas simuladas e observadas no contorno de jusante do aluvião	59
28	Evolução temporal da recessão na sub-área – Seção transversal “A”	61
29	Evolução temporal da recessão na sub-área – Seção transversal “B”	62
30	Evolução temporal da recessão na sub-área – Seção transversal “C”	62
31	Seção transversal “A” mais a jusante da subárea de estudo	63
32	Seção transversal “B” central da subárea de estudo	63
33	Seção transversal “C” mais a montante da subárea de estudo	63

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Possibilidades hidrogeológicas do Nordeste do Brasil	19
2	Pacotes interdependentes do modelo VisualModflow	25
3	Coeficiente de tanque K_p em função da bordadura, da umidade relativa do ar e do vento	33
4	Vazão para lotes irrigados para os principais cultivos da Fazenda	45
5	Estimativa para recarga adicional aplicada ao aquífero nos limites Norte e Sul	48
6a	Recarga adicional do limite Norte	48
6b	Recarga adicional do limite Sul	49
7	Parâmetros físicos considerados e seus valores	55

RESUMO

Este trabalho foi realizado em vale aluvial (NEOSSOLO FLUVICO) da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, município de Pesqueira-PE. O objetivo principal foi avaliar o potencial hídrico do aluvião em garantir suprimento hídrico para a pequena irrigação. Com base em simulações numéricas em Diferenças Finitas, utilizando o software Visual Modflow, avaliou-se os fluxos e a distribuição de cargas hidráulicas no vale, considerando a distribuição real de uso e ocupação do solo. As extrações do aquífero foram avaliadas segundo critério agrônomo, baseado no consumo hídrico das culturas. Caracterização hidráulica detalhada foi utilizada e complementada a partir de testes de campo em piezômetros, particularmente na interface entre o aquífero e riacho adjacente. A malha adotada para simulação foi constituída de três camadas, cada uma composta de 2100 células de 50m x 50m. Além dos fluxos difusos na superfície (recarga e evaporação), adotou-se contribuições oriundas da Bacia Hidrográfica circunvizinha. Com base nos resultados, pode-se verificar que o aquífero aluvial está submetido a elevadas taxas de recarga, de modo que as taxas de bombeamento aplicadas não estão colocando em risco a sustentabilidade do aquífero. Outrossim, verifica-se que os agricultores locais podem adotar lâminas de irrigação compatíveis com as necessidades das culturas, sem comprometer a disponibilidade hídrica subterrânea.

ABSTRACT

This study has been developed at the alluvial site (“NEOSSOLO FLUVICO” soils) of “Nossa Senhora do Rosário” Farm (Pesqueira-PE). The aim of this study was to assess the aquifer potential to supply small scale irrigation. Based on numerical simulation adopting Finite Differences, and using the Visual Modflow software, saturated flow and hydraulic heads have been evaluated over the domain, considering actual soil use. Groundwater abstractions have been estimated based on agronomic criteria, considering crop water requirements. Detailed hydraulic characterization has been used and complemented by field tests in piezometers, particularly at the interface between the aquifer and the rivulet. The adopted mesh has three layers, with 2100 cells each, with dimension 50m x 50m. Not only distributed fluxes have been considered at the surface (recharge and evaporation), but contribution from the basin have been included. It can be verified from the results that the alluvial aquifer is subject to high recharge rates, and so the nowadays abstractions to irrigation have not posed the system under degradation risk. Likewise, it has been observed that irrigation rates consistent to crop demands can be applied, without producing depletion of storage on long term.

1. INTRODUÇÃO

O uso racional da água é de fundamental importância para a humanidade. A crescente preocupação com a disponibilidade mundial da água vem exigindo de todos uma nova consciência em relação a utilização desse recurso. A água potável encontrada na natureza é essencial para a vida no nosso planeta. No entanto, esta riqueza tem-se tomado cada vez mais escassa. Segundo dados da World Resources Institute, ONU, cerca de 97,50% da disponibilidade mundial da água está nos oceanos, somente 0,007% da água disponível é própria para o consumo humano, e está em rios e lagos, e aproximadamente 2,5% encontra-se em regiões polares ou subterrâneas (aqüíferos). Percebe-se que as águas subterrâneas constituem uma importante fonte de abastecimento. De acordo com Todd (1953), seu emprego vem crescendo na irrigação, em indústrias, municipalidades e residências rurais. A sua escassez em áreas de consumo excessivo ou de baixa disponibilidade, como as regiões semi-áridas, dá ênfase à importância ao aproveitamento racional, regulação e proteção de abastecimento, a fim de garantir a disponibilidade contínua desse recurso natural.

A região semi-árida Nordestina, embora com potencial para agricultura, sofre com o regime irregular das chuvas e com a elevada taxa de evaporação, requerendo a implantação de sistemas de irrigação, de grande importância para o desenvolvimento da agricultura familiar na região.

Este trabalho foi desenvolvido na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, área de assentamento estadual, localizada no município de Pesqueira, Agreste Pernambucano. O município de Pesqueira dista 214 km da cidade de Recife. A primeira fábrica a surgir na cidade foi a da Indústria Carlos de Britto (Fábrica Peixe). Com essa “revolução econômica”, a cidade ganhou notoriedade nacional. Sua história se confunde com o desenvolvimento da Fábrica Peixe. De acordo com Oliveira (1998), a industrialização proletarizou o camponês, levando para o campo a relação capitalista patrão/empregado. “O empregado que antes era dono de sua terra se viu obrigado a plantar goiaba e tomate exclusivamente para as empresas de conservas”.

A Fazenda em estudo possui uma área de aproximadamente 110 ha.

Suas terras distribuem-se em estreita faixa ao longo do terraço aluvial do rio Ipanema, e são limitadas por áreas de encostas do embasamento cristalino. Na fazenda existem aproximadamente 60 ha irrigados, cultivados por cerca de 50 famílias de agricultores, que utilizam a água subterrânea para seu consumo doméstico e para a pequena agricultura irrigada.

O uso dos recursos hídricos subterrâneos na fazenda requer manejo de irrigação, cujo método utilizado desde a implantação do assentamento tem sido o de aspersão convencional, como comentado por Santiago (2002). Os sistemas por aspersão convencional operam com maior pressão, menor eficiência, maior emprego de mão de obra e consumo de energia elétrica, quando comparados com similares de caráter localizado, os quais têm ganho relevante aceitação. Assim, a irrigação localizada vem sendo implantada em alguns lotes, trazendo benefícios tais como economia significativa no uso da água, bem como de energia.

Realizou-se estudo da dinâmica do lençol freático a partir de poços de observação instalados ao longo da fazenda. Com base nas leituras de campo e em informações sobre o meio físico e hidrológico da área, analisou-se o comportamento quantitativo do aquífero utilizando ferramenta computacional. De posse dessas informações, esquemas de remediação das águas subterrâneas podem ser otimizados, auxiliando no desenvolvimento sustentável da irrigação. Dentre tais esquemas merecem destaque a locação estratégica de poços e a adoção de taxa de bombeamento compatíveis.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Águas subterrâneas

A água sob a superfície da terra é referida como água do subsolo ou água subsuperficial. O termo equivalente para água sobre a superfície da terra é a água de superfície. Água subsuperficial ocorre em duas zonas diferentes. A primeira zona ocorre imediatamente sob a superfície terrestre contém água e ar e é referida como zona insaturada. A segunda, quase que invariavelmente sotoposta a primeira, apresenta todas aberturas interconectadas e cheias de água, referida como zona saturada (Heath, 1983).

A água na zona saturada é a única água subterrânea que está disponível para suprir poços e fontes, à qual o nome “água subterrânea” aplica-se corretamente. A recarga da zona saturada ocorre por percolação da água de superfície através da zona insaturada, que é de grande importância para a hidrologia da água subterrânea. Esta zona pode ser dividida em três partes: a zona do solo, a zona intermediária e a parte superior da franja capilar (Heath, 1983).

A parte mais inferior da zona insaturada é ocupada pela franja capilar, a subzona entre as zonas insaturada e saturada. A franja capilar resulta da atração entre água e solo. Como resultado desta atração, a água adere como um filme sobre a superfície das partículas e ascende nos poros de pequeno diâmetro contra a ação da força gravitacional. A água na franja capilar e na parte acima desta, na zona insaturada, encontra-se sob pressão hidráulica negativa, menor que a atmosférica (barométrica). A superfície freática é o nível na zona saturada no qual a pressão hidráulica é igual pressão atmosférica (Heath, 1983).

Segundo Manoel Filho (1997), cerca de 97% da água doce disponível para uso da humanidade encontra-se no subsolo, na forma de água subterrânea. No qual cita que, conforme estimativas da UNESCO (1992), no período de 1970 à 1995 foram perfurados no mundo cerca de 300 milhões de poços. Essas obras

fornece água subterrânea para o abastecimento de mais de 50% da população do planeta e para a irrigação de aproximadamente 90 milhões de hectares.

2.2 Ciclo Hidrológico

O termo ciclo hidrológico refere-se ao constante movimento da água na Terra. Quase toda a água subterrânea existente na Terra tem origem no ciclo hidrológico, isto é, no sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficial e subterraneamente, ao oceano. Este ciclo é governado, no solo e subsolo, pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e densidade da cobertura vegetal e, na atmosfera e superfícies líquidas, pelos elementos e fatores climáticos, como por exemplo, temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar, insolação, que são os responsáveis pelos processos de circulação da água dos oceanos para a atmosfera, em uma dada latitude terrestre (Manoel Filho, 1997).

Embora o ciclo hidrológico tenha começo e fim indefinidos, é conveniente discutir suas feições principais começando com a evaporação a partir dos vegetais, das superfícies líquidas expostas, incluída a superfície terrestre, e do oceano. Tal umidade forma nuvens, que retornam a água à superfície da terra ou oceanos em forma de precipitação que é um termo geral que ocorre sob várias formas, incluídas chuva, neve e granizo. Para caso específico desse estudo, a chuva é a principal forma de precipitação. O primeiro efeito da chuva é molhar a vegetação e outras superfícies para, daí, começar a infiltrar. De acordo com Heath (1983), as velocidades de infiltração variam largamente, dependendo do uso da terra, do caráter e do conteúdo de umidade do solo e da intensidade e duração da precipitação.

A infiltração é fundamental para manutenção dos aquíferos. A água que se infiltra está submetida a duas forças fundamentais: a de gravidade e a força de adesão de suas moléculas às superfícies das partículas do solo (força de capilaridade). Pequenas quantidades de água no solo tendem a se distribuir uniformemente pela superfície das partículas. A força de adesão pode ser mais

forte do que a força da gravidade que age sobre a água no solo. Como consequência, a água poderá ficar retida e quase imóvel, dependendo do estado de umidade, não atingindo as zonas mais profundas. Chuvas finas e de curta duração fornecem água suficiente apenas para repor esta umidade do solo. O excesso percola lentamente através da zona intermediária à zona de saturação. A água na zona de saturação move-se descendente e lateralmente a locais de descarga de água subterrânea, tais como fontes nas encostas ou como surgências sob os rios, lagos e oceano. Dependendo das condições existentes, a velocidade com que a redistribuição da água ocorre pode ser apreciável por muitos dias ou tornar-se rapidamente desprezível. A intensidade da redistribuição e a sua duração determinam a capacidade de armazenamento do solo (Tucci, 1997).

A água ao atingir as correntes, tanto por escoamento superficial como descarga de água subterrânea, move-se ao mar, de onde é novamente evaporada, fechando o ciclo.

2.3 Aquífero

Por definição, “aquífero” é uma litologia porosa e permeável, capaz de ceder água economicamente a obras de captação; constituindo-se em um material geológico capaz de servir de depósito e de transmissor da água aí armazenada. Assim, uma litologia só será aquífera se, além de conter água em seus poros em condições saturadas, permitir a fácil transmissão da água armazenada (Heath, 1983).

Água subterrânea ocorre em aquíferos sob duas diferentes condições. Onde a água só parcialmente preenche o aquífero e não existe camada de impedimento sub-superficial, a superfície superior da zona saturada é livre para subir ou descer, e tem-se os aquíferos não-confinados ou aquíferos freáticos. O outro caso é onde a água completamente preenche o aquífero que está sobreposto por uma camada confinante. Tais aquíferos são referidos como aquíferos confinados ou artesianos (Heath, 1983).

Em geral, os vales aluviais possuem aquíferos livres a semi-confinados, em função da distribuição espacial e vertical das camadas de sedimentação de textura fina.

A Tabela 1 apresenta as principais formações geológicas do Nordeste do Brasil, com destaque para as formações aluvionares.

Tabela 1 – Possibilidades hidrogeológicas do Nordeste do Brasil, conforme Rebouças e Gaspar (1971)

Tipo de aquífero	Área em 10^6 km^2	Vazão escoamento natural em $10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$	Recursos permanentes em 10^9 m^3	Reservas exploráveis em $10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$
Terrenos cristalinos	720	50 a 250	-	50 a 250
Aluviões do cristalino	35	100	5	1.000 a 2.000
Bacia do Maranhão	450	3.000	2.000	10.000
Bacia de S. Luiz e Barreiras	50	500.000	-	-
Bacia de São Francisco	160	700	300	3.000
Bacia do Rio Jacaré	70	15	100	1.000
Bacia Alto Jaguaribe	11,5	40	2.000	100
Bacia do Recôncavo	10	50	210	2.000
Bacia do Tucano	40	100	1.000	1.000
Bacia do Jatobá	6	1	100	10
Bacia Potiguar	22	-	75	750
Bacias Costeiras	25	30	50	-
Bacia do Norte	8	-	-	-

2.4 Equações que regem o fluxo de água subterrânea

Os aquíferos transmitem água das áreas de recarga para as áreas de descarga, funcionando como condutos porosos. Os fatores que controlam o movimento das águas subterrâneas foram primeiro expressos em forma da equação pelo engenheiro francês Henry Darcy. A lei de Darcy descreve a velocidade do fluxo saturado, a qual estabelece que, para um determinado tipo de solo, a vazão (Q) é diretamente proporcional à seção do solo a que ultrapassa, a diferença de carga hidráulica (H) e à condutividade hidráulica do solo (K), e inversamente proporcional à distância percorrida (ΔL). Pode-se então escrever:

$$Q = -KA \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \quad (1)$$

• Equação transiente tridimensional de fluxo de água Subterrânea

Aplicando-se o princípio da conservação de massa e a Lei de Darcy a um volume elementar representativo de um aquífero, e adotando-se o sistema de coordenadas de eixo coincidente com as direções principais do tensor de condutividade hidráulica, pode-se obter a equação diferencial parcial transiente (de estado não estacionário), tridimensional, expressa em (2), para distribuição da carga num aquífero heterogêneo e anisotrópico (Cleary, 1991):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

onde:

H - carga hidráulica total (L);

K_x , K_y e K_z - componentes principais da condutividade hidráulica (L/T);

S_s - coeficiente de armazenamento específico (1/L);

W - Fontes ou sumidouros de água ($L^3/TL^3 = 1/T$);

X, Y, Z – Coordenadas de posição (L);

t – Tempo

Em três dimensões, os poços são fontes pontuais, matematicamente descritas por três funções Delta de Dirac. Nesse caso, W equivale a:

$$W = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$$



Onde:

Q_i - taxa de bombeamento (-) ou de injeção (+) do poço i , (L^3/T);

x_i, y_i e z_i - são as coordenadas cartesianas do poço (L);

N - número de poços (adimensional)

2.5 Características físicas do aquífero

A capacidade de um aquífero em armazenar e transmitir água depende das propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e das propriedades do meio poroso (porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade). Nesta seção, serão discutidos os conceitos de armazenamento específico e coeficiente de armazenamento, que utilizam algumas das propriedades acima.

O armazenamento específico de um aquífero saturado é definido como o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica (Cabral, 1997). Os valores de armazenamento específico podem variar de 2.0×10^{-2} a 2.6×10^{-3} , para formação argilosa, e de 6.9×10^{-5} a 3.3×10^{-6} , para rocha fissurada.

A condutividade hidráulica leva em consideração as características físicas do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma das partículas, arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica).

Em um meio isotrópico, a condutividade hidráulica pode ser definida como a velocidade aparente induzida por um gradiente hidráulico unitário. Refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico. Os valores de condutividade hidráulica variam de 10^{-9} a 10^{-6} cm/s, para a argila, a 10^{-2} a 10^0 cm/s para cascalho bem distribuído, segundo Fetter (1994).

A Transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida por toda a espessura saturada do aquífero. Pode-se conceituá-la como a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária, submetida a um gradiente hidráulico unitário (Heath, 1983).

2.6 Modelos matemáticos e numéricos

O desenvolvimento da informática contribuiu sobre maneira para a modelagem numérica de águas subterrâneas. Durante os anos de 50 e 60, surgiram os primeiros modelos baseados em processos físicos e elétricos analógicos, os quais foram os precursores dos modelos matemáticos. Os modelos físicos desenvolvidos nos anos 50 baseavam-se na utilização de caixas de areia ou placas de vidros paralelas denominadas Hele-Shall, onde se simulava o fluxo de águas subterrâneas através de traçadores injetados no sistema, investigando-se assim o movimento das águas subterrâneas e suas trajetórias através de arranjos geológicos simples, tais como lentes permeáveis e brechas de falhas (Cleary, 1991).

Os modelos físicos foram sucedidos por modelos elétricos baseados na analogia entre a Lei de Ohm, para o fluxo de eletricidade, e a Lei de Darcy, para o fluxo de água subterrânea em meios porosos. Através do uso de grandes placas com resistores e capacitores, o fluxo de água subterrânea em grandes sistemas aquíferos poderia ser simulado (Walton, 1970), citado por Cleary (1991). Tais modelos analógicos eram muito populares nos anos 60, que em meados dos anos 70 foram substituídos por modelos digitalizados para computadores. Modelos físicos e elétricos analógicos eram essencialmente modelos de fluxo, e o movimento de contaminantes em águas subterrâneas raramente era estudado.

Com a evolução dos computadores pessoais, a modelagem matemática tornou-se uma escolha natural como ferramenta atualizada de avaliação, projeto e planejamento. Centenas de modelos foram desenvolvidos para o manejo da enorme variedade de tipos de aquíferos e condições específicas encontradas no campo.

Um modelo matemático é uma representação de processos físicos através de equações matemáticas. Quando apropriadamente construído, pode ser valiosa ferramenta de prognóstico para manejo de recursos hídricos subterrâneos (Wang, 1982). No caso da hidrogeologia, são utilizadas as equações que regem o fluxo subterrâneo em meios porosos, baseados na equação de Darcy. O uso de modelos auxilia a sistematizar as informações de campo e a identificar áreas onde informações adicionais são necessárias. Em particular, pode prever conseqüências das ações e dos usos sobre os recursos hídricos subterrâneos, como por exemplo aquelas oriundas de práticas agrícolas em solos irrigados.

Os objetivos a serem atingidos com o uso dos modelos computacionais são, em geral a previsão e a interpretação. No primeiro caso, o modelo é usado para prever a resposta do aquífero a determinadas ações. No segundo caso, procura-se entender o funcionamento hidráulico do aquífero e sistematizar as informações. Quando usados em conjunto com experiências e dados de campo, auxilia na tomada de decisões de forma mais objetiva, permitindo a escolha de alternativas mais adequadas.

Os modelos podem ser divididos em modelos de fluxo e modelos de transporte de massa. Os primeiros realizam simulações do escoamento levando em consideração os fluxos naturais dos aquíferos, suas recargas e os bombeamentos ou extrações a que estão submetidos. Por sua vez, os modelos de transporte de massa analisam o transporte e espalhamento de substâncias poluentes nos aquíferos (Cabral, 1997), simulando a distribuição espacial e temporal das concentrações pertinentes.

Para resolução da equação (2), faz-se necessário atribuir as “condições de contorno do modelo”. É a fase de delimitação da área de interesse, onde se deve utilizar limites naturais das água subterrâneas, que podem ser representados por

águas superficiais (rios lagos ou pântanos); limites geológicos (afloramentos rochosos); divisores de águas subterrâneas; ou contornos de fluxo (condição de contorno artificial, fluxo especificado). Cabral e Demétrio (1997) descrevem as características e importância da condição de contorno para o sucesso das simulações numéricas.

Monteiro (1999) e Montenegro et al. (2000) realizaram simulações de escoamento utilizando o modelo Visual Modflow (Guiguer e Franz, 1993), para avaliar a dinâmica da zona saturada de uma vazante de açude cultivada com milho. Obteve-se taxas de recarga e de descarga consistentes, utilizando-se critérios estatísticos de ajuste entre valores medidos e simulados de carga hidráulica. Assim, produziu-se resultados adequados sobre repostas da zona saturada diante de aportes (recargas) e de extrações (demandas atmosféricas). Nessa aplicação, o modelo permitiu estimar indiretamente as taxas de evapotranspiração real da cultura.

Em estudos realizados por Montenegro e Monteiro (2000) utilizando o modelo Visual Modflow, para avaliação hídrica do aquífero do domínio aluvial da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, investigou-se as taxas de entrada (recarga) e saída (evapotranspiração e bombeamento) de água no aquífero, em condições livres, produzindo-se cenários indicativos das regiões de maior conexão hídrica entre a zona saturada e a superfície do solo e, portanto, de maior vulnerabilidade no tocante a contaminações induzidas pelo uso agrícola.

Cabral e Loureiro (2002) realizaram trabalho em aquífero aluvial do rio Piracicaba, através de modelagem hidrogeológica utilizando o Visual Modflow, que após calibrado na condição atual de exploração, foi utilizado para simular cenários sob condição de ausência de bombeamento e de exploração máxima. Pode-se então determinar a quantidade de água que circulava pelo aquífero nessas condições, assim como o rebaixamento máximo passível de ocorrer.

Em pesquisa desenvolvida por Manoel Filho e Castro (2002), avaliando a exploração do aquífero Dunas Barreiras usando o Visual Modflow, foi possível identificar locações adequadas de poços e estabelecer valores de vazão máxima que não comprometessem a qualidade da água, sob risco de intrusão marinha.

Monteiro (2000) desenvolveu trabalho de modelagem em aquíferos da planície do Recife utilizando o Visual Modflow, no qual foi avaliado três cenários de exploração, sendo o primeiro com bombeamento atual, o segundo aumentando a exploração da camada principal, e o terceiro sob condição de redução de extração de água à metade da retirada com alcance de 11 anos de 2000 a 2010, observou-se como resposta para o primeiro caso manutenção das descargas, para o segundo exaustão do aquífero e para o terceiro recuperação geral dos níveis piezométricos.

O modelo “Visual Modflow”

Considerando a relevância do modelo Visual Modflow neste estudo, detalha-se a seguir as suas principais características estruturais e subrotinas numéricas.

