Campus de São Carlos

**DETERMINAÇÃO DE REBAIXAMENTOS EM SISTEMAS DE
POÇOS TUBULARES ATRAVÉS DA CONSTRUÇÃO E
APLICAÇÃO DE PROGRAMA ESPECÍFICO**

JOSÉ EDUARDO ALAMY FILHO

ORIENTADOR: Prof. Dr. DANTE CONTIN NETO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

DETERMINAÇÃO DE REBAIXAMENTOS EM SISTEMAS DE POÇOS TUBULARES ATRAVÉS DA CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DE PROGRAMA ESPECÍFICO

José Eduardo Alamy Filho

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 21.03.02
Ass.: <i>J. Alamy</i>

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Dante Contin Neto

São Carlos

2002

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036902

Class.	TESE
Curr.	0163
Tombo	T0072/02

st 1237027

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A318d Alamy Filho, José Eduardo
Determinação de rebaixamentos em sistemas de poços
tubulares através da construção e aplicação de
programa específico / José Eduardo Alamy Filho. -- São
Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.

Área: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Dante Contin Neto.

1. Rebaixamentos em poços. 2. Sistemas de poços. 3.
Interferências entre poços. 4 Funções de poços. 5.
Programa computacional. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ EDUARDO ALAMY FILHO**

Dissertação defendida e julgada em 27-02-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **DANTE CONTIN NETO** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Prof. Tit. **HANS GEORGE ARENS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Prof. Dr. **OSMAR SINELLI**
(Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/USP)

aprovado

Profª. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*“Não sei se ela virá!” geme o Dandico.
“Que ela vem digo-te eu!” logo murmuro,
Mais calado ele fica do que um muro,
Muito mais mudo do que um muro eu fico.*

*“Ela virá?” torna ele, e cala o bico.
“Ela vem”, digo então num esconjuro.
E a paciência perdendo: “que o futuro
A Deus pertence.” E nada mais lhe aplico.*

*Três horas, quatro, cinco, seis e sete,
Batem na Sé, enquanto, em voz sumida,
“Se ela vier, isto muda!” ele repete.*

*Batem as nove. As ruas estão mortas.
Despeço-me. E ele diz na despedida
“Não sei se ela virá!”, fechando as portas.*

Alphonsus de Guimaraens

*Aos meus pais, meus irmãos e meus avós,
pelo que sou...por tudo que posso ser.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – OBJETIVOS.....	4
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 – Aquífero, Aquitarde e Aquiclude.....	5
3.2 – Tipos de Aquífero.....	5
3.3 – Anisotropia e Heterogeneidade.....	6
3.4 – A lei de Darcy.....	7
3.5 – Propriedades Físicas dos Aquíferos.....	8
3.5.1 – Condutividade Hidráulica (k).....	8
3.5.2 – Transmissividade (T).....	9
3.5.3 – Armazenamento Específico (Ss).....	9
3.5.4 – Coeficiente de Armazenamento ou Armazenabilidade (S).....	10
3.5.5 – Rendimento ou Produção Específica (Sy).....	10
3.5.6 – Rebaixamento (s).....	10
3.6 – Métodos Analíticos e Numéricos para Escoamentos Subterrâneos.....	11
3.7 – Estudos de Soluções Numéricas.....	12
3.8 – Estudos de Soluções Analíticas.....	15
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1 – Considerações Preliminares.....	21
4.2 – Modelos de Funções de Poços.....	22
4.2.1 – Modelo 1: transiente, confinado.....	22
4.2.1.1 – Modelo Conceitual.....	22
4.2.1.2 – Equacionamento.....	23
4.2.1.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	26
4.2.2 – Modelo 2: transiente, confinado, penetração parcial.....	27