O Visual Modflow tem como base o Modflow, desenvolvido por MacDonald e Harbaugh (1984) da USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos), este resolve a equação diferencial de fluxo usando o método de diferenças finitas, que encontra-se integrado dentro de um pacote computacional com o MODPAPH e MT3D/RT3D, combinando estes modelos a uma poderosa interface gráfica. Para maiores detalhes quanto à equação de fluxo discretizada, pode-se consultar MacDonald e Harbaugh (1984), bem como Monteiro (2000).

A sua estrutura modular, ou seja, rotinas de entradas e saídas divididas em “pacotes” interdependentes, facilita o seu aprimoramento e atualização, bem como incorporação de novas subrotinas. A Tabela 02 apresenta a sua estrutura modular.

Tabela 2. Pacotes interdependentes do modelo VisualModflow

Básicos	Condições de contorno	Outros
BAS, BCF	CH, CHD	STR
Output Control (OC)	WELL	HFB
Solucionadores de matrizes	RCH	
SIP	ET	
SSOR	RIV	
PCG, PCG2	DRN	
WHS	GHB	

Quanto ao pacote de dados, Monteiro (2000) relatou as funções de cada módulo como se segue:

Básico (BAS): Gerencia as tarefas do modelo como um todo, constituindo-se no Programa Principal. Dentre essas tarefas está a escolha dos módulos a serem utilizados, número de linhas, colunas e camadas, a especificação dos limites, determinação do passo de tempo da simulação (time-step), duração, estabelecimento de condições iniciais, regime de bombeamento e impressão dos resultados.

Block-Centered Flow (BCF): Calcula os termos da equação de fluxo discretizada em diferenças finitas, especificamente os fluxos entre células adjacentes, as trocas no armazenamento, realizando um balanço hídrico local.

Poço(Well): Adiciona recarga (descarga positiva) ou retirada(descarga negativa) pontual no balanço hídrico local. Os parâmetros de entrada do módulo consistem, para cada poço, de sua localização (linha, coluna e camada) e da taxa de descarga.

Recarga (RCH): Este módulo foi projetado para adicionar recarga distribuída ao modelo, simulando a taxa de infiltração por unidade de área. A recarga superficial acontece como resultado da precipitação ou da recarga artificial que infiltra no aquífero. Se é requerida a aplicação da recarga para mais de uma célula em uma coluna vertical constituída de várias células, então utiliza-se o módulo poço, o qual pode especificar recarga ou descarga em qualquer célula do domínio.

Rio (RIV): Este módulo tem como finalidade simular os efeitos do fluxo entre o rio e o aquífero, ou vice-versa. Esta simulação é realizada somando à equação de fluxo os termos que representam a drenagem do leito do rio para cada célula atingida.

Drenos (DRN): O módulo dreno tem por objetivos simular os efeitos de estruturas tais como drenos agrícolas, que removem água do aquífero a uma taxa proporcional à diferença entre a carga no aquífero e alguma carga fixa ou

elevação, desde que a carga no aquífero esteja acima daquela elevação. Este módulo não tem nenhum efeito se a carga estiver abaixo daquele nível, sendo particularmente recomendado para simulações em domínios com rios intermitentes.

Evapotranspiração (EVT): Este módulo simula os efeitos da transpiração das plantas e da evaporação direta na remoção da água da zona saturada de água subterrânea. A abordagem é baseada nas seguintes suposições: (1) Quando o nível da água é igual ou superior que um nível específico chamado de “ET surface”, a perda por evaporação a partir do nível freático ocorre a uma taxa máxima especificada pelo usuário; (2) quando a profundidade do aquífero freático abaixo do “ET surface” excede ao intervalo especificado chamado de “profundidade de extinção” ou “profundidade de corte”, a evapotranspiração do lençol freático cessa; e (3) entre estes limites, a evapotranspiração do aquífero freático varia linearmente com a elevação do nível do freático.

Limites Carga Geral (GHB): Este módulo é matematicamente semelhante aos módulos rio, dreno e ET, inserindo um fluxo de entrada ou de saída de uma célula de contorno i, j, k relacionado a uma fonte externa, e proporcional à diferença entre as cargas na célula e na fonte externa, baseado na Lei de Darcy.

Strongly Implicit Procedure (SIP) e Slice-Successive Overrelaxation(SSOR): São dois métodos iterativos para resolução dos sistemas de equações lineares que descrevem o balanço hídrico no aquífero.

Macdonald e Harbaugh (1984) apresentam a discretização da equação diferencial de fluxo em Diferentes Finitas utilizada no Modflow, Equação (2), gerando um sistema de equações lineares. Com base na figura 1a, pode-se seleccionar uma célula i, j, k e seis outras células adjacentes $(i-1, j, k)$; $(i+1, j, k)$; $(i, j-1, k)$; $(i, j+1, k)$, $(i, j, k-1)$; $(i, j, k+1)$. O índice $j-1/2$ é adotado para indicar um ponto entre os nós da célula i,j,k e célula $i,j-1,k$, não indicando necessariamente um

ponto exatamente entre os dois nós, mas sim um ponto entre estas células. O termo $q_{i,j-1/2,k}$ representa o fluxo que entra na célula i,j,k a partir da célula $i,j-1,k$ e $r_{j-1/2}$ a distância entre os nós i,j,k e $i,j-1,k$. Para as outras faces deve se proceder de forma similar.

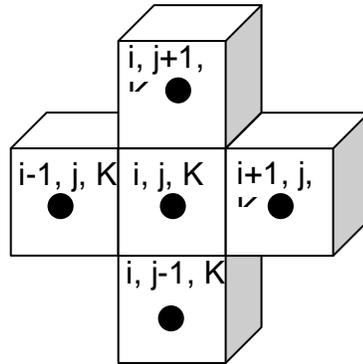


Figura 1a – Representação do elemento no centro da célula.

A equação (2) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
 & CV_{i,j,k-1/2} h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m + (-CV_{i,j,k-1/2} - CC_{i-1/2,j,k} - CR_{i,j-1/2,k} - \\
 & CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m + CR_{i,j+1/2,k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+1/2,j,k} h_{i+1,j,k}^m \\
 & + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k}
 \end{aligned} \tag{4}$$

sendo,

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - SCI_{i,j,k}^{(tm-tm-1)}$$

$$RHS_{i,j,k} = Q_{i,j,k} - SCI_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1}^{(tm-tm-1)}$$

$$SCI_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

A condutância (CV ou CC ou CR) representa o produto entre a condutividade hidráulica (KV ou KC ou KR) e a área transversal ao fluxo ($\Delta c_i \Delta r_j$ ou $\Delta r_j \Delta v_k$ ou $\Delta c_i \Delta v_k$), dividido por um comprimento (distância entre os nós Δv ou Δc ou Δr). As letras “V”, “C”, e “R” nas condutâncias representam “vertical”, “coluna” e “linha”, respectivamente. Tem-se então:

- $CV_{i,j,k-1/2}$ e $CV_{i,j,k+1/2}$: são as condutâncias na vertical normal às camadas, entre os nós (i,j,k) ; $(i,j,k-1)$; (i,j,k) ; $(i,j,k+1)$, respectivamente.
- $CC_{i-1/2,j}$ e $CC_{i+1/2,j,k}$: são as condutâncias na coluna j da camada k entre os nós (i,j,k) ; $(i-1,j,k)$; (i,j,k) ; $(i+1,j,k)$ respectivamente.
- $CR_{i,j-1/2,k}$ e $CR_{i,j+1/2,k}$: são as condutâncias na linha i da camada k entre os nós (i,j,k) ; $(i,j-1/2,k)$; (i,j,k) ; $(i,j+1,k)$ respectivamente.
- m : passo de tempo
- h : carga
- t_{m-1} e t_m : tempo
- $Ss_{i,j,k}$: coeficiente de armazenamento específico
- $\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$: volume da célula i,j,k
- $P_{i,j,k}$: ações que dependem da carga da célula i,j,k .

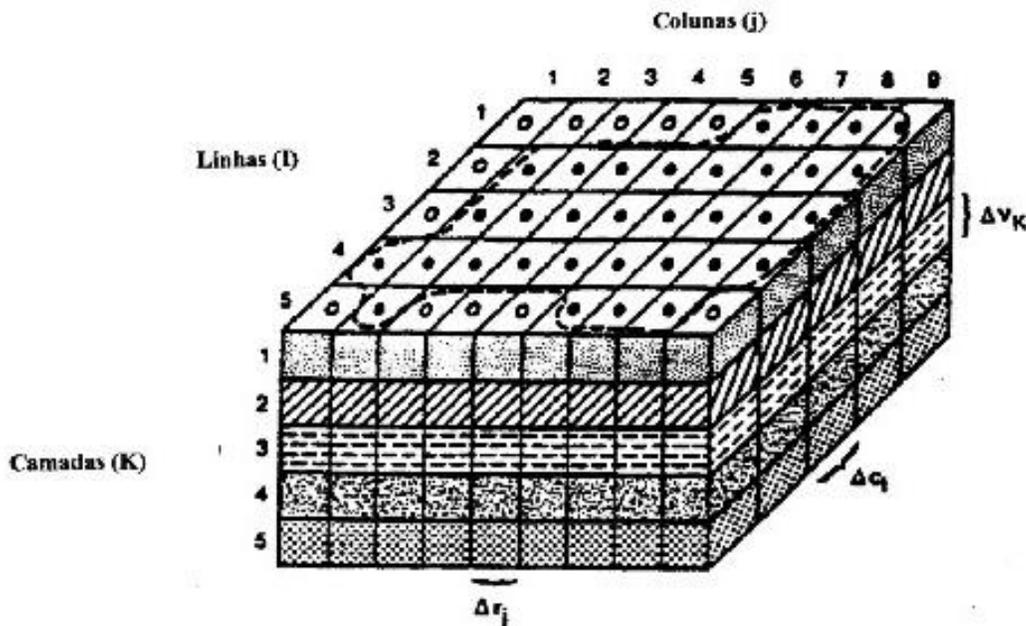


Figura 1b – Malha tridimensional de Diferenças Finitas utilizada pelo modelo modflow .

Convenções

----- Limite do aquífero

- Célula ativa
- Célula inativa
- Δr_j Dimensão da célula ao longo da direção da linha. O subscrito (j) indica o número da coluna.
- Δc_i Dimensão da célula ao longo da direção da coluna. O subscrito (i) indica o número da linha.
- Δv_k Dimensão da célula ao longo da direção vertical. O subscrito (k) indica o número da camada.

Carvalho Filho e Costa (2002) estudaram análise de sensibilidade para o parâmetro Condutância na condição de contorno GHB do modelo de fluxo de água subterrânea MODFLOW. Adicionalmente, realizou uma análise comparativa das características matemáticas de quatro pacotes ou módulos do MODFLOW, que são formas de implementação da condição de contorno de tipo 3 (GHB, Rio, Dreno e ET). Determinaram que o módulo dreno pode ser usado para representar a relação entre um aquífero e um rio temporário numa região semi-árida. Este pacote pode ser usado para simular drenos, rios temporários, nascentes, trincheiras e qualquer outra condição que atue unicamente como sumidouro de água até um valor mínimo de carga hidráulica podem ser representados. O módulo rio pode ser empregado para representar rios, lagos, represas e condições que assumam uma vazão constante de água para o aquífero, quando a carga hidráulica deste tornar-se inferior a determinado valor. O módulo GHB também pode ser usado para modelar os sistemas hidrológicos simulados pelo Módulo Rio, entretanto, deve-se considerar que não haverá limite para o fluxo de água do contorno ao aquífero. Esses dois módulos também podem ser usados como interface entre aquíferos adjacentes simulados separadamente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, no município de Pesqueira-PE, a 230km de Recife, às margens da BR-232. As coordenadas geográficas são 08^o10'25''S, 35^o11'25''W, de latitude e longitude, respectivamente, e 650m de altitude.

O aquífero aluvial é raso, com profundidade média de 10m, possuindo cerca de 15km de extensão e 300m de largura. Na área de interesse, o aluvião possui cerca de 2,5 km de extensão (Montenegro et al., 1998).

A seguir são apresentados os principais aspectos fisiográficos do domínio em estudo.

- **Clima**

A condição climática do município de Pesqueira, de acordo com Montenegro et al (2001), é semi-árida muito quente tipo Estepe. Nessa área ocorrem precipitações médias anuais da ordem de 600 mm, concentradas nos meses abril a agosto. A temperatura média mensal oscila em torno de 20 a 30 °C (Corrêa e Ribeiro, 2001).

3.2 Dados agroclimatológicos

Para o período de 1995 à 1998, os dados de pluviometria utilizados são referentes ao município de Pesqueira e foram fornecidos pelo INMET, enquanto os dados restantes (1998 a 2002) foram obtidos em pluviômetros instalados na fazenda, durante os trabalhos de Santiago (2002) e Blackburn (2002).

A evapotranspiração potencial foi estimada para os anos de 2000, 2001 e 2002 através de Tanque Classe "A", que consiste em um reservatório de folha

galvanizada, cheio de água, colocado sobre um estrado de madeira (Reichardt, 1990). Com a evaporação, o nível de água dentro do tanque abaixa, fornecendo diretamente a altura de água evaporada. A taxa de evaporação, medida com auxílio de uma ponta linimétrica apoiada em um poço tranqüilizador, é resultado das mudanças de nível de água no tanque, levando em consideração a precipitação ocorrida. Segundo Silva (2000), vários trabalhos mostraram que dentre os métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração de referência, o Tanque Classe “A” é preciso de boa economia e praticidade. Isto se deve ao fato do tanque fornecer uma medida integrada dos efeitos da radiação, do vento, da temperatura e da umidade relativa do ar.



Figura 2 – Vista parcial do Tanque Classe “A” instalado na Fazenda Nossa Senhora do Rosário.

A evapotranspiração de referência pode ser calculada pela equação:

$$ET_0 = K_p \cdot ECA \quad (4)$$

Onde:

ET_0 – Evapotranspiração potencial ou de referência (L);

K_p – Coeficiente de tanque;

ECA – Evaporação do tanque classe (L).

O Tanque Classe “A” possui superfície de água livre, que desse modo perde água com mais intensidade do que uma cultura. Para correção, segundo Reichardt (1990), deve-se utilizar um coeficiente de tanque (K_p), o qual depende do tamanho da bordadura à qual o tanque está exposto, da umidade relativa do ar e da velocidade do vento.

A região da Fazenda, como comentada anteriormente, está no semi-árido Nordeste, com baixa velocidade de vento e baixa umidade relativa. Para o Tanque instalado na Fazenda, o coeficiente de tanque médio K_p , segundo os critérios apresentados pela tabela 3, foi de 0,75 (Montenegro, 1997).

Tabela 3 – Coeficiente de tanque K_p em função da bordadura, da umidade relativa do ar e do vento (Fonte: Reichardt 1990).

Vento (Km/dia)	Bordadura (m)	Umidade relativa		
		Baixa < 40%	Média 40-70%	Alta > 70%
< 175 leve	1	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,70	0,80	0,85
	1000	0,75	0,85	0,85
175-425 moderado	1	0,50	0,60	0,65
	10	0,60	0,70	0,75
	100	0,65	0,75	0,80
	1000	0,70	0,80	0,80
475-700 forte	1	0,45	0,50	0,60
	10	0,55	0,60	0,65
	100	0,60	0,65	0,70
	1000	0,65	0,70	0,75

- **Relevo e geomorfologia**

A maior parte da Fazenda Nossa Senhora do Rosário está situada em uma superfície geomórfica aplainada, que constitui o terraço fluvial do rio Ipanema, formado por sedimentos aluviais de textura variada, referidos ao Holoceno. A planície aluvial é limitada por encostas suavemente onduladas a onduladas, do piemonte de maciços montanhosos que circundam o vale e, em alguns pontos, o limitam abruptamente. Estas encostas são caracterizadas por solos pouco profundos, desenvolvidos do embasamento geológico referido ao Pré-Cambriano indiviso representado, principalmente, por gnaisses e granitos (Corrêa e Ribeiro, 2001).

- **Vegetação**

A cobertura vegetal primária desta região é a caatinga hipoxerófila arbóreo-arbustiva, que apresenta variações fisionômicas e florísticas em resposta a variações de solo e relevo. Nas posições de várzea esta formação assume um porte arbóreo, apresentando-se como uma floresta caducifólia, hoje totalmente substituída por culturas (Corrêa e Ribeiro, 2001).

- **Uso atual**

As terras do terraço fluvial são intensamente cultivadas com irrigação. A principal prática agrícola é a olericultura, destacando-se tomate, repolho, cenoura, pimentão e fruticultura: maracujá e banana. Encontram-se também na área capins de corte, para pecuária leiteira. As áreas de encosta são geralmente usadas como pastagens, ou cobertas por formações secundárias arbustivas (Corrêa e Ribeiro, 2001). Na irrigação são utilizados 4 poços públicos tipo Amazonas com ponteiras radiais e 14 cacimbões para irrigação, segundo Montenegro (1997).

Sendo uma área de assentamento, os cultivos estão distribuídos em lotes de até 1 hectare, conduzidos por pequenos agricultores.

3.3 Condutividade Hidráulica

Montenegro (1997) realizou detalhado estudo de caracterização da condutividade hidráulica da zona saturada do vale, construindo 65 piezômetros e realizando “slug test” em cada um deles.

O “slug test” consiste no acompanhamento da taxa de variação da carga hidráulica em um furo de sondagem, após uma súbita introdução ou retirada de um volume de água do aquífero. Na análise dos resultados dos “Slug tests” utilizou-se a metodologia de Hvorslev (1954), descrita em Fetter (1994). A metodologia de Hvorslev (1954) está detalhada adiante, na seção referentes a “Avaliação complementar da condutividade hidráulica”. A partir dos resultados dos testes, foi construído um modelo conceitual, As condutividades hidráulicas ao longo da fazenda, variaram de 0.097 m.d^{-1} a 125.01 m.d^{-1} , com média aritmética de 23.387 m.d^{-1} , geométrica de 4.829 m.d^{-1} e harmônica de 0.92 m.d^{-1} .

Considerando que o aluvião em estudo tem dimensão longitudinal uma ordem de grandeza superior à dimensão transversal, a condutividade hidráulica foi inserida no VisualModflow em faixas transversais, de acordo com a média dos piezômetros dispostos em cada seção.

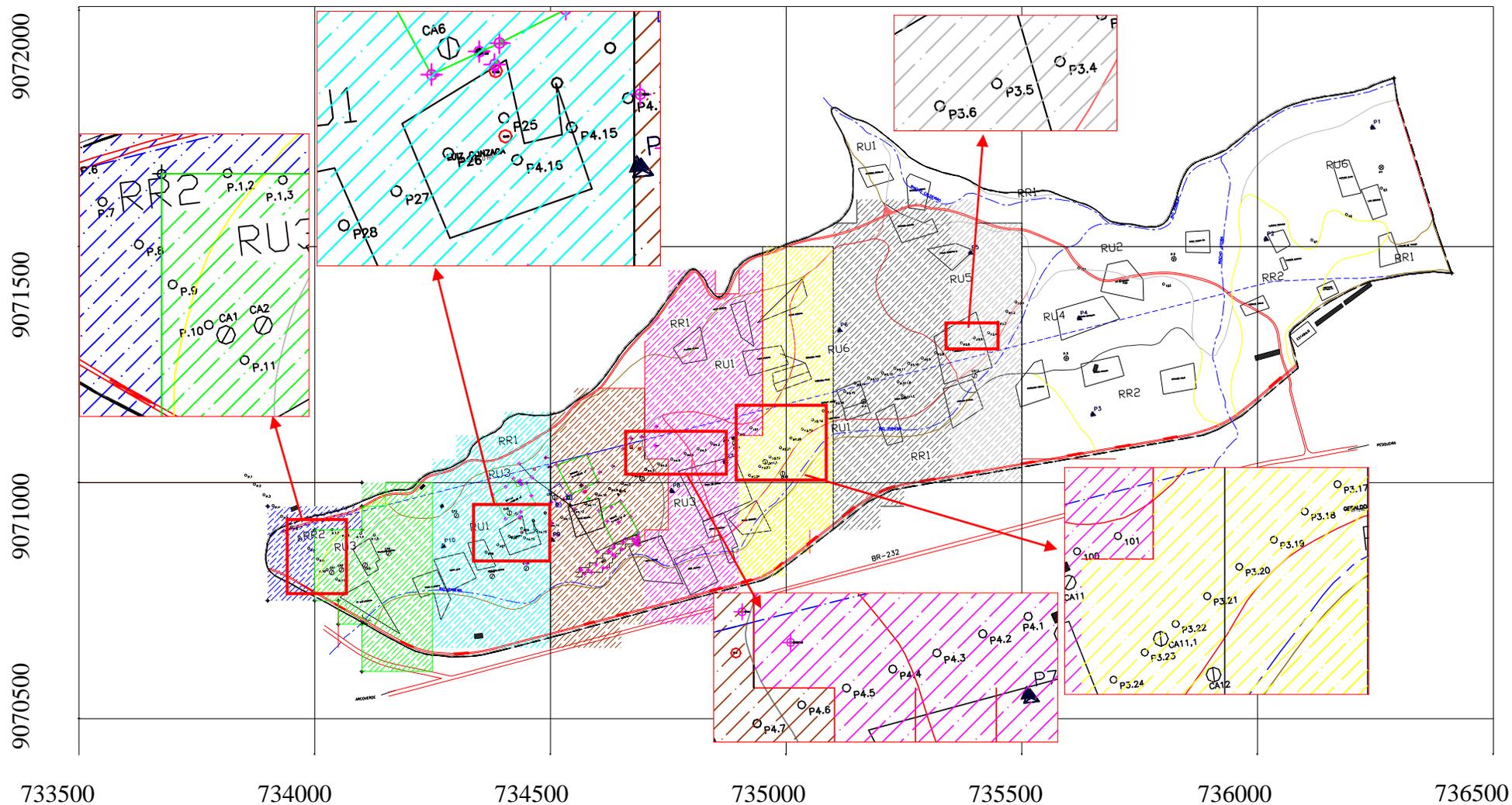


Figura 03 – Faixas de condutividade hidráulica média ao longo da Fazenda Nossa Senhora do Rosário (Região em branco com condutividade hidráulica de 1m.d^{-1}).



3.4 Instalação dos piezômetros em área experimental do aluvião

Com o objetivo de complementar a caracterização hidráulica do aquífero, particularmente no contorno do riacho que se desenvolve longitudinalmente no domínio, “slug test” foram realizados em seções da interface rio-aquífero. Primeiramente, os piezômetros foram instalados a percussão, conforme descrito em detalhes por Wright (2001).

Os piezômetros foram construídos em tubos de PVC de diâmetro 3/4”, perfurados em uma das extremidades. Previamente à sua instalação, sondagens a trado foram realizadas de modo a localizar a camada condutora arenosa para posicionamento do filtro do piezômetro (Figura 4). As fotos seguintes ilustram detalhes de instalação. O método da percussão baseia-se no choque entre o martelo e o conjunto: batedor, tubo de encamisamento, tubo de PVC e as peças conectadas no final do tubo PVC (parafuso porca e ruela), visualizados na Figura 6. O impacto aplicado ao batedor faz com que o conjunto desça até a camada de interesse que, após ser atingida, remove-se o tubo de encamisamento através de talha (figura 5) e, assim, o tubo é protegido (Figura 9).

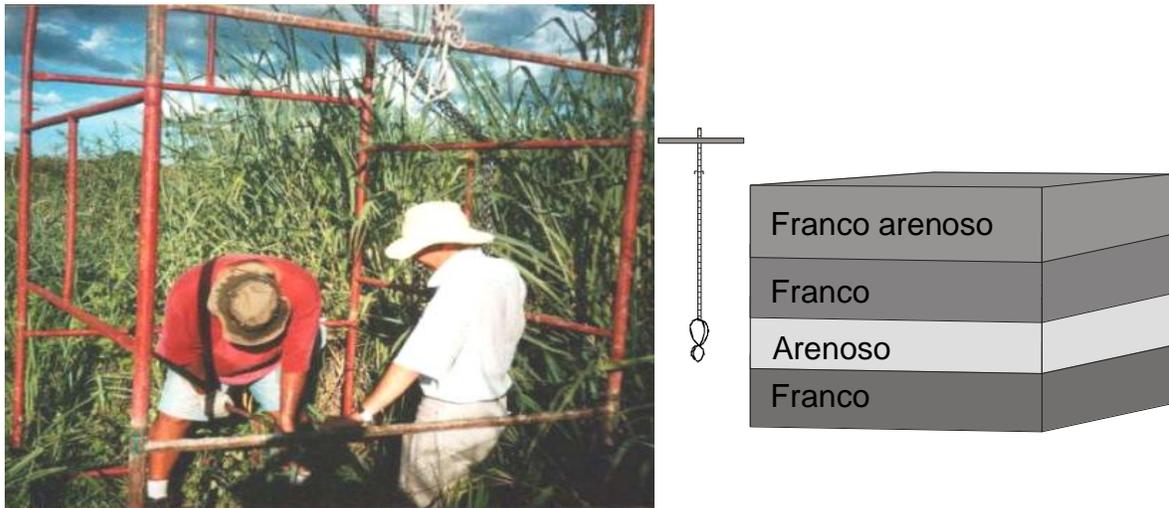


Figura 4 – Tradagem para instalação de piezômetro em detalhe, esquema de sondagem até área de condutividade hidráulica arenosa



Figura 5 – Retirada do tubo de revestimento (encamisamento).



Figura 6 – Piezômetros e tubos de ferro de encamisamento.



Figura 7 – Martelo para instalação do piezômetro por impacto.



Figura 8 – Batedor para acoplamento do martelo ao tubo de encamisamento.



Figura 9 – Piezômetro instalado e protegido.



Figura 10 – Avaliação da condutividade do piezômetro.

Em campo, os piezômetros foram dispostos em 3 seções transversais apresentadas no Anexo 2 e esquematizado na figura 11. A caracterização dos perfis granulométricos para cada locação estão representados pelo Anexo 3, realizada através de método proposto pela EMBRAPA (1997). Três deles foram instalados no próprio rio. Uma vista superior da sub-área de estudo encontra-se no Anexo 1.

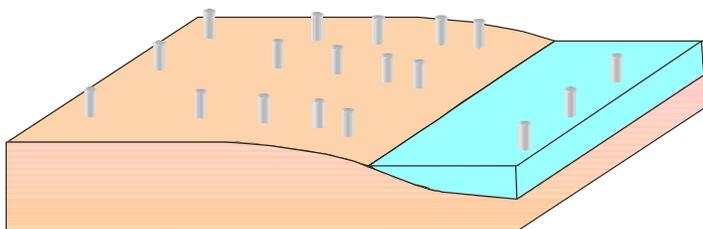


Figura 11 – Disposição de piezômetros em campo.

A Figura 12 abaixo ilustra o detalhe do piezômetro, seu encamisamento, e acessórios de percussão.

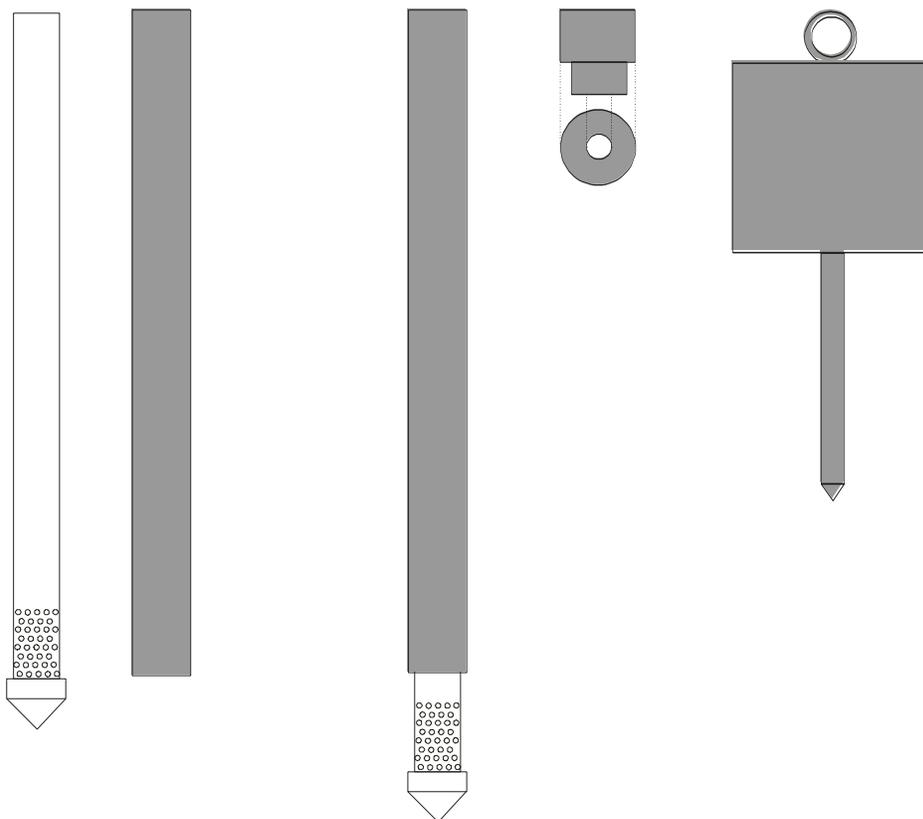


Figura 12 – Esquema do piezômetro, do tubo de encamisamento, do bate-dor e do martelo.

Na percussão, os piezômetros são encamisados com tubos de ferro no qual é acoplado na extremidade superior um batedor que serve de encaixe ao martelo.

3.5 Avaliação complementar da condutividade hidráulica

Os testes de recuperação podem ser diretos ou inversos. Ambos os tipos consistem em uma mudança instantânea do nível d'água no piezômetro onde está sendo realizado o teste através de uma retirada (teste direto) ou introdução (teste inverso) de um determinado volume de água do poço. Durante o processo de retorno ao nível d'água inicial, os valores desse nível são registrados como função do tempo. A interpretação dos registros mencionados no parágrafo anterior vai depender do Método a ser adotado: Método de Hvorslev ou Método de Bouwer e Rice. Ambos assumem que o aquífero é isotrópico e infinito.

O método utilizado na análise dos “slug test” foi o de Hvorslev (1954), o qual se baseia a seguinte equação:

$$K = \left(\frac{r^2 \ln \left(\frac{R}{r} \right)}{2L_e T_0} \right) \quad 5$$

onde:

K – condutividade hidráulica (L/T);

r – raio do envoltório do poço (L);

R – raio do scream (crivo) do poço (L);

L_e – comprimento do scream (crivo) do poço (L);

T_0 – tempo de leva para o nível da água subir ou baixar a 37% da variação inicial (T) (representa 37% de recuperação);

Neste estudo, os seguintes valores foram padronizados:

$R = r = 0,94\text{cm}$; $L_e = 13\text{cm}$

Os resultados da evolução da carga hidráulica para alguns dos testes de condutividade dos piezômetros em campo são apresentados no Anexo 4. A água foi inserida na boca do piezômetro, e assim acompanhou-se o seu rebaixamento até posição inicial. Em cada locação, três estimativas foram realizadas. A interpretação da condutividade foi realizada através do método de Hvorslev, como discutido anteriormente.

As condutividades obtidas variaram de 0.08 a 42.5 m/d⁻¹, com média aritmética de 5.43 m/d⁻¹, para um total de 15 locações estudadas.

3.6 Estimativa das vazões bombeadas nos poços e nos lotes irrigados

As taxas explotadas diariamente tanto pelos poços públicos como pelos cacimbões são bastante variáveis, tanto espacialmente quanto ao longo do ano, particularmente em função da variabilidade do tempo de irrigação adotado por cada agricultor. Hidrômetros vêm sendo instalados gradualmente na área de modo a se aferir com maior precisão os volumes explotados. Para efeito deste estudo, as explorações foram estimadas segundo critério agrônomico, considerando o consumo efetivo, de acordo com a necessidade hídrica das culturas em uso, na área de responsabilidade dos mesmos (cacimbões e poços), vinculada a cada agricultor, como mostra a tabela 4. Para elaboração desta Tabela, realizou-se cadastramento de campo e levantamento das áreas cultivadas através de GPS. O critério agrônomico está ilustrado na Figura 13.

Observa-se em campo uma diversidade de culturas que se alternam ao longo dos anos. Em geral, as culturas de ciclo longo como a bananeira ainda são cultivadas de modo localizado na Fazenda, predominando as olerícolas. Embora ocorra uma rotação de culturas no caso daquelas de ciclo curto, as necessidades hídricas por unidade de área tendem a não variar significativamente, podendo-se utilizar um coeficiente de cultura máximo para as olerícolas em geral.

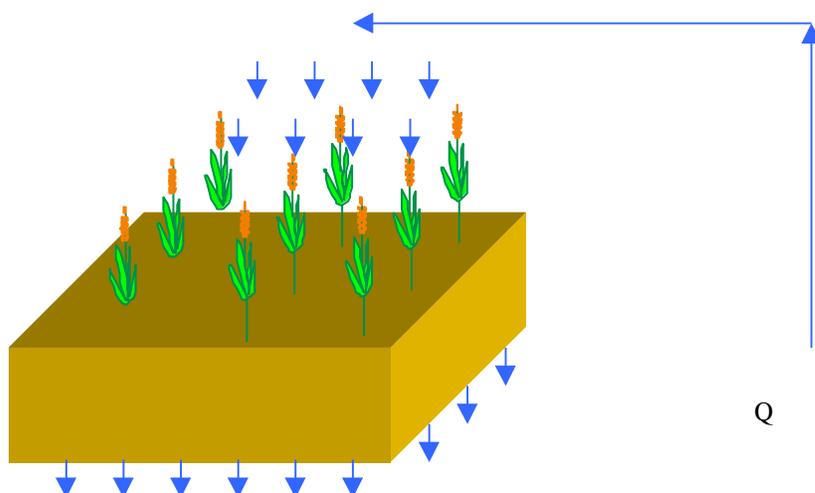


Figura 13 – Critério agrônomo assumido para estimar a taxa de bombeamento.

A avaliação do volume extraído por bombeamento foi realizada através de:

$$Q = ((EV_{\text{tanq}} \times Kt_{\text{tanq}} \times Kc_{\text{máx}}) - (ppt)) \times \text{Área} / \Delta t \quad (6)$$

onde:

Q = Vazão (L^3/T);

EV_{tanq} = evaporação do tanque (L);

Kt_{tanq} = Coeficiente de tanque (L^0);

$Kc_{\text{máx}}$ = Coeficiente de cultura máximo durante seu período de desenvolvimento (L^0);

ppt = precipitação (L);

Área = área de responsabilidade do cacimbão (L^2);

Δt = intervalo de tempo (T).

Alguns valores característicos de vazão para os lotes estão apresentados na Tabela 4, de uso e ocupação do solo.

Tabela 04 Vazão para lotes irrigados para os principais cultivos da Fazenda.

Cacimbão	Cultura	Kc máximo	Q média m ³ .h ⁻¹	Q máxima m ³ .h ⁻¹
CA1	Pimenta	0.95	12.64	26.26
CA2	Banana	1.25	9.94	20.92
CA3	Cenoura/Pimentão	1	10.89	22.66
CA4	Pimentão	0.95	12.33	25.60
CA5	Repolho	1	6.72	13.96
CA6	Banana	1.25	15.17	30.51
CA8	Tomate	1.05	13.39	27.39
CA10	Banana	1.25	15.86	32.42
CA 16	Pinha	1.25	9.37	20.00
CA 19	Repolho	1.05	9.07	18.54
CA 21	Tomate	1.05	13.07	28.53
CA 17	Cenoura	1.05	19.76	43.35
CA9	Jerimum	1.05	7.84	16.04
CA20	Banana	1.25	30.23	63.65
CA22	Banana	1.25	19.28	40.60
CA13	Banana	1.25	25.69	54.10
P4	Tomate	1.05	57.52	117.62
P3	Beterraba	1.05	20.92	42.77
P2	Banana	1.25	84.64	178.22
P1	Goiaba	1.25	48.97	101.84
CA24	Cenoura	1.05	11.38	23.42

3.7 Monitoramento do aquífero

Parte do monitoramento foi realizado através de poços de observação instalados segundo metodologia apresentada por Montenegro (1997), que consiste na escavação de um poço a uma profundidade pré-determinada, que ultrapasse o lençol freático. Tais poços são preenchidos parcialmente por cascalho onde se introduzem tubos perfurados. O espaço vazio em torno do tubo é novamente preenchido com o mesmo material removido do furo de sondagem. Os poços de observação fornecem dados confiáveis da profundidade do lençol freático, desde que haja ausência de semi-confinamento.

As linhas potenciométricas do aquífero foram avaliadas através de piezômetros e poços de observação distribuídos ao longo da área. As leituras de níveis foram realizados por método expedito, onde uma trena é lançada com um

peso em sua extremidade inferior (chumbo) que, ao tocar no nível da água, emite um som. Prático e barato, este método exige atenção e rigor. Certos cuidados devem ser tomados, como desgaste da trena ao peso e sua deformação, podendo gerar variação na leitura do nível de água.

3.8 Modelo conceitual na área geral

Com os objetivos definidos, procurou-se estabelecer a idealização dos dados do local para possibilitar uma solução prática ajustando a geometria do sistema com suas camadas geológicas, contorno e interconexões como discutido por Cabral e Demétrio (1997). Com a análise de campo, estabeleceu-se as propriedades do solo, definição do número de camadas, estimativa de recarga e evapotranspiração. A partir de dados prévios do aquífero desde 1995, determinou-se as condições piezométricas iniciais. Diante do exposto seguiu-se os passos:

- **Construção da malha**

Para representar a área de estudo, foi construído no Visual Modflow um paralelepípedo dividido em três camadas, representadas por uma malha regular de 50m x 50m (cada), gerando 2100 células, a partir de coordenadas de um mapa cartográfico da região. Devido à geometria local, a malha foi refinada para melhor reproduzir seus limites como mostra a Figura 14. As células desativadas ao redor da área de estudo estão em verde. As células funcionais restantes que representam a fazenda permaneceram ativadas.

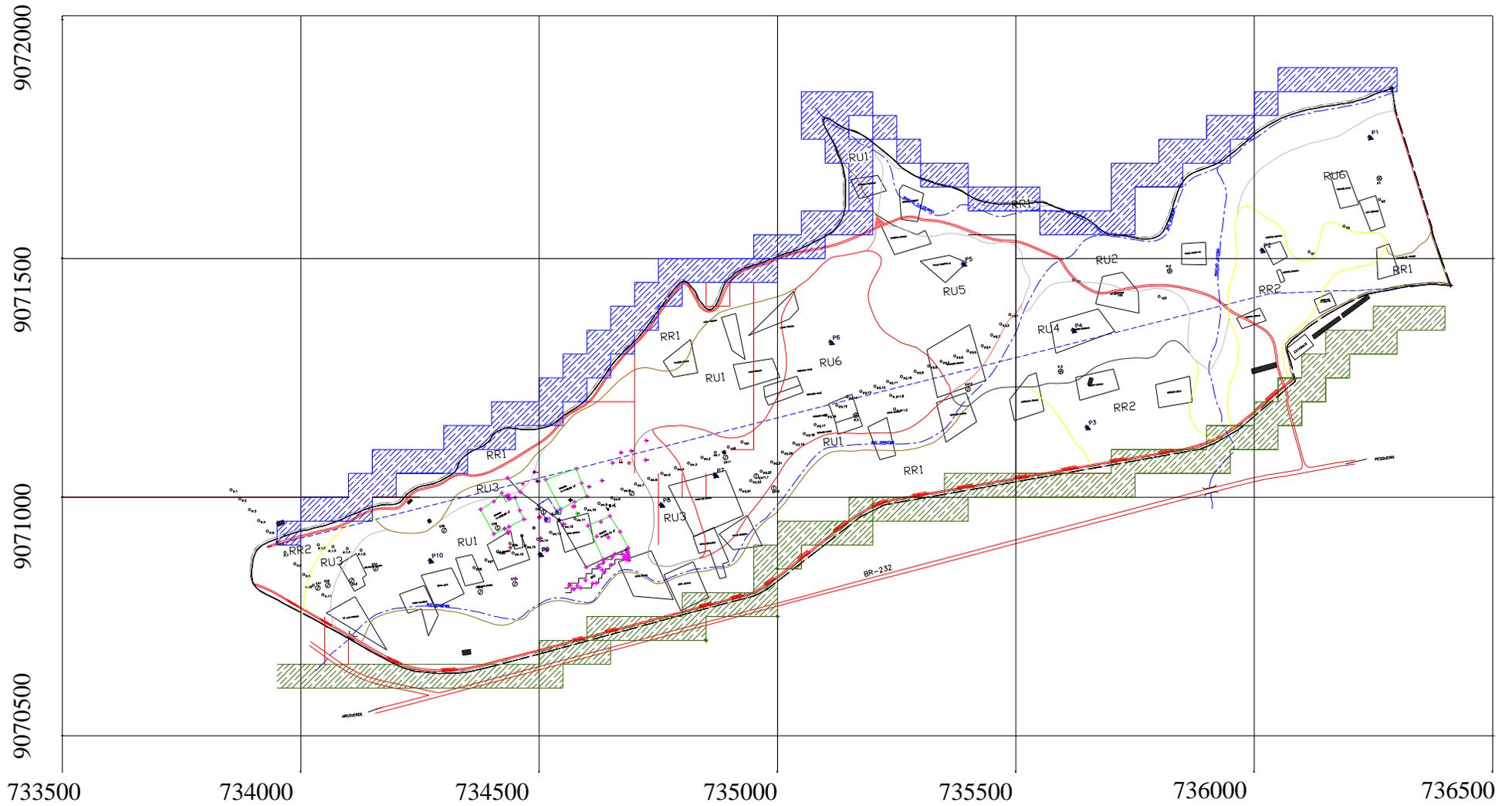


Figura 14 – Vista do vale da Fazenda, faixa azul e verde representam recarga lateral

 Faixa de recarga lateral Norte

 Faixa de recarga lateral Sul

• Recarga Lateral

Como condição de recarga lateral, foi adotada uma recarga adicional apresentada nas Tabelas 5 e 6, provenientes dos morros zona de influência da Bacia do Ipanema e Jatobá a Norte e a Sul, respectivamente, como fonte de contribuição à recarga total. Assumiu-se que esta entra no aquífero ao longo da interface entre o embasamento aflorante e o vale. Como critério de calibragem da modelagem assumiu-se que 10% de toda área das bacias laterais serve de volume de recarga ao aquífero, conforme sugere Guiguer (2001).

Tabela 05 Estimativa para recarga adicional aplicada ao aquífero nos limites Norte e Sul.

	Km ²	Nº células	Esp cel	esp cel	área faixa	10% área total
Norte	49.79*	72	50	50	180000	4979000
Sul	13.7**	64	50	50	160000	1370000

Esp cel – espaçamento da célula

*Área da Bacia do Ipanema (Norte)

** Área da Bacia do Jatobá (Sul)

Os dez por cento da área das bacias Ipanema e Jatobá estão representados pelas células da figura 14, em azul e verde, respectivamente.

Tabela 6a Recarga adicional do Limite Norte

Mês	Dia Inicial	Dia Final	ppt total (m)	25% ppt (m)	Rec extra (m)
01/Abr/96	276	306	0.1816	0.00151	0.042
01/Mai/96	306	337	0.1657	0.00134	0.037
29/Dez/99	1643	1669	0.1423	0.00137	0.038
24/Jan/00	1669	1690	0.1340	0.00160	0.044
14/Fev/00	1690	1727	0.0710	0.00048	0.013
22/Mar/00	1727	1751	0.0770	0.00080	0.022
15/Abr/00	1751	1781	0.0834	0.00069	0.019
15/Jan/01	2026	2057	0.0850	0.00069	0.019
15/Abr/01	2116	2146	0.0770	0.00064	0.018
15/Dez/01	2360	2391	0.1600	0.00129	0.036
15/Jan/02	2391	2422	0.1285	0.00104	0.029

Tabela 6b Recarga adicional do Limite Sul

Mês	Dia Inicial	Dia Final	ppt total (m)	25% ppt (m)	Rec extra (m)
01/Abr/96	276	306	0.1816	0.00151	0.013
01/Mai/96	306	337	0.1657	0.00134	0.011
29/Dez/99	1643	1669	0.1423	0.00137	0.012
24/Jan/00	1669	1690	0.134	0.00160	0.014
14/Fev/00	1690	1727	0.071	0.00048	0.004
22/Mar/00	1727	1751	0.077	0.00080	0.007
15/Abr/00	1751	1781	0.08314	0.00069	0.006
15/Jan/01	2026	2057	0.085	0.00069	0.006
15/Abr/01	2116	2146	0.077	0.00064	0.005
15/Dez/01	2360	2391	0.16	0.00129	0.011
15/Jan/02	2391	2422	0.1285	0.00104	0.009

ppt total – precipitação total ocorrida no mês de recargas efetivas,.

25% ppt – 25% da precipitação total ocorrida no mês

Rec extra – recarga extra calculada

- **Carga variável (General Head Boundary)**

Para os contornos de oeste e leste, estabeleceu-se condição de carga variável, tendo como referências os piezômetros mais próximos destes bordos. A variação de carga hidráulica do piezômetro 8 foi referência para o contorno oeste, enquanto e a variação de carga hidráulica do piezômetro 6.3 para o contorno leste.

- **Crítérios para fluxos difusos na superfície**

Adotou-se fator de 25% para a recarga direta oriunda da precipitação pluviométrica, assumindo-se que a irrigação não gerava recarga. No tocante à evaporação do lençol, utilizou-se um fator de 20% da evapotranspiração potencial da região.

Para inserir os limites de Fazenda Nossa Senhora do Rosário, utilizou-se mapa cartográfico da região, digitalizado e, importado ao Visual Modflow após construção da malha. A topografia de campo foi digitalizada e também introduzida no modelo conceitual.

3.9 Simulações de fluxos subterrâneos a partir de modelo computacional

Para avaliar o comportamento do aquífero em função do consumo para irrigação, realizou-se simulações computacionais, considerando os lotes da figura 14, visando gerar subsídios para o gerenciamento de tais recursos hídricos.

Posteriormente à simulação na área do aluvião, isolou-se a região onde se realizou a caracterização hidráulica complementar (sub área complementar). Dentre as condições de contorno adotadas, destaca-se a inclusão do riacho como contorno de carga especificada. As simulações foram desenvolvidas no final da estação chuvosa de 2002, durante o período de recessão do riacho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fazenda Nossa Senhora do Rosário por se encontrar em um vale aluvial, recebe contribuição das bacias hidrográficas circunvizinhas, que mantém anualmente seu aporte hídrico subterrâneo. Tais aportes mostraram-se essenciais para o sucesso das simulações, as quais foram desenvolvidas de acordo com o modelo conceitual construído, a partir das medições de campo de condutividade hidráulica. Outrossim, deve-se comentar que os critérios agronômicos adotados para estimativa dos bombeamentos não comprometeram a qualidade dos ajustes.

A seguir, são apresentados os principais resultados das simulações numéricas, tanto na escala do vale, quanto na escala local da sub-área estudada.

4.1 Flutuação observada do lençol freático

Verificou-se nesse estudo que, embora exista anualmente um longo período de estiagem, superior a 6 meses, as precipitações concentradas durante os meses mais chuvosos conseguem recuperar o nível freático, garantindo a sustentabilidade quantitativa do aquífero.

Na simulação com irrigação, adotando critério agronômico, na condição de bombeamento atual, considerando o uso consuntivo de acordo com a necessidade hídrica das culturas, não produziu rebaixamento significativo que compromettesse a piezometria do aluvião, concordando com (Vieira, 2002), que propõe para definição de demandas à irrigação deve-se levar em conta alguns fatores tais como, tipos de culturas normalmente praticadas e o uso consuntivo das plantas. Desta forma deve-se respeitar tais taxas de exploração, uma vez que foi verificado por Cabral e Loureiro (2002), que o uso intenso da água subterrânea pode comprometer ou inviabilizar a capacidade hídrica de um aquífero.

Para início das simulações ($t=0$), foi tomado como referência o dia 1 de julho de 1995. As leituras de campo do nível d' água dos piezômetros ao longo da área seguiram sistemática mensal, com algumas falhas ao final do ano de 1997 as simulação foram conduzidas até 15 de dezembro de 2002.

As Figuras 15 a 20 apresentam a flutuação do lençol freático em função do tempo. De uma forma geral, a tendência do movimento da subterrâneo segue a pendente topográfica, a partir dos piezômetros 8, 9, 10 e 11 aos piezômetros 5.1, 5.2 e 5.3.

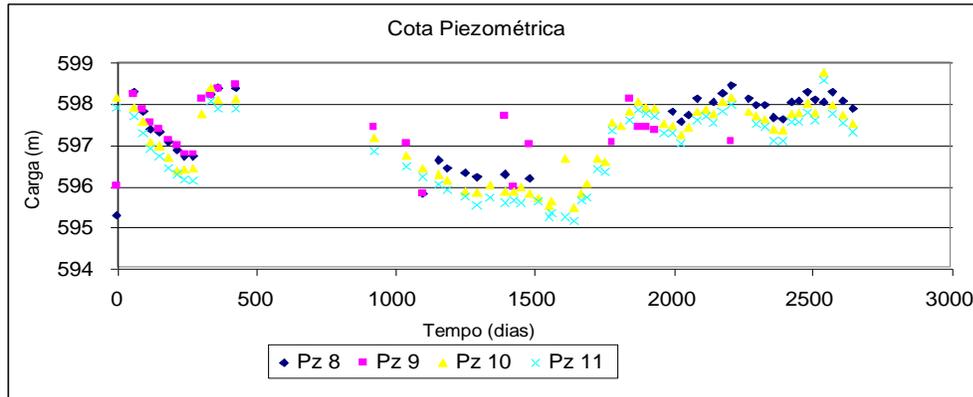


Figura 15 - Cota do nível d'água nos piezômetros localizados no contorno de montante da área.

A Figura 15 corresponde aos piezômetros na primeira faixa (verde) a montante da fazenda. Verifica-se que, para o dia 0 (zero), os piezômetros Pz 8 e Pz 9 estão com cota piezométrica abaixo da do esperado em relação aos piezômetros Pz 10 e Pz 11, indicando um possível erro de leitura em campo. Tais valores foram corrigidos para efeito de simulação. É importante notar que existe uma ausência de dados de setembro de 1996 (dia 429) a novembro de 1997 (dia 885), devido a problemas operacionais nas leituras.

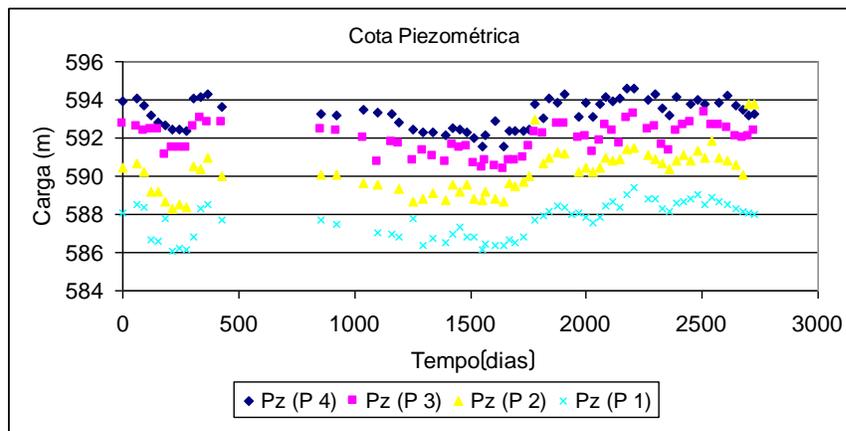


Figura 16 – Cotas do nível d' água nos piezômetros associados aos poços públicos.

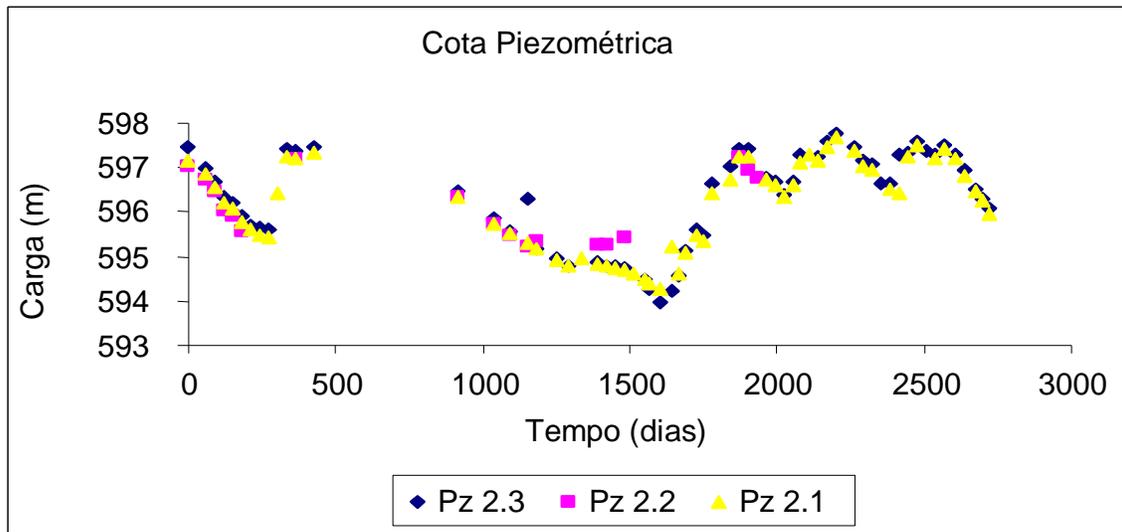


Figura 17 – Cotas do nível d' água nos piezômetros imediatamente a montante da sub-área estudada.

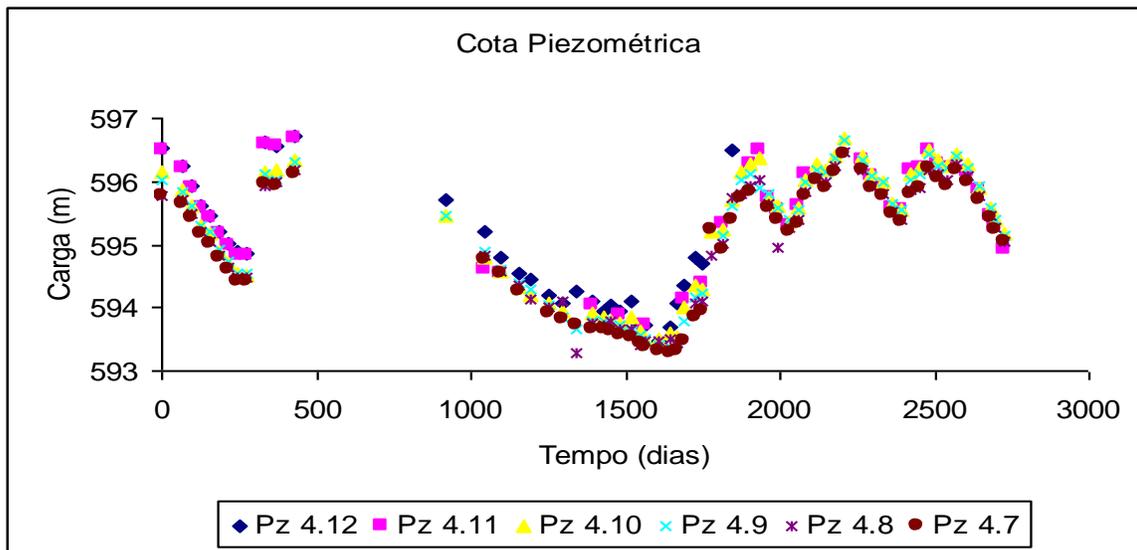


Figura 18 – Cotas do nível d' água nos piezômetros imediatamente a jusante da sub-área estudada.

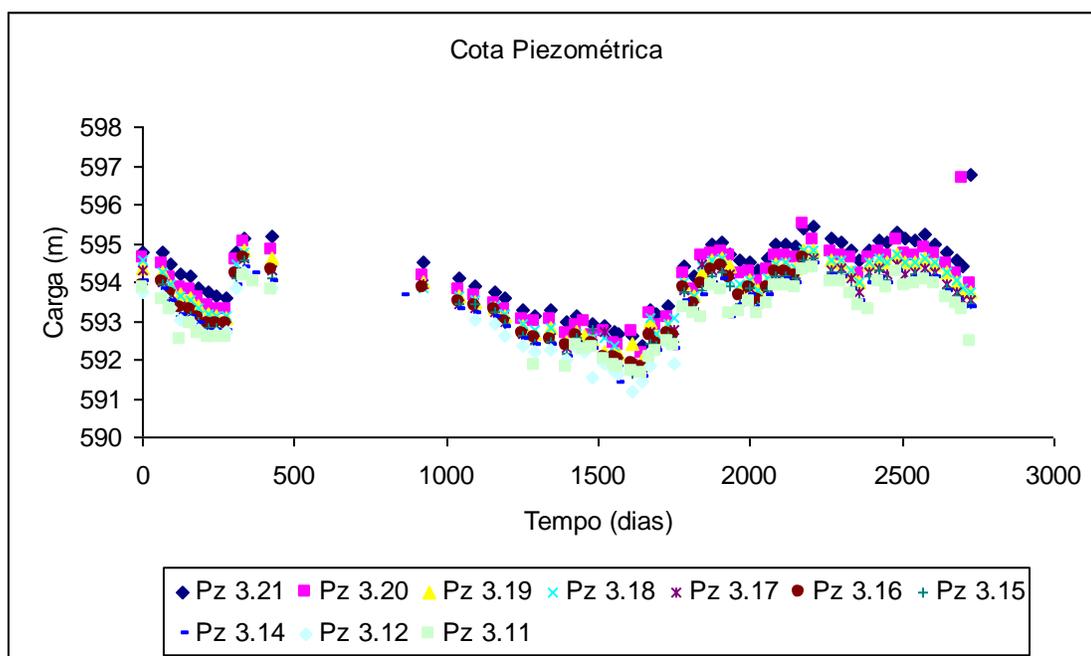


Figura 19 – Cotas do nível d' água nos piezômetros a jusante da sub-área estudada.

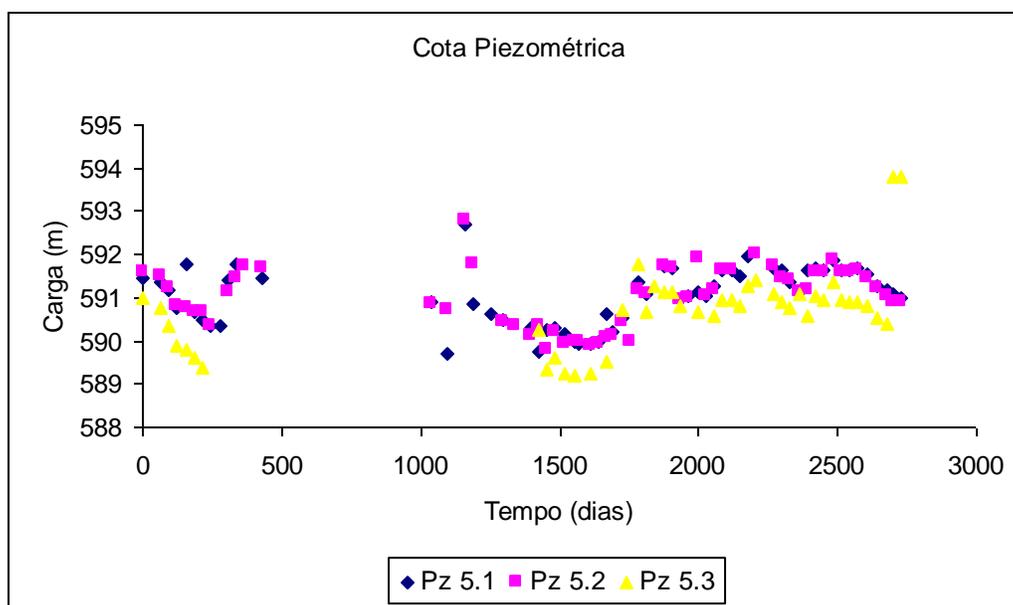


Figura 20 – Cotas do nível d' água nos piezômetros próximos ao contorno de jusante do aluvião.

O comportamento do lençol freático sob o efeito de recarga e variação de nível é semelhante ao longo da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, respondendo hidrológicamente a eventos de precipitação, tanto por recarga distribuída direta, quanto pela contribuição a nível de bacia hidrográfica.

4.2 Simulação Computacional

O modelo VisualModflow mostrou-se eficaz nas simulações de campo, para o modelo conceitual adotado, já discutido no capítulo anterior.

A calibração foi desenvolvida apenas sobre o armazenamento, considerando-se as taxas de recarga já apresentadas, observando-se mais rigorosamente os tempos de simulação até o dia 1500. Tempos posteriores a 1500 dias devem ser considerados como fase de validação do modelo. Ressalte-se que as condutividades hidráulicas foram mantidas conforme medições de campo.

Os parâmetros hidrogeológicos da área de estudo são fundamentais na calibração do Visual modflow (Manoel Filho & Castro 2002). A Tabela 7 resume os principais parâmetros físicos adotados ou ajustados por calibração.

Tabela 7 – Parâmetros físicos considerados e seus valores.

Parâmetro	Valor	Unidade
Condutividade hidráulica geral	1	m.d ⁻¹
Porosidade efetiva	0.3	-
Coeficiente de armazenamento	0.3	-
Espessura da camada saturada h	10	m
Armazenamento específico Ss (Ss = S/h)	0.03	1.m ⁻¹

As Figuras 21 a 27 apresentam as cargas medidas e simuladas em função do tempo, e ao longo do vale aluvial. Cada faixa de variação de condutividade hidráulica, estar representada a seguir por piezômetros representativos para visualização da simulação.

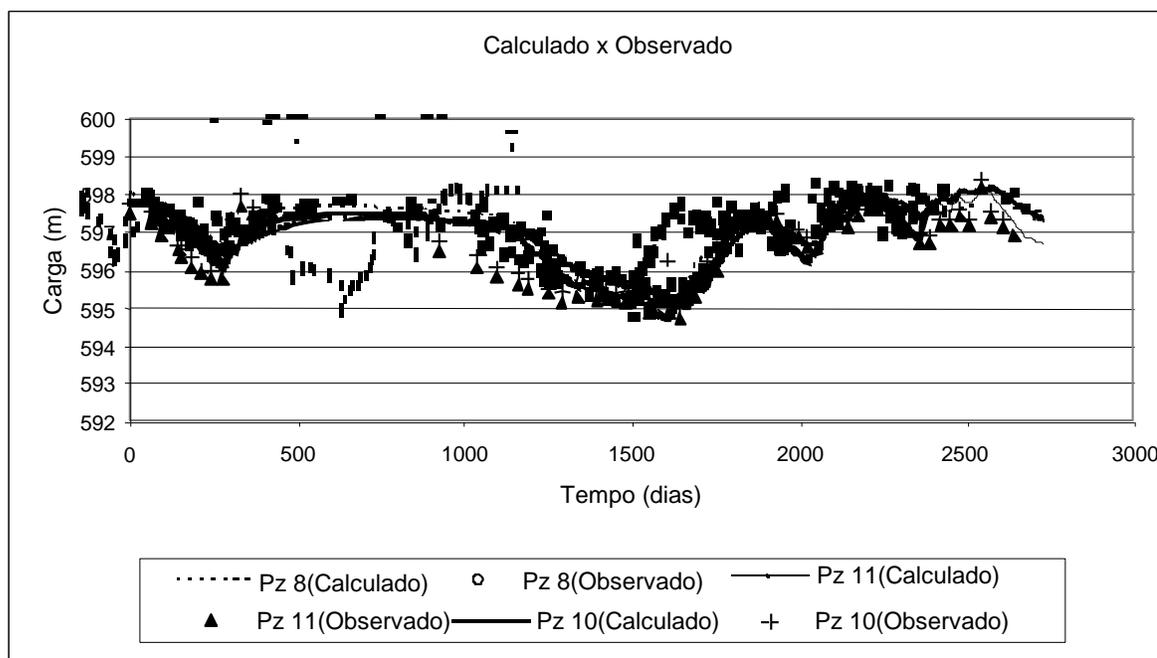


Figura 21 – Cota das cargas simuladas e observadas no contorno de montante do aluvião.

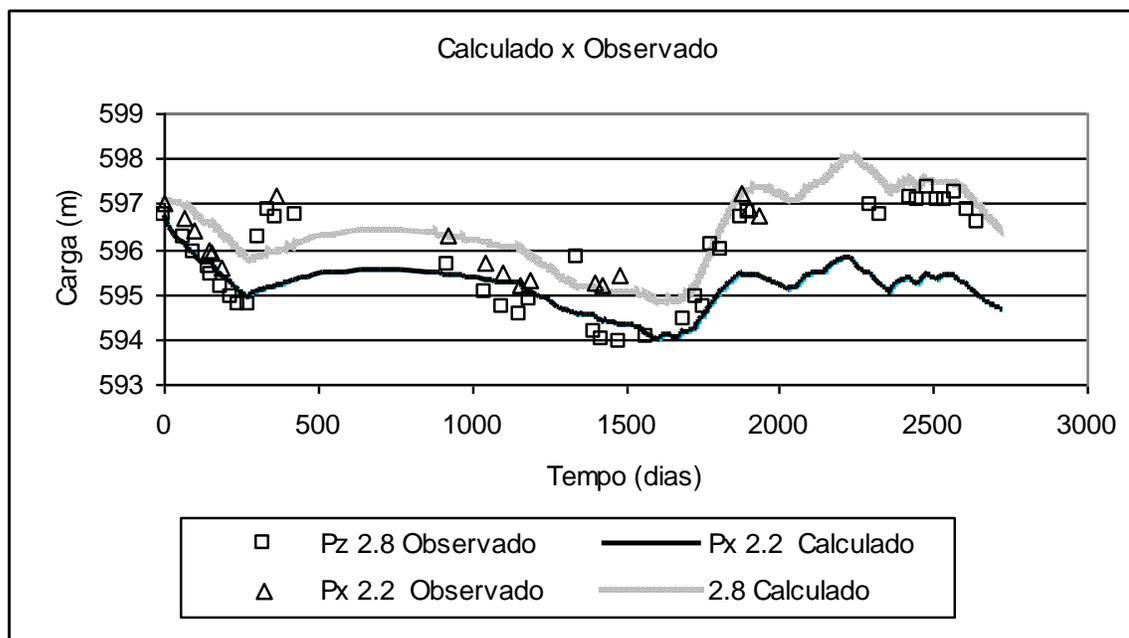


Figura 22 – Cota das cargas simuladas e observadas imediatamente a montante da sub-área estudada.

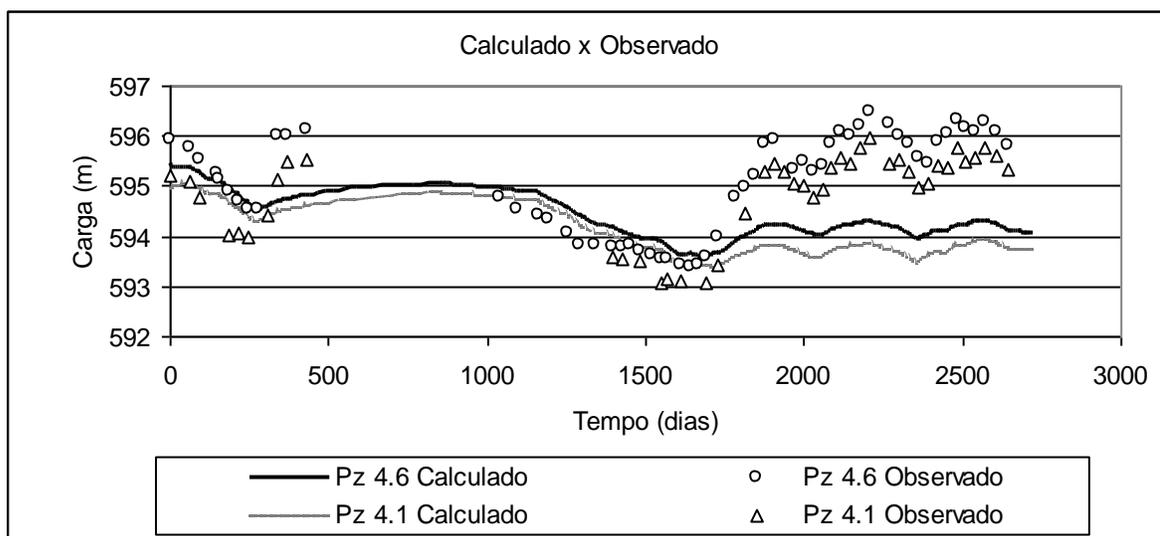


Figura 23 – Cota das cargas simuladas e observadas imediatamente a jusante da sub-área estudada.

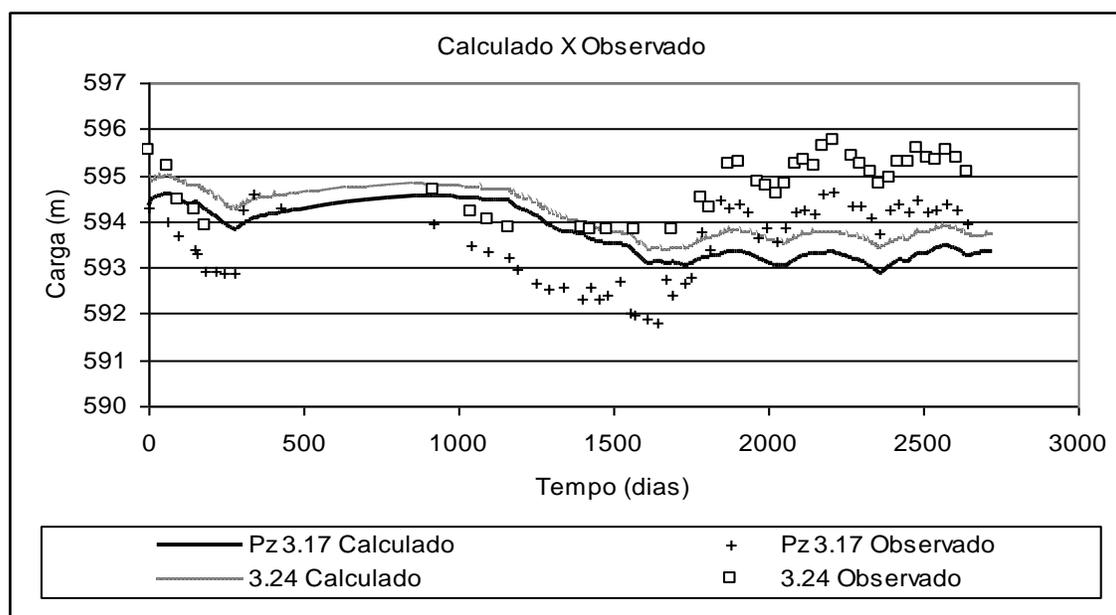


Figura 24 – Cota das cargas simuladas e observadas a jusante da sub-área estudada.

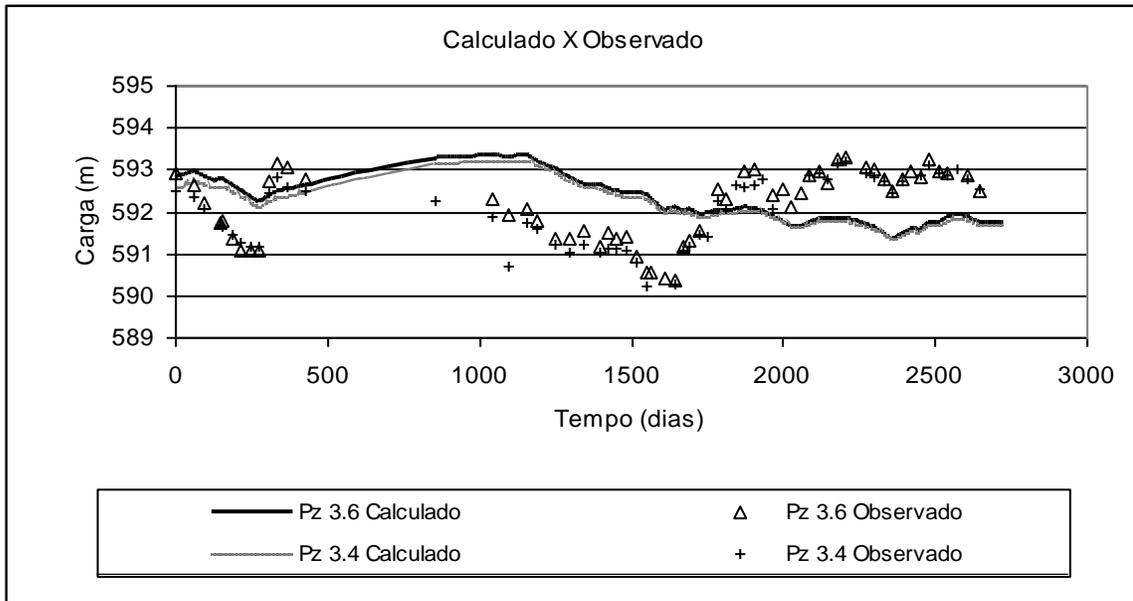


Figura 25 – Cota das cargas simuladas e observadas a jusante da sub-área estudada.

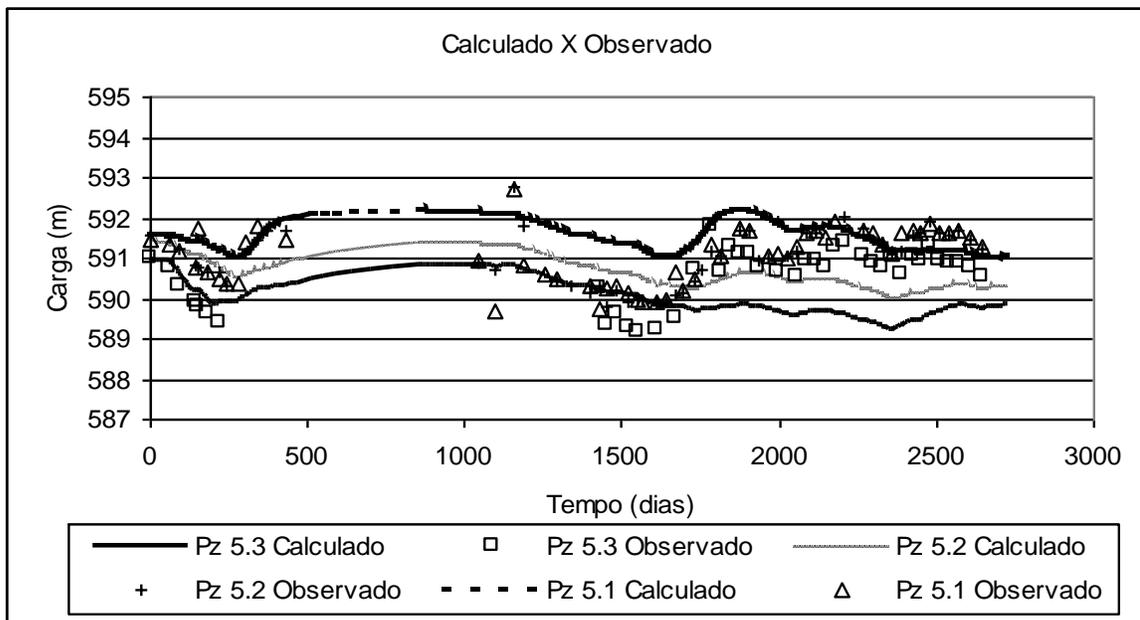


Figura 26 – Cota das cargas simuladas e observadas próximas ao contorno de jusante do aluvião.

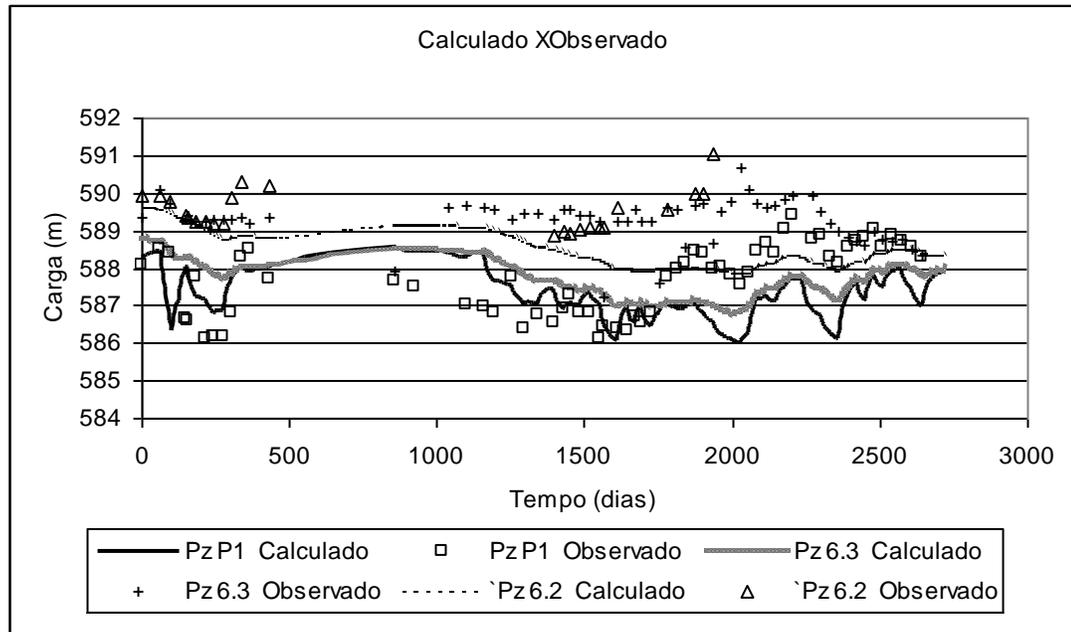


Figura 27 – Cota das cargas simuladas e observadas no contorno de jusante do aluvião.

A Figura 22 apresenta os resultados dos piezômetros 2.8 e 2.2. A calibração do piezômetros 2.8, localizado na faixa azul claro do aluvião, apresentada em Materiais e Métodos (Figura 3), foi semelhante para os piezômetros mais a montante (8 faixa azul, 10 e 11 faixa verde), mostrados na figura 21, existindo uma tendência do modelo subestimar as cargas a partir do dia 1600, A confiabilidade nos dados coletados em campo permite gerar resultados calculados próximos do observado (Monteiro, 2000).

A Figura 23 (PZ 4.1 e 4.3) apresenta os resultados dos piezômetros localizados na faixa violeta do aluvião, localizados próximos à parte central do aquífero. Nota-se certa de discrepância entre a simulação e as medições, a partir do dia 1600, tendo ocorrido subestimativa das cargas simuladas, embora se note uma mesma tendência de flutuação. Para este caso pode estar ocorrendo uma contribuição subterrânea de água, possivelmente oriunda do rio, e não computada no modelo.

A Figura 24 (Pz 3.17 a 3.24) exhibe o comportamento dos piezômetros localizados na faixa ouro, onde se verifica um comportamento interessante, e similar ao da Figura 23. As simulações, em termos médios, refletem a sazonalidade do aquífero, porém tendem a superestimar cargas na recessão, e a subestimar cargas no período de recuperação dos níveis.

Semelhante comportamento pode ser observado na Figura 25 (Pz 3.1 a 3.6), a jusante dos piezômetros (Pz 3.17 a 3.24), faixa cinza escuro. Os valores calculados entre os dias 1000 e 1600 apresentaram-se acima dos medidos. O modelo considerou uma recarga gradual maior que o medido, suavizando e aproximando a carga calculada da observada durante o período de 1700 a 2750 dias.

Os piezômetros 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam variação suave dos níveis piezométricos (Figura 26), localizados a jusante da área, entre dois importantes cursos de água, o rio Ipanema e riacho Jatobá, sugerindo importante contribuição destes dois cursos de água na manutenção dos níveis d'água.

Para os piezômetros localizados no contorno de jusante da Fazenda, como é o caso dos Pz 6.1 e 6.2), apresentados na Figura 27, verifica-se maior dinâmica do piezômetro P1, por se situar próximo a importante poço público e atender um grande número de agricultores e extensa área de irrigação (área comunitária da Fazenda). Novamente, deve-se ressaltar que as flutuações produzidas pelas simulações são similares às observadas, embora haja uma subestimativa de cargas simuladas

4.3 Simulação em área específica

As Figuras 28 a 30 apresentam o resultado da simulação realizada em sub-área específica, composta por três seções transversais, na qual procurou-se

avaliar o comportamento da interface riacho-aquífero. Segundo os dados coletados em campo, durante o período de estudo (final da estação chuvosa), o riacho foi fonte de recarga ao aquífero, as figuras 31, 32 e 33 apresentam as secções transversais da subárea de estudo no dia 12 de outubro de 2002.

As cargas simuladas são coerentes com as observadas, embora certa discrepância tenha ocorrido a partir do dia de simulação 20. Neste momento, foi considerada recarga de origem pluviométrica, para efeito de simulação, gerando uma elevação na potenciometria modelada. Um possível explicação para a discrepância mencionada pode estar na variabilidade espacial da chuva, a qual foi observada em pluviômetro a cerca de 1km de distância. Desse modo, poder-se-ia levantar a hipótese de tal precipitação não ter efetivamente ocorrido na sub-área detalhada, mas sim nas porções mais a jusante do aluvião.

Pode-se notar, através da comparação entre resultados simulados e medidos, o importante efeito regulador do riacho nos níveis do lençol freático. Os resultados para a sub-área validam os valores de armazenamento calibrados.

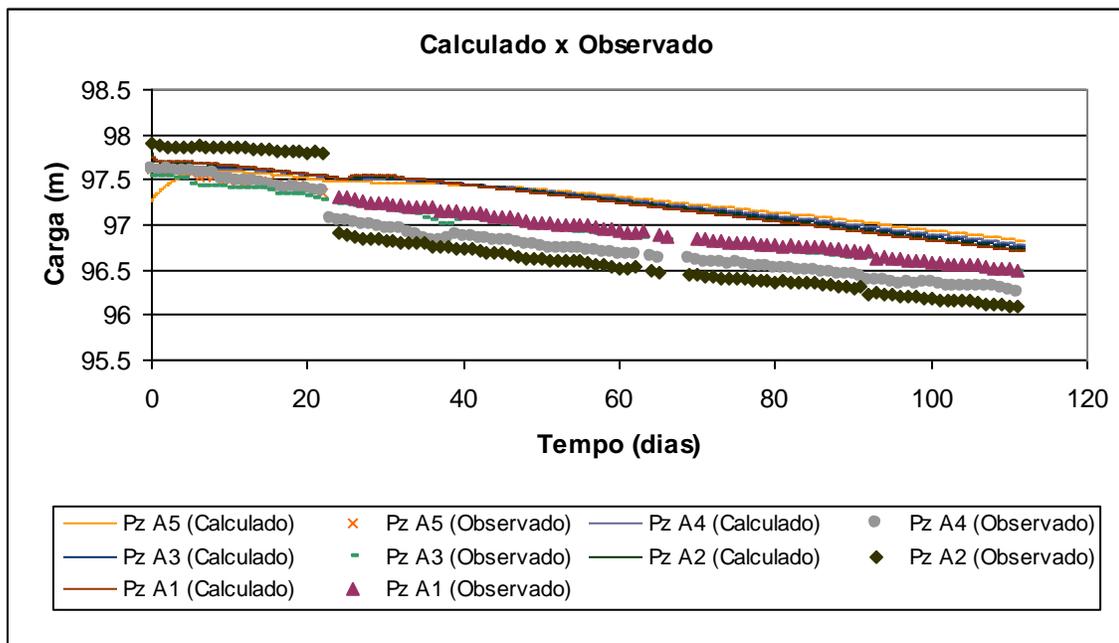


Figura 28 – Evolução temporal da recessão na sub-área- Seção transversal “A”.

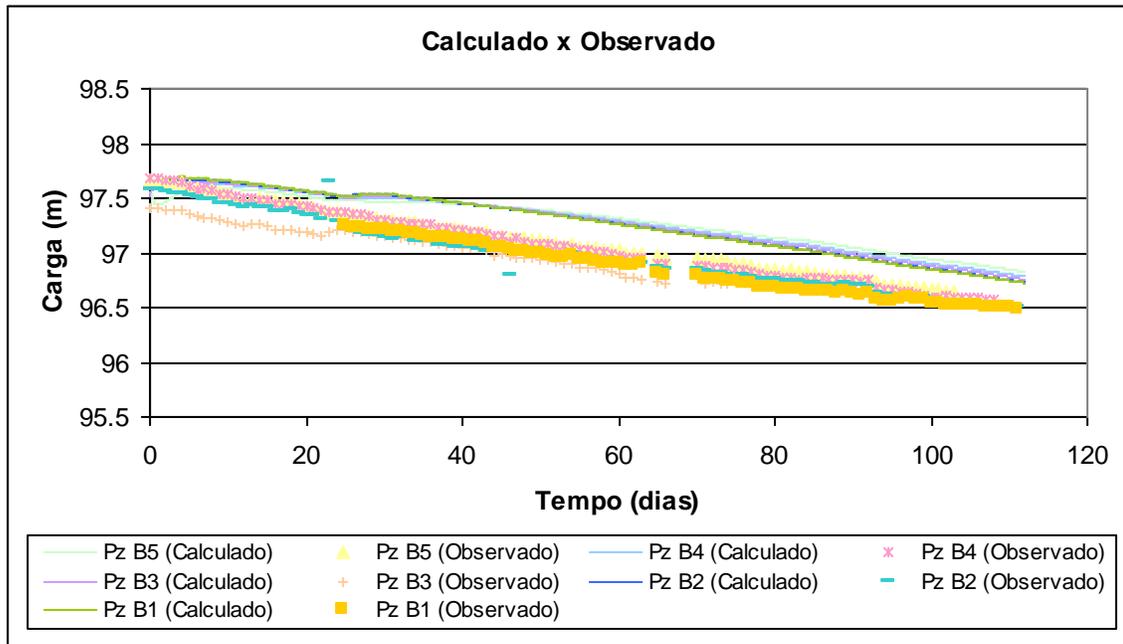


Figura 29 – Evolução temporal da recessão na sub-área- Seção transversal “B”.

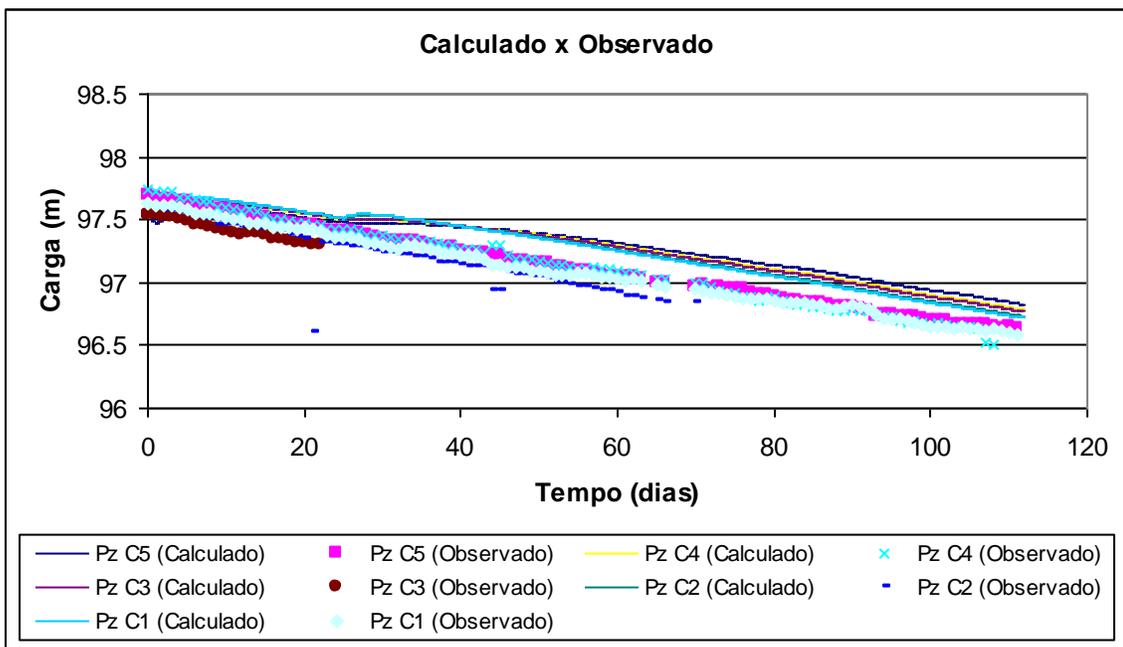


Figura 30 – Evolução temporal da recessão na sub-área- Seção transversal “C”.

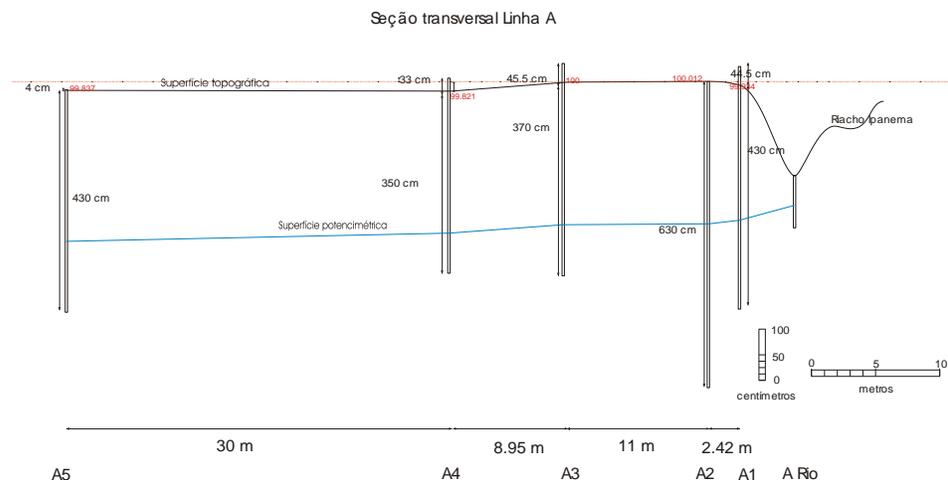


Figura 31 – Seção transversal “A” mais a jusante da subárea de estudo

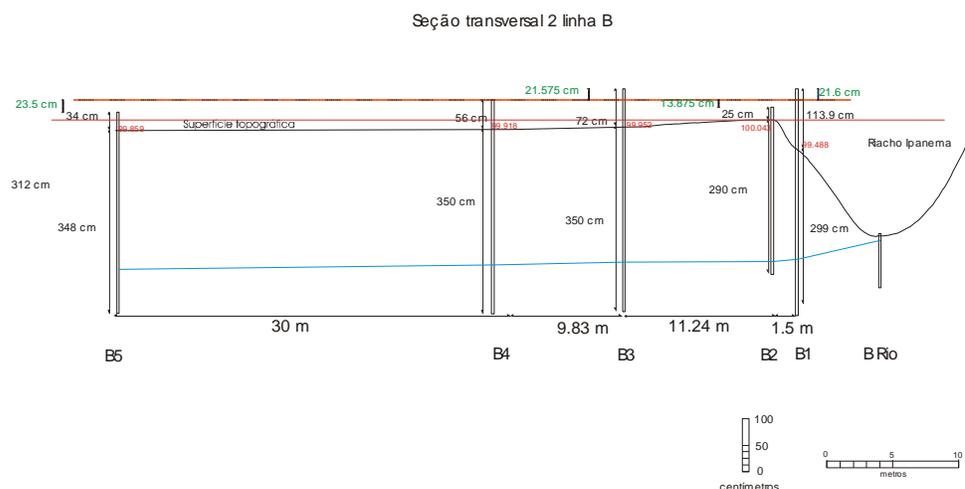


Figura 32 – Seção transversal “B” central da subárea de estudo

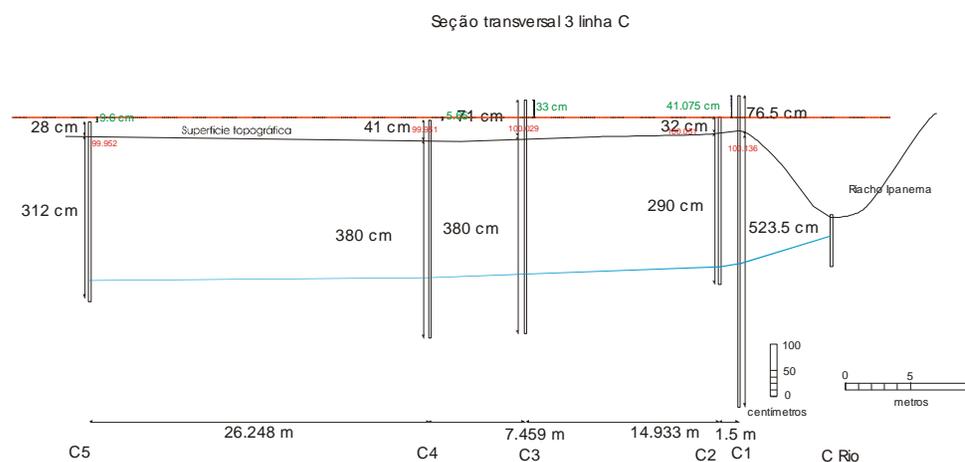


Figura 33 – Seção transversal “C” mais a montante da subárea de estudo

5. CONCLUSÕES

- A contribuição hídrica da bacia hidrográfica tem essencial importância na recuperação dos níveis potenciométricos do aluvião;
- riacho que se desenvolve ao longo do aluvião desempenha função reguladora dos níveis hidráulicos, funcionando como dreno durante a estação seca e como fonte de recarga durante a estação chuvosa;
- Os agricultores assentados na Fazenda Nossa Senhora do Rosário vêm aplicando lâminas de irrigação próximas à demanda evapotranspirométrica das culturas;
- Durante o período de estudo foi possível observar que existe uma tendência natural do fluxo se processar no sentido da pendente topográfica que está orientado de oeste a leste;
- Na condição atual de bombeamento baseado no uso da cultura segundo critério agrônomico, no qual se considerou o uso consultivo, de acordo com a necessidade hídrica das culturas, na área não houve rebaixamento significativo que comprometesse o aporte hídrico subterrâneo;
- Os piezômetros localizados a montante do aquífero apresentaram resultados de carga observada em campo consistentes com as cargas simuladas pelo modelo. Na parte central, as simulações, em termos médios, refletem a sazonalidade do aquífero, existindo uma tendência de superestimar cargas na recessão, e a subestimar cargas no período de recuperação dos níveis. Para os piezômetros de jusante as cargas simuladas e observadas tendem a se aproximar;
- modelo VisualModflow apresentou desempenho satisfatório na calibração dos dados, ajustando-se aos parâmetros físicos adotados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLACKBURN, D. N. **Efeito da drenagem subterrânea no balanço hidrossalino de um neossolo flúvico irrigado em Pesqueira/PE.** 2002. 108 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós graduação em Agronomia-Ciência do solo. Departamento de Agronomia, UFRPE, Recife, 2002.

CABRAL, A. T.; LOUREIRO C. de O. **Modelamento hidrogeológico do aquífero aluvionário de Amaro Lanari – vale do aço – MG.** In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2002. 1 CD-ROM.

CABRAL, J. J da S. P.; DEMÉTRIO, J. G. A. **Aplicação de modelos em Hidrogeologia.** In: Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. p. 367 - 389.

CABRAL, J. J. **Movimento das águas subterrânea.** In: Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. p. 35 - 51.

CARVALHO FILHO, A. de C.; COSTA S. D. S. **Análise de sensibilidade para o parâmetro condutância na condição de contorno de tipo 3 do modelo modflow.** In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2002, Florianópolis, 2002. 1CD- ROM.

CLEARY, R. W. **Qualidade da água subterrânea.** In: Hidrologia Ambiental. São Paulo: Ed da Universidade de São Paulo, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991. p. 211 - 296.

CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R. **Levantamento detalhado de solos da fazenda Nossa Senhora do Rosário, UFRPE/UFPE/CNPq/BNB , Recife, 2001. 35p.**

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Rio de Janeiro, 1997, 212p.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology.** Third Edition. New York: Macmillan College Publishing Company, 1994. 619 p.

GUIGUER, N. Jr. **The Waterloo Training Course Series: Modelagem Matemática de Fluxo e Transporte em águas Subterrâneas.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 500p.

GUIGUER, N. Jr.; FRANZ, T. **User's for Manual for Visual Modflow, Versão 2.2.** Waterloo Hydrogeologic Inc. Ontário, Canadá, 1993.

HEATH, Ralph C. **Hidrologia de água subterrânea básica.** Geological Survey water-supply paper 2220. United States, 1983.

HVORSLEV, M. J. **Time lag and soil permeability in groundwater measurements**, Bull. 36 U. S. Arms Corps of Eng. Waterways Exp. Stn., Vicksburg, Miss., 1954 50p.

MACDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **A Modular Three-dimensional Finite-difference Ground Water Flow Model**, U.S. Geological Survey, Open File Report, 1984. 83-875

MANOEL FILHO, J. Águas subterrâneas: Histórico e importância. In: **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. p. 367 - 389.

MANOEL FILHO, J.; CASTRO, V. L. L. de. **Avaliação e exploração do aquífero dunas-barreiras na região do subsistema lacustre do Bonfim – RN**. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2002, Florianópolis. **Anais...** 2002. 1 CD- ROM.

MONTEIRO, A. B. **Modelagem do fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife e seus encaixes**. 2000. 154 f. Dissertação de mestrado. Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, UFPE. Recife, 2000.

MONTEIRO, A. L. **Dinâmica de lençol freático em agricultura de vazante**. In: IX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1999, UFRPE, Recife. **Anais...** 1999. p. 193.

MONTENEGRO, A. A. A. **Stochastic Hydrogeological Modelling of Aquifer Salinization from Small Scale Agriculture in Northeast Brazil**. PH. D. Thesis. Department of Civil Engineering. University of Newcastle. UK. 1997.

MONTENEGRO, A. A.; MONTEIRO, A. L. N. **Avaliação hídrica de aquífero aluvial através de simulação computacional**. In: V SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE , 2000, Natal. **Anais...** 2000. p.137-144.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACKAY, R. **Contribuição dos solos irrigados na dinâmica de salinização das águas subterrâneas em aluviões**. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1998, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 1998. 1 CD ROM.

MONTENEGRO, A. A.; MONTENEGRO, S. M. G.; ANTONINO, A. C.; MONTEIRO, A. L.N. **Evolução da Zona Saturada em Agricultura de Vazante: Açude Cajueiro, Pernambuco**. In: IV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2000, Campina Grande. **Anais...** 2000. 1 CD- ROM.

MONTENEGRO, A. A.; MONTENEGRO, S. M. G.; MONTEIRO, A. L.N.; MACKAY R. **Recarga de origem pluviométrica em aluviões - estudo de caso no semi-árido do Nordeste do Brasil.** In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMI-ÁRIDO, 2001, Campina Grande. **Anais...** 2001. 1 CD- ROM.

OLIVEIRA, B. C. Estudo revela que Pesqueira foi pioneira da industrialização no NE. **Jornal do comércio**, Recife, 25 out. 1998. Regional, p. 2.

REBOUÇAS, A. C; GASPARY J. G. **As águas subterrâneas do Nordeste:** estimativas preliminares. 2. ed. Recife: SUDENE, 1971. (Série Hidrogeológica, 6).

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Editora Manole LTDA, 1990. 188p.

SANTIAGO F. S. **Efeito do manejo da irrigação na salinidade e umidade de um neossolo flúvico, com a cultivar de repolho midori (*Brassica oleracea var. capitata*) no Município de Pesqueira/PE.** 2002. 108f Dissertação de mestrado. Pós graduação em Agronomia-Ciência do solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2002.

SILVA T. J. A. **Aplicação de evapotranspirômetro de pesagem no estudo de ralações entre a evapotranspiração de referência medida e estimada no semi-árido nordestino.** 2000. 95f. Dissertação de mestrado. Pós graduação em Agronomia-Ciência do solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 2000.

TODD, D. K. **Hidrologia de águas subterrâneas.** São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1953. 319p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1997. 943 p.

VIEIRA, L. J. S. **Emprego de um modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo para definição de alternativas de exploração de um aquífero aluvial.** 2002. 117f. Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2002.

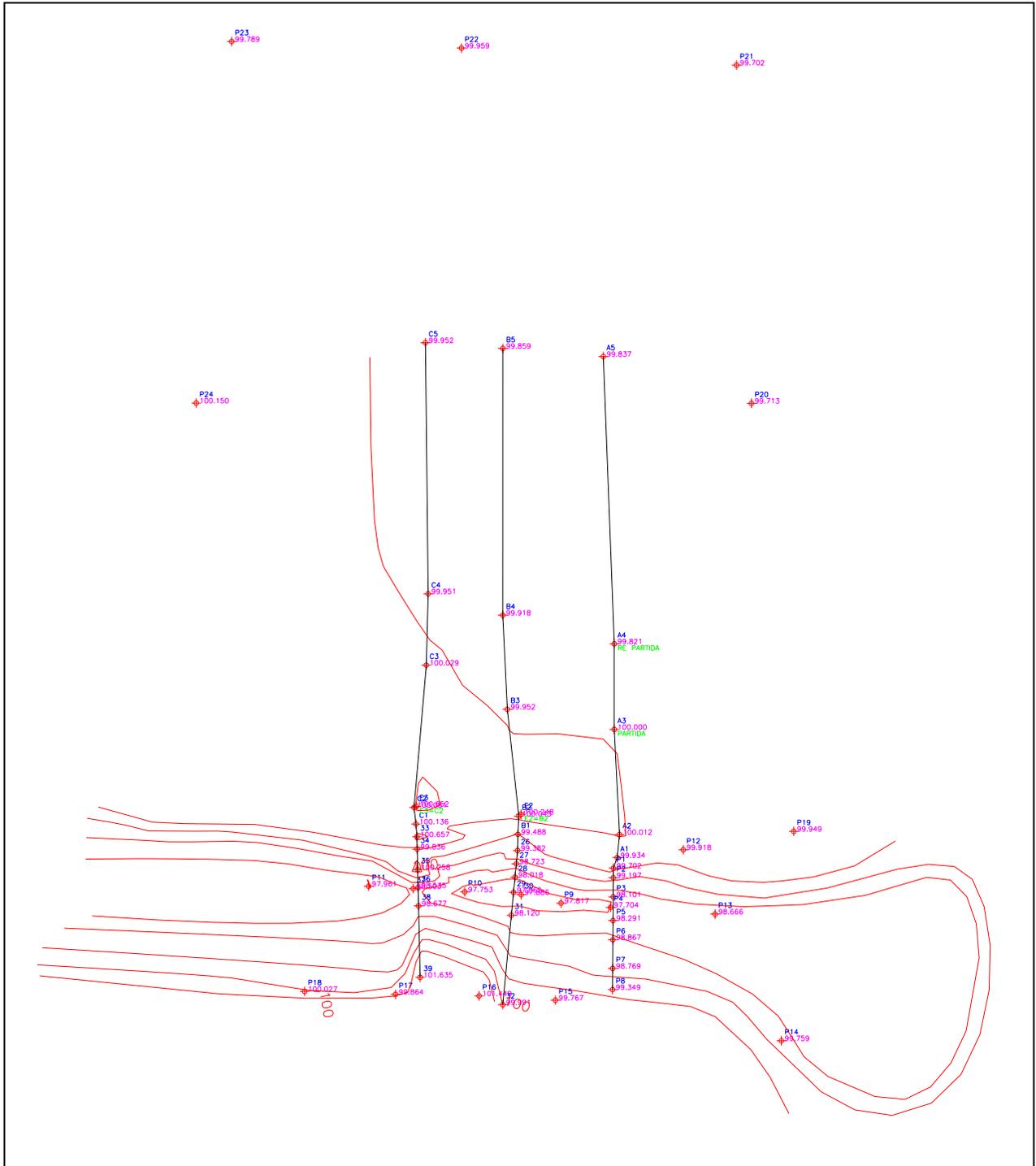
WALTON, W.C. **Groundwater Resource Evaluation.** New York: McGraw-Hill Book Company, 1970. 664p.

WANG, H. F. & ANDERSON, MP. **Introduction to ground water modeling: finite difference and finite element methods.** San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1982. 237 p.

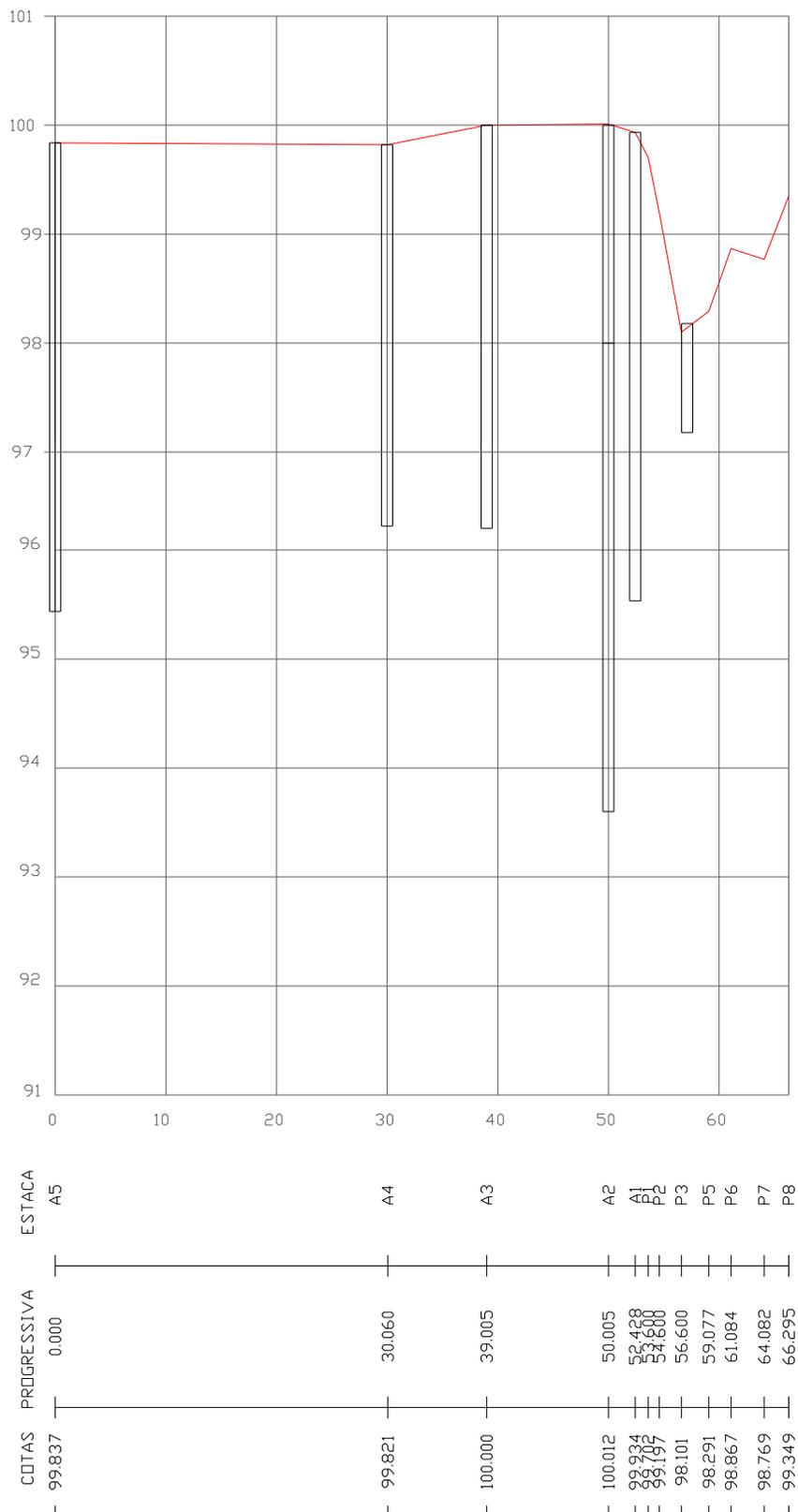
WRIGHT, C. **Ephemeral steam-aquifer interactions in the Semi-arid region of northeast Brazil.** MSc. Hydrogeology, Department of Sciences, University of Birmingham 2001.

7 Anexos

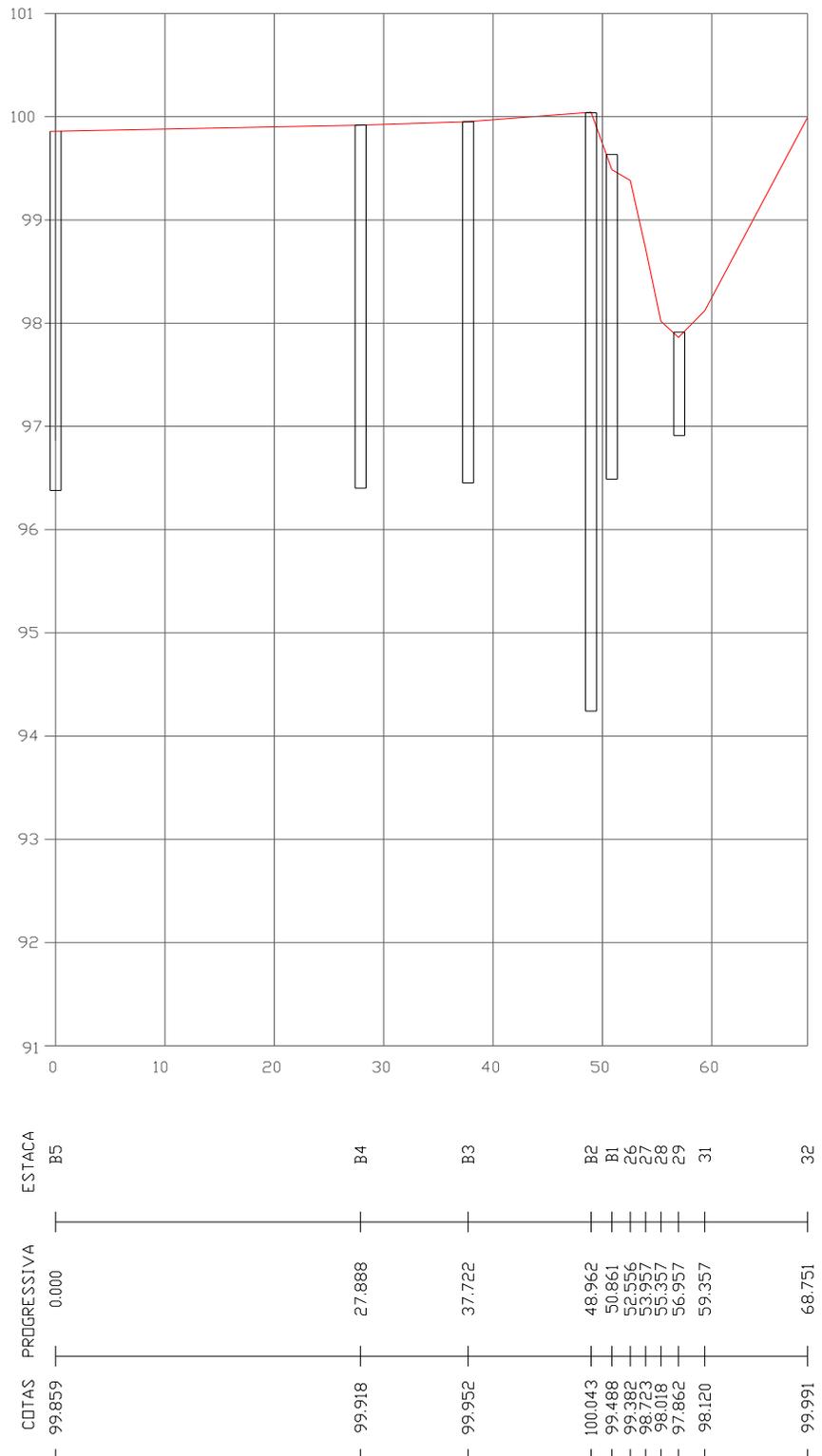
Anexo 1 - Vista superior da Sub-área de estudo



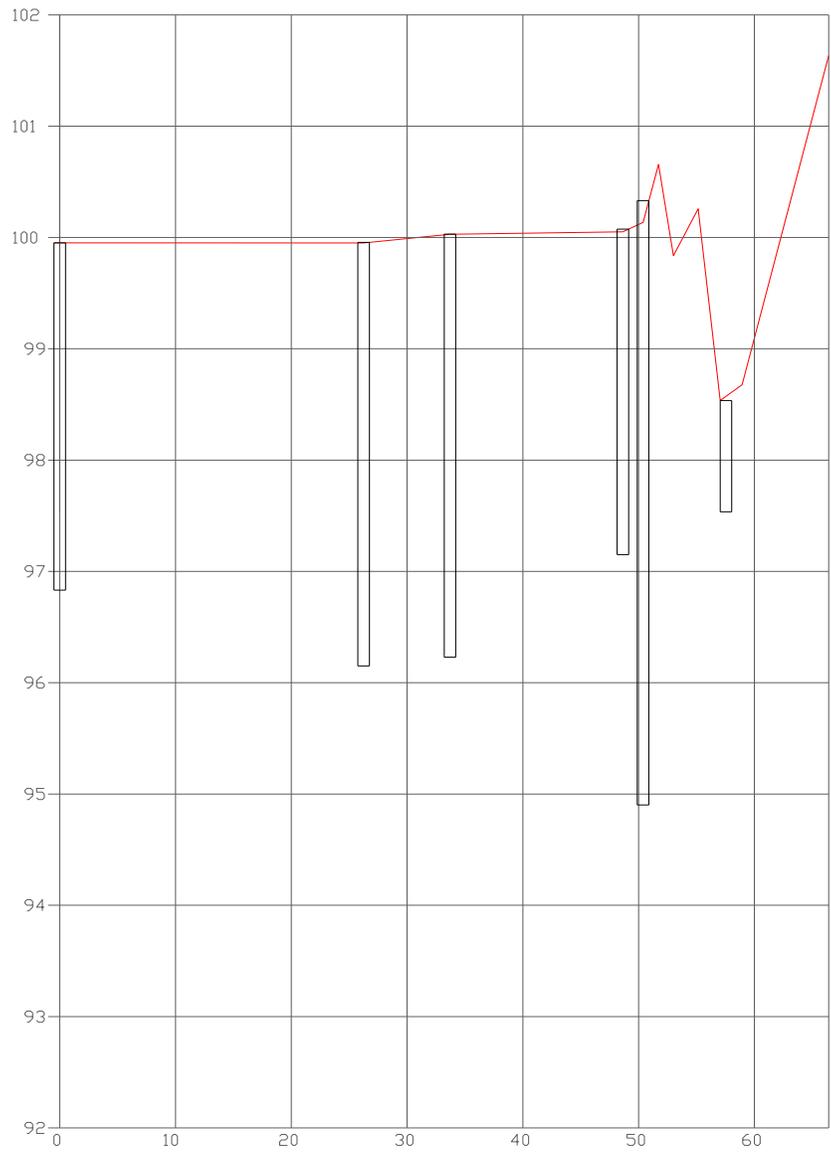
Anexo 2 - Seção transversal A



Anexo 2 - Seção transversal B

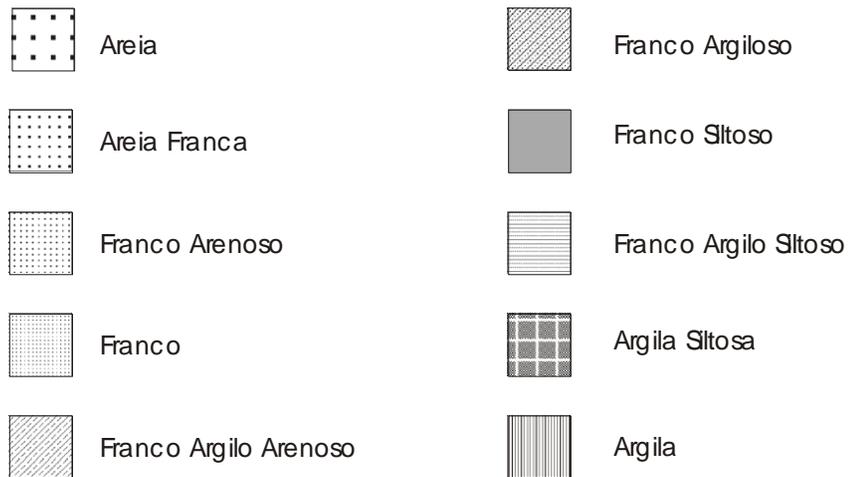
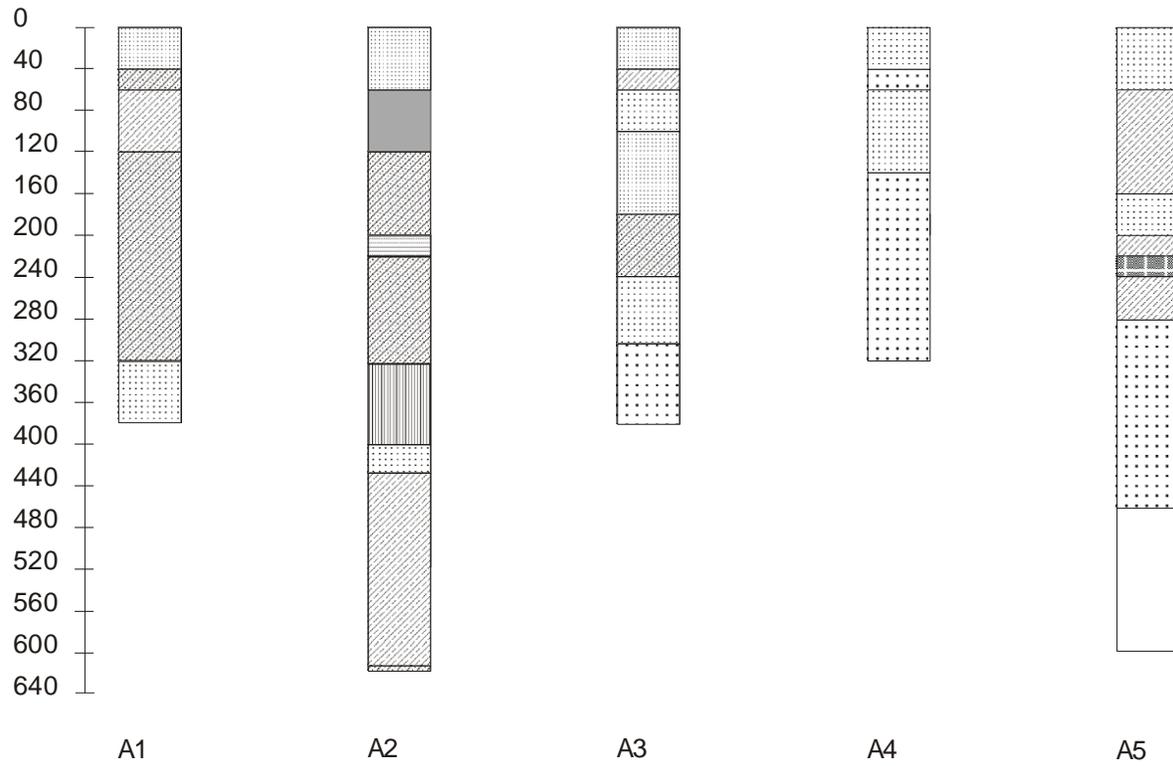


Anexo 2 - Seção transversal C

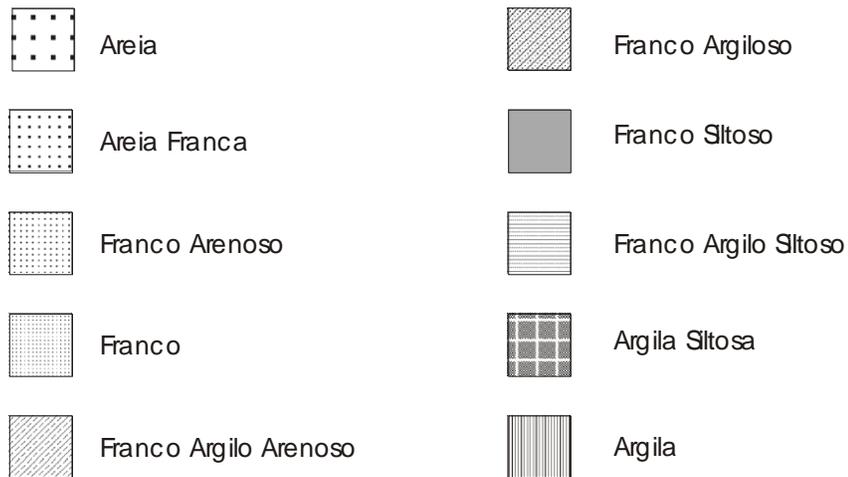
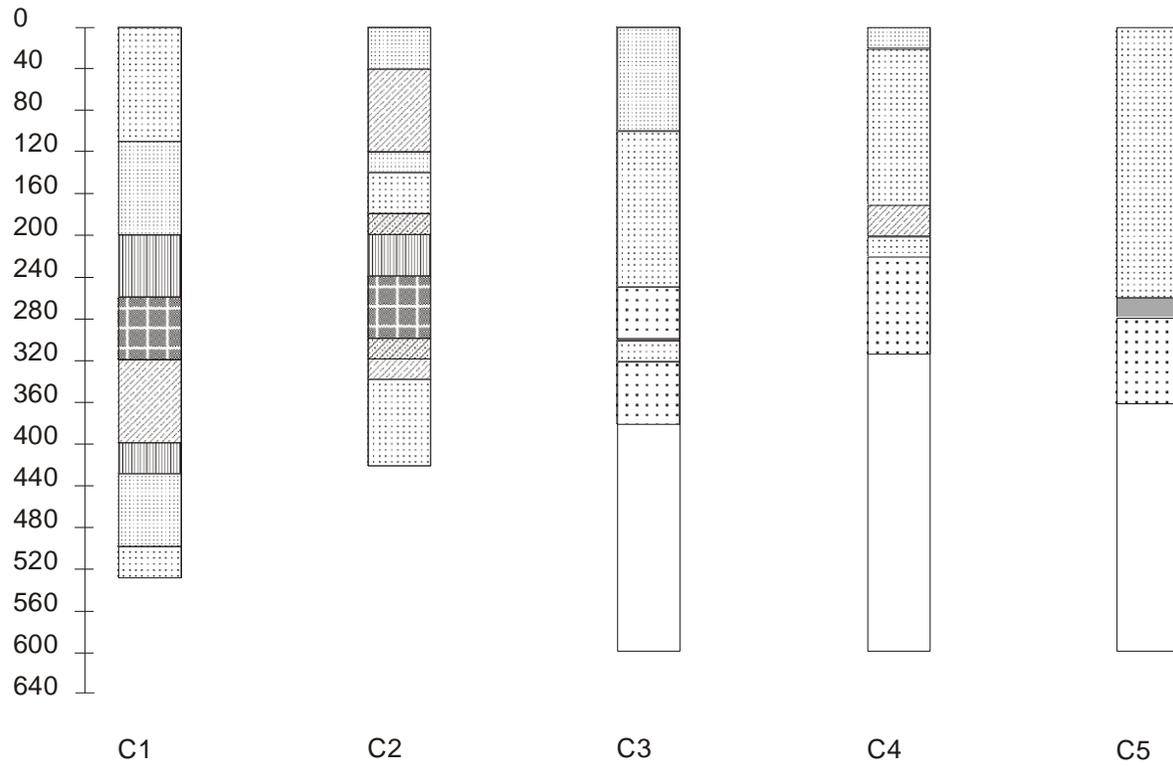


ESTACA	PROGRESSIVA	COTAS
C5	0.000	99.952
C4	26.248	99.951
C3	33.708	100.029
C2	48.641	100.051
C1	50.384	100.136
33	51.717	100.657
34	53.007	99.836
35	55.143	100.258
36	57.043	98.535
38	58.942	98.677
39	66.407	101.635

Anexo 3 Perfil granulométrico seção transversal A

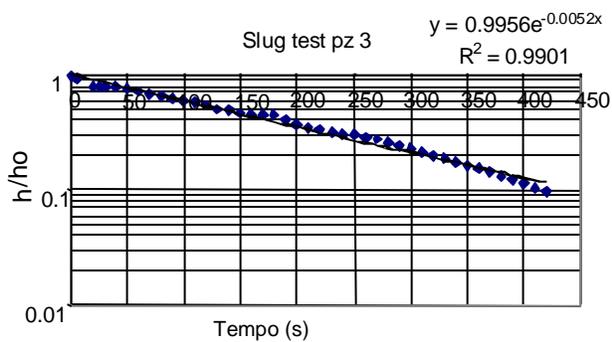
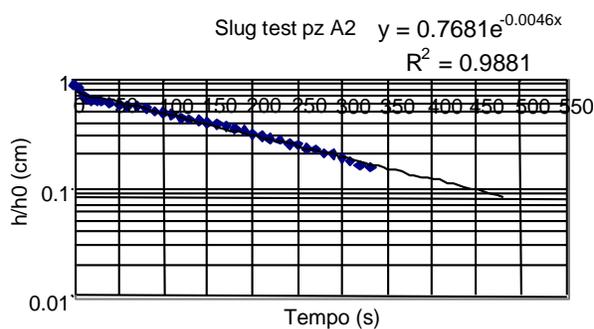
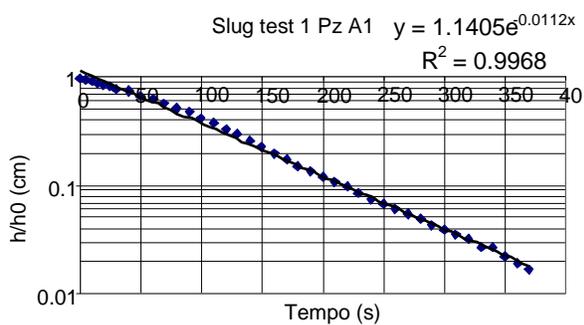
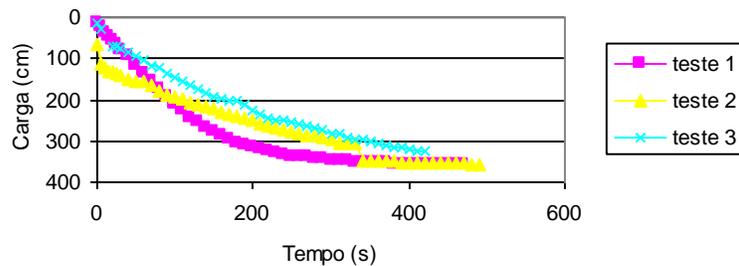


Anexo 3 Perfil granulométrico seção transversal C



Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz A1

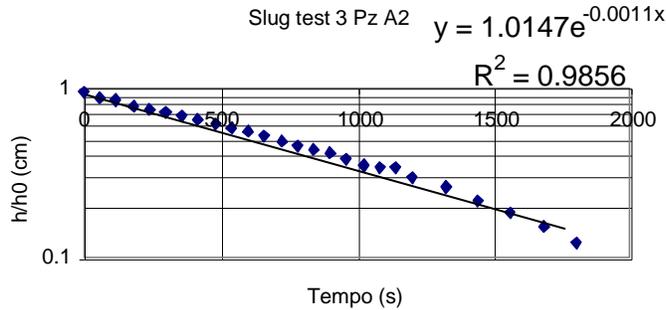
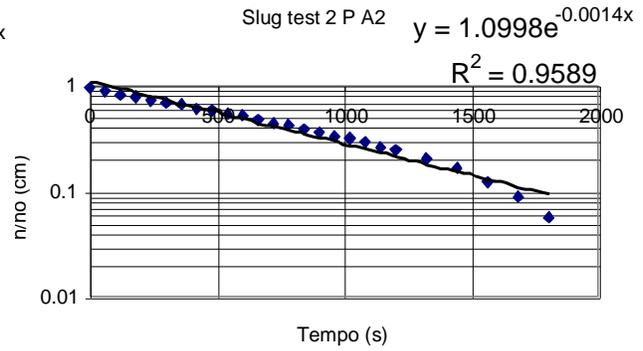
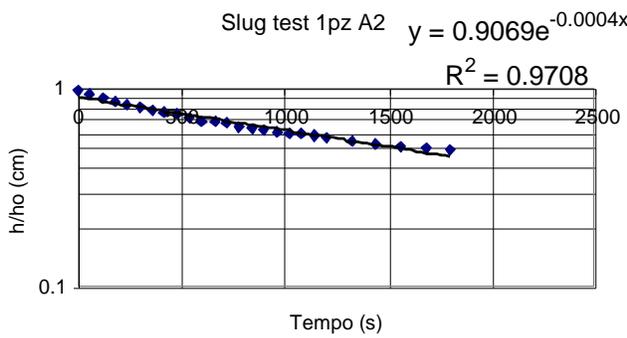
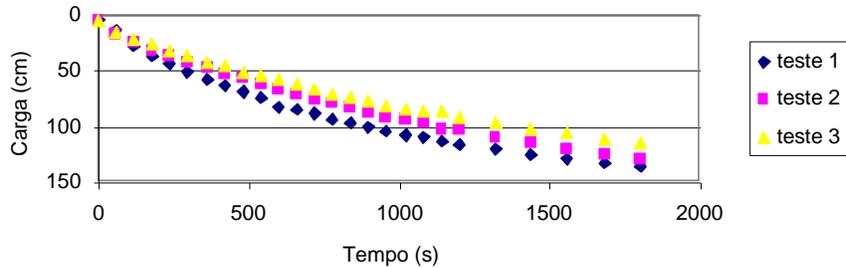


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	100.5106 s	T0	158.7863 S	T0	190.3543 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	0.780645 m/dia	K =	0.494143 m/dia	K =	0.412195 m/dia

Média 0.562328
 Desvio Padrão 0.193457
 CV 0.344029

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz A2

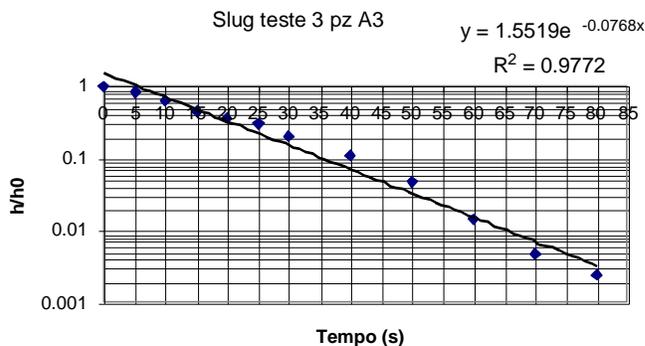
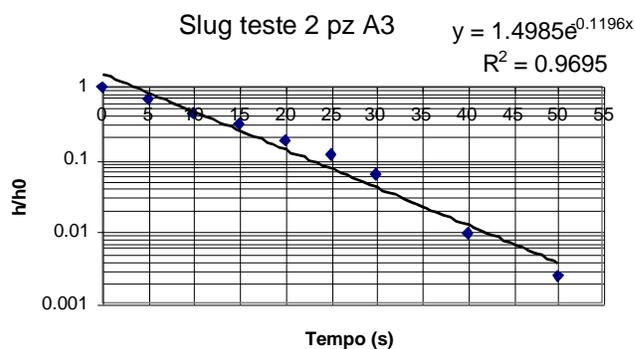
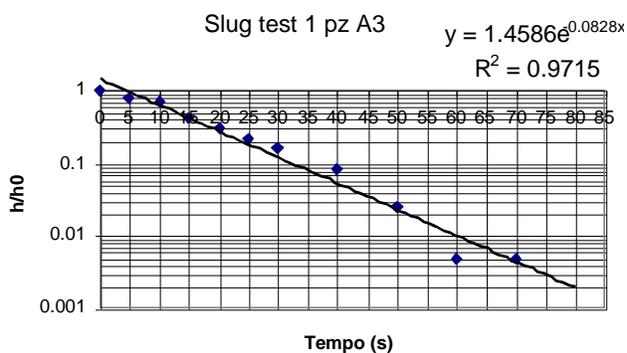
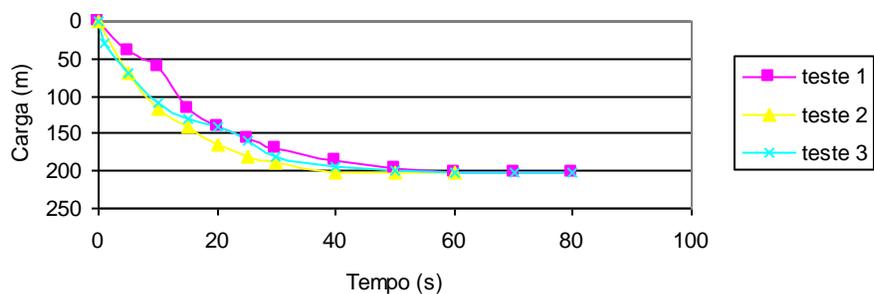


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	2250 s	T0	800 s	T0	900 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	0.034873 m/dia	K =	0.098079 m/dia	K =	0.0872 m/dia

Média 0.0734
 Desvio padrão 0.033789
 CV 0.460476

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz A3

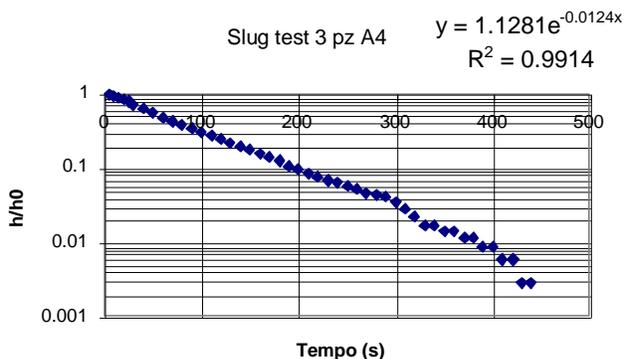
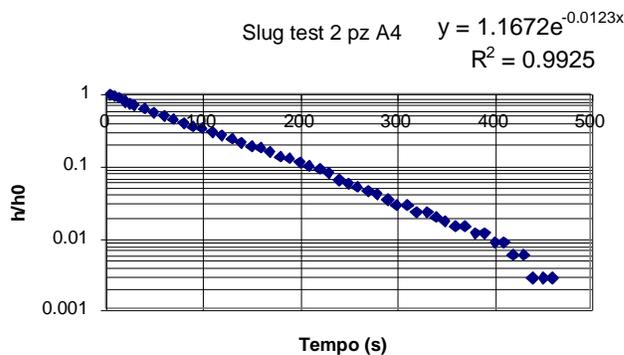
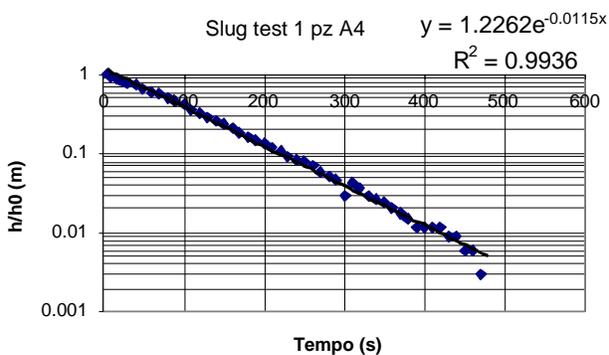
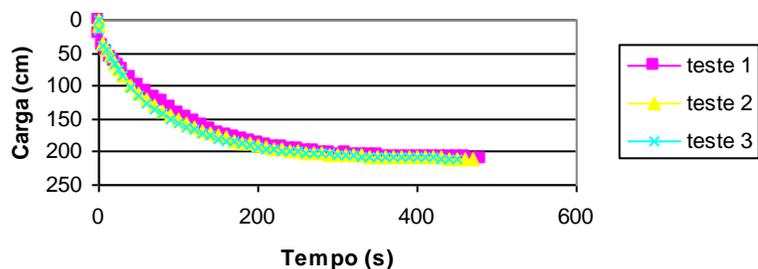


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	16.56678 s	T0	18.66839 s	T0	11.69496 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	4.736173 m/dia	K =	4.202994 m/dia	K =	6.709142 m/dia

Média 5.2161
Desvio Padrão 1.320206
CV 0.253102

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz A4

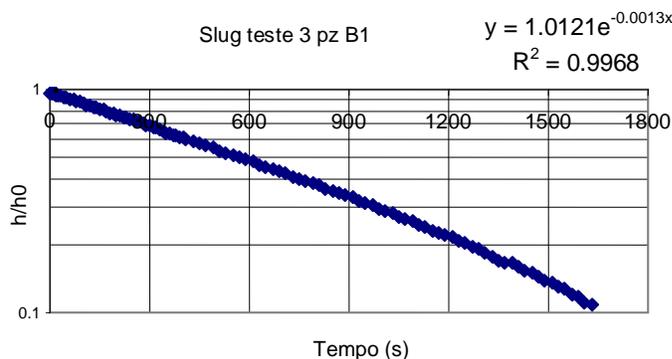
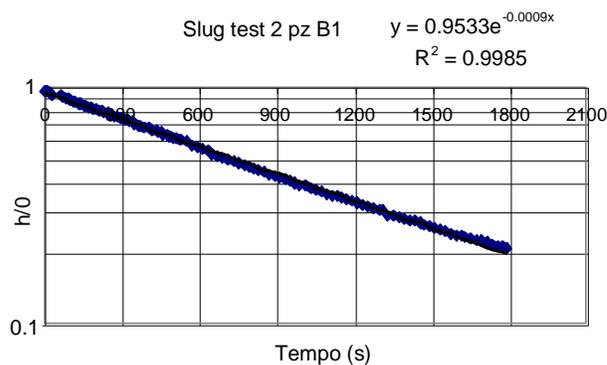
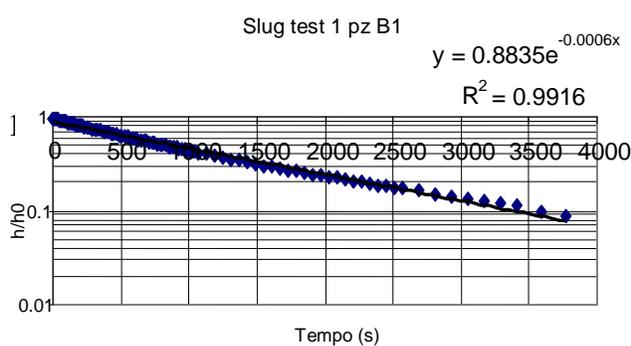
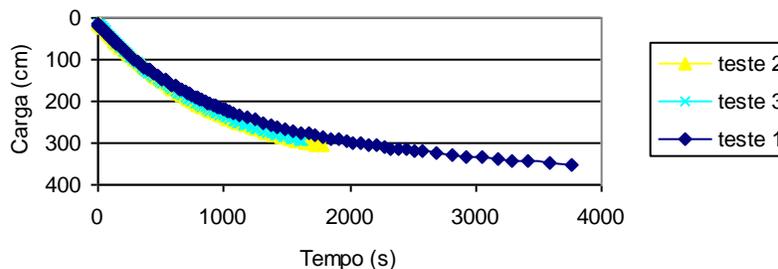


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	104.1889 s	T0	93.40325 s	T0	89.90218 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	0.753085 m/dia	K =	0.840047 m/dia	K =	0.872761 m/dia

Média 0.8220
 Desvio Padrão 0.061853
 CV 0.07525

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz B1

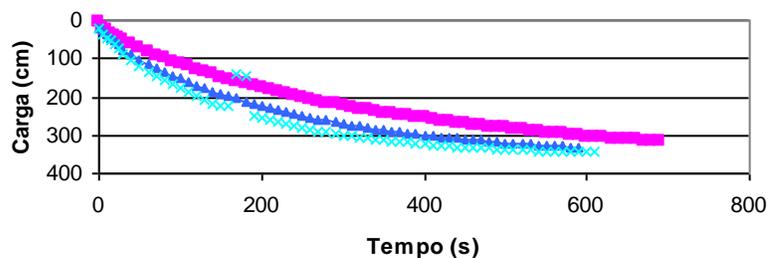


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	1450.647 s	T0	1051.585 s	T0	774.0613 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	0.054088 m/dia	K =	0.074614 m/dia	K =	0.101366 m/dia

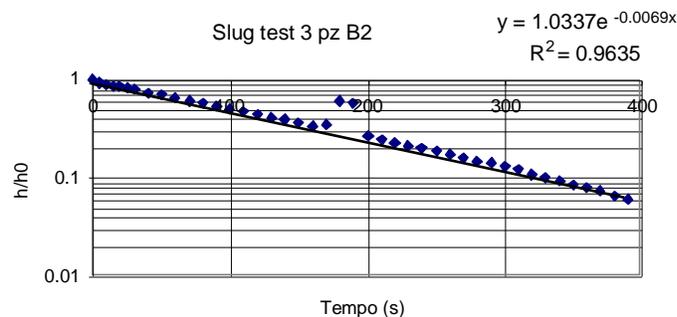
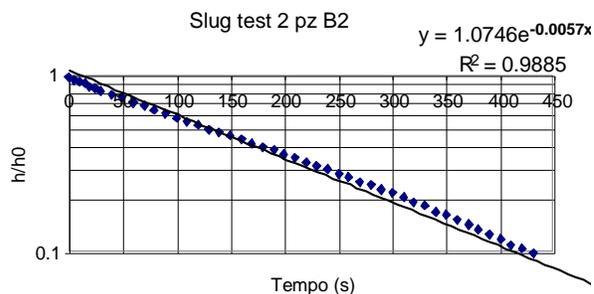
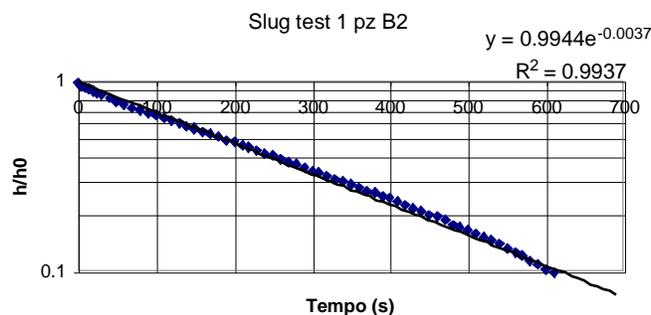
Média 0.076689
 Desvio padrão 0.023707
 CV 0.309128

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz B2



■ teste 1 ▲ teste 2 × teste 3

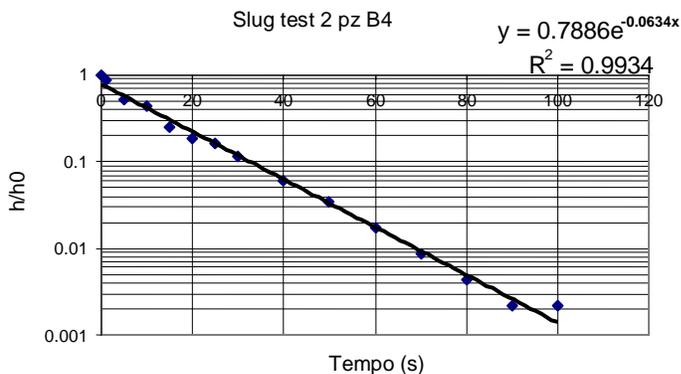
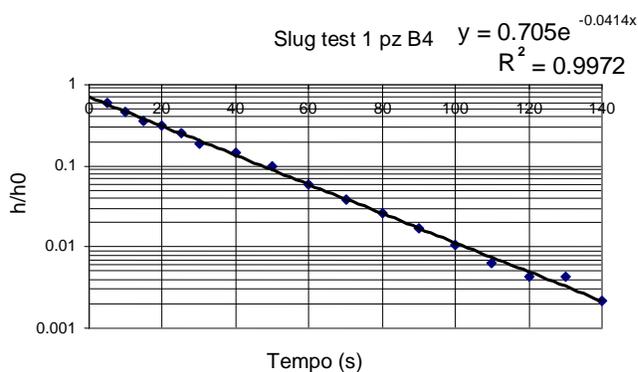
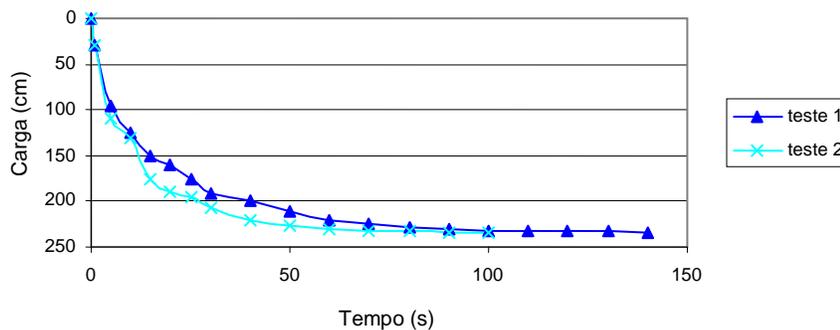


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	267.1991 s	T0	187.0528 s	T0	148.8981 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	0.29365 m/dia	K =	0.419471 m/dia	K =	0.526959 m/dia

Média 0.41336
 Desvio Padrão 0.116774
 CV 0.2825

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz B4

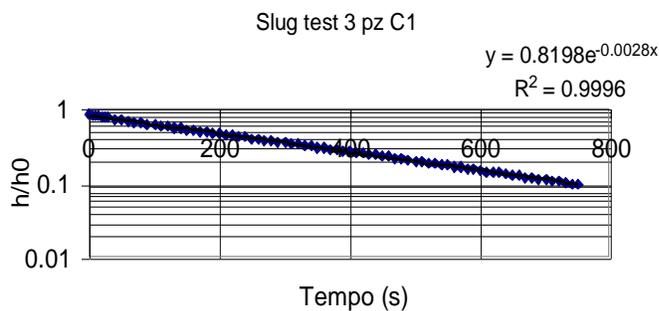
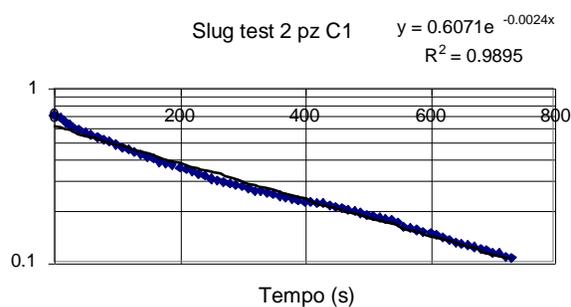
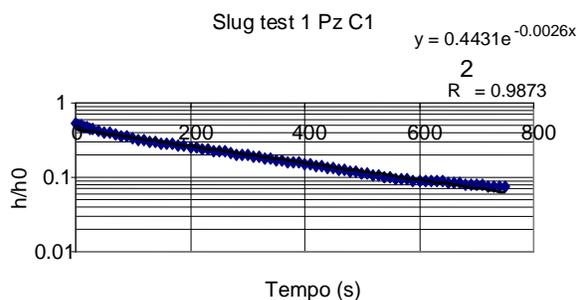
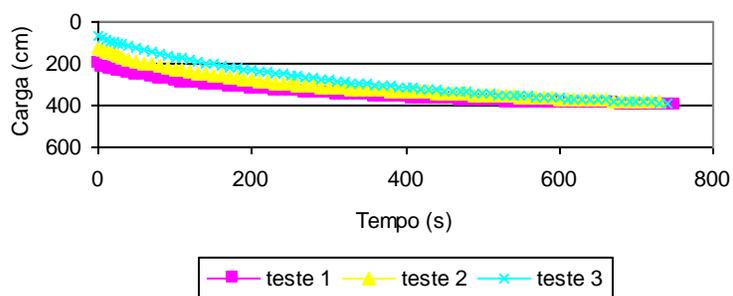


Teste 1		Teste 2	
T0	15.57234 s	T0	11.93622 s
L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	5.038622 m/dia	K =	6.573534 m/dia

Média 0.031994
Desvio Padrão 0.023544
CV 0.735891

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz C1

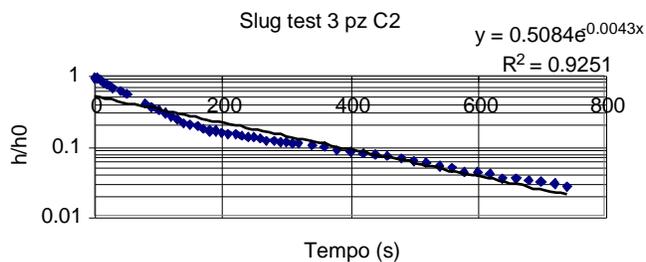
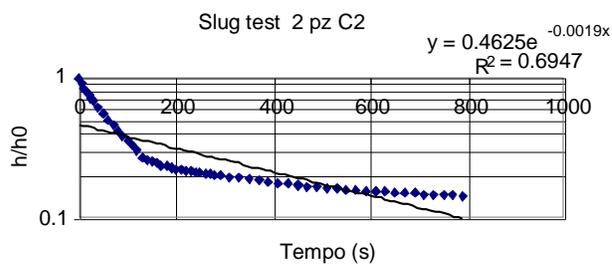
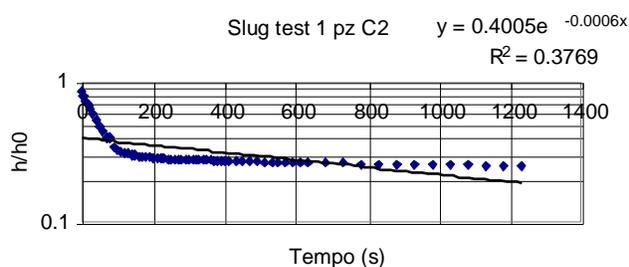
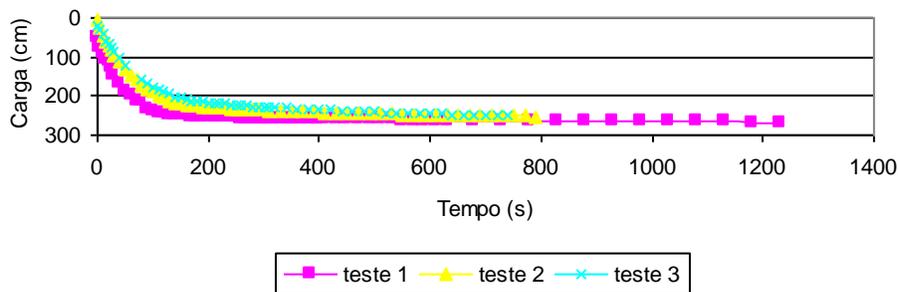


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	69.34326 s	T0	206.3294 s	T0	284.1276 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	1.131518 m/dia	K =	0.380281 m/dia	K =	0.276155 m/dia

Média 0.595984
 Desvio Padrão 0.466699
 CV 0.783072

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

Teste de variação de nível freático Pz C2

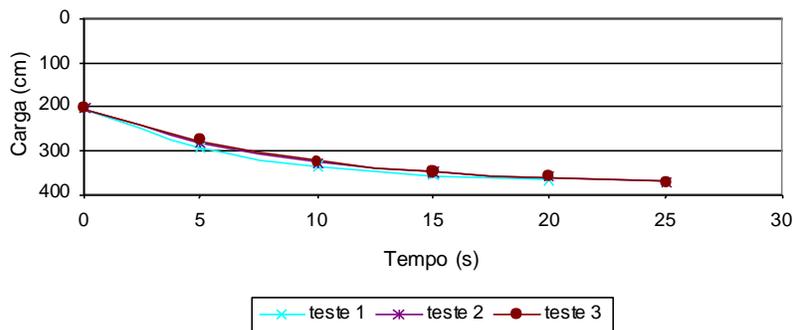


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	30.79482 s	T0	331.5669 s	T0	73.89896 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	2.547932 m/dia	K =	0.236643 m/dia	K =	1.061762 m/dia

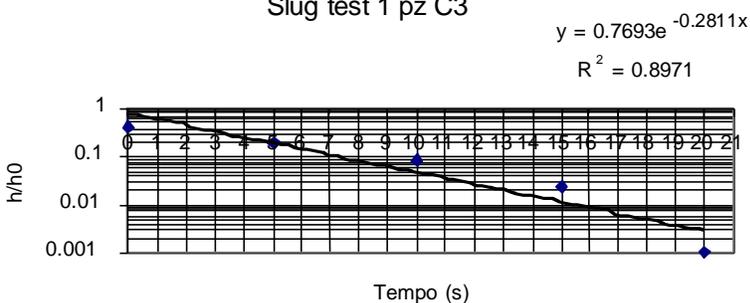
Média 1.282113
 Desvio Padrão 1.171294
 CV 0.913566

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

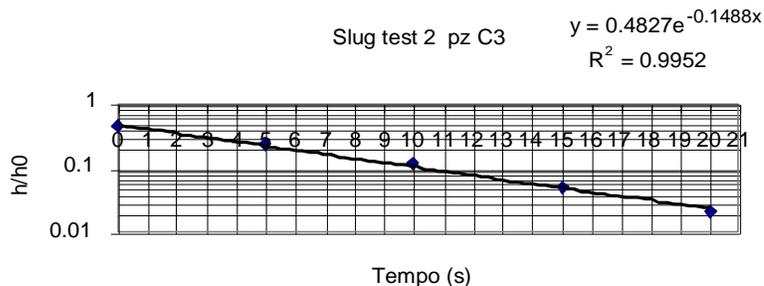
Teste de variação de nível freático Pz C3



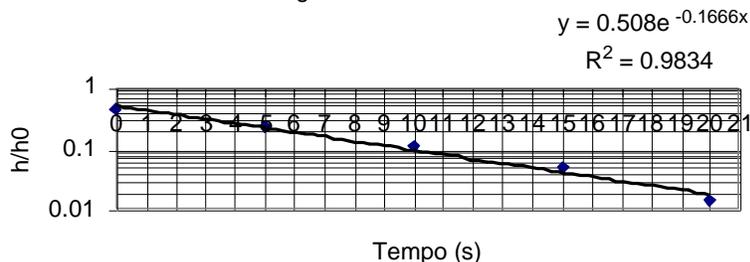
Slug test 1 pz C3



Slug test 2 pz C3



Slug test 3 Pz C3

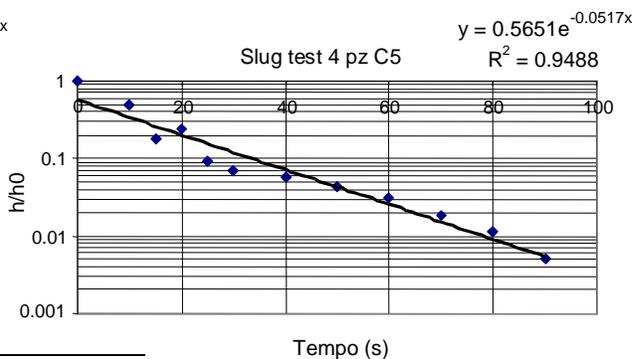
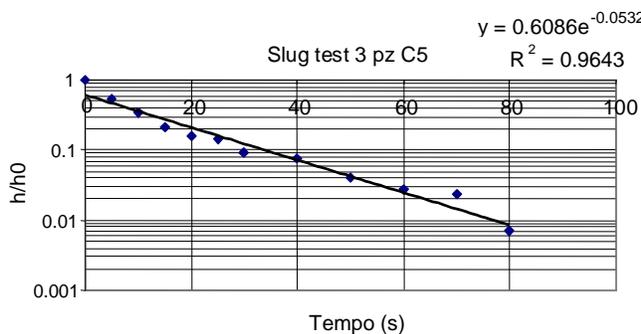
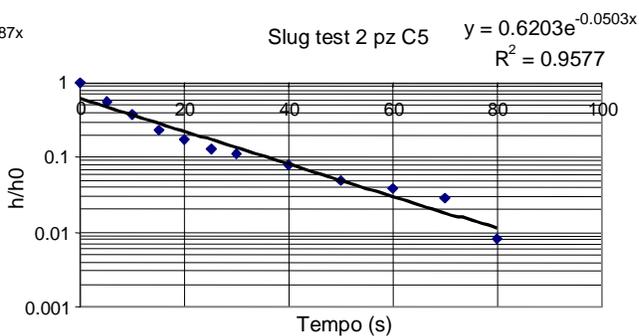
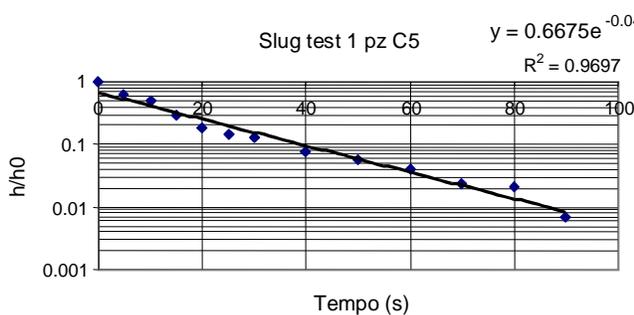
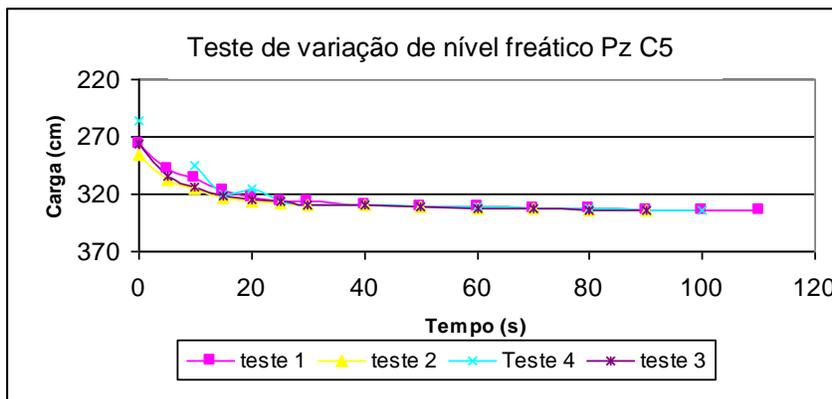


Teste 1		Teste 2		Teste 3	
T0	2.603977 s	T0	1.786911 s	T0	1.902632 s
L	13 cm	L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	30.13203 m/dia	K =	43.90993 m/dia	K =	41.23926 m/dia

Média 38.42708
Desvio Padrão 7.306771

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo

CV 0.190146



Teste 1		Teste 2	
T0	10.38796 s	T0	10.27237 s
L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	7.553273 m/dia	K =	7.638269 m/dia
Teste 3		Teste 4	
T0	9.354478 s	T0	9.192001 s
L	13 cm	L	13 cm
r =	0.95 cm	r =	0.95 cm
R =	0.95 cm	R =	0.95 cm
Le =	13 cm	Le =	13 cm
Le/R =	13.68421	Le/R =	13.68421
K =	8.387761 m/dia	K =	8.536023 m/dia

Média 8.028832
 Desvio Padrão 0.504899
 CV 0.062886

Anexo 4 - Teste de condutividade hidráulica em sub-área de estudo