4.2.2.1 - Modelo Conceitual.....	27
4.2.2.2 – Equacionamento.....	28
4.2.2.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	31
4.2.3 – Modelo 3: transiente, confinado, aquitarde superposto ao aquífero.....	32
4.2.3.1 – Modelo Conceitual.....	32
4.2.3.2 – Equacionamento.....	34
4.2.3.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	37
4.2.4 – Modelo 4: transiente, confinado, anisotrópico, aquitarde superposto ao aquífero.....	38
4.2.4.1 – Modelo Conceitual.....	38
4.2.4.2 – Equacionamento.....	39
4.2.4.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	42
4.2.5 – Modelo 5: transiente, não confinado, anisotrópico.....	43
4.2.5.1 – Modelo Conceitual.....	43
4.2.5.2 – Equacionamento.....	44
4.2.5.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	46
4.2.6 – Modelo 6: transiente, não confinado, penetração parcial anisotrópico.....	47
4.2.6.1 – Modelo Conceitual.....	47
4.2.6.2 – Equacionamento.....	49
4.2.6.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	53
4.2.7 – Modelo 7: transiente, conversão de confinado para não confinado.....	55
4.2.7.1 – Modelo Conceitual.....	55
4.2.7.2 – Equacionamento.....	56
4.2.7.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	58
4.2.8 – Modelo 8: transiente, não confinado, aquitarde superposto ao aquífero.....	59
4.2.8.1 – Modelo Conceitual.....	59
4.2.8.2 – Equacionamento.....	61
4.2.8.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço.....	64

4.3 – Efeitos da Penetração Parcial de Poços.....	65
4.4 – Efeitos do Tempo de Bombeamento.....	71
4.4.1 – Bombeamento Contínuo.....	72
4.4.2 – Bombeamento Intermitente.....	73
4.4.3 – O Caso de Aquíferos não Confinados.....	74
4.5 – A Superposição de Efeitos.....	76
4.6 – O Programa Computacional.....	77
4.6.1 – Preliminares.....	77
4.6.2 – Cálculo de Funções de Poços.....	80
4.6.3 – Interferências entre Poços/ Interferências com Desligamento de Poços.....	83
4.6.3.1 – Generalidades.....	83
4.6.3.2 – O Procedimento de Cadastro de Poços.....	85
4.6.3.3 – A Planilha POÇOS.....	86
4.6.3.4 – A Planilha MEIO.....	88
4.6.3.5 – A Planilha DISTÂNCIAS.....	90
4.6.3.6 – A Planilha W.....	91
4.6.3.7 – A Planilha W2.....	93
4.6.3.8 – A Planilha REBAIXAMENTOS.....	95
4.6.3.9 – A Planilha REB2.....	97
4.6.3.10 – A Planilha COTAS.....	97
4.6.4 – Cálculo de Interferências em Seções, sem e com Desligamento de Poços.....	99
4.6.4.1 – O Procedimento de Cadastro das Seções.....	99
4.6.4.2 – A Planilha COTAS.....	101
4.6.5 – Análise Individual de Poços.....	102
4.6.5.1 – Distância Fixa e Tempo Variável.....	103
4.6.5.2 – Distância Variável e Tempo Fixo.....	104
5 – RESULTADOS.....	106
5.1 – Simulações de Interferências entre Poços num Sistema Regional.....	106
5.1.1 – Dados e Considerações.....	106
5.1.2 – Resultados.....	115

5.1.3 – Comentários.....	141
5.2 – Simulações em uma Bateria de Poços.....	142
5.2.1 - Dados e Considerações.....	142
5.2.2 – Resultados.....	144
5.2.3 – Comentários.....	154
5.3 – Simulações em Aquíferos não Infinitos.....	156
5.3.1 – Recarga por Corpo D'água.....	157
5.3.2 – Barreira Impermeável.....	160
5.3.3 – Aquíferos Diferentes e Vizinhos.....	163
5.4 – Comparação com o Método das Diferenças Finitas.....	167
5.4.1 – Equacionamento Numérico.....	167
5.4.2 – Simulações.....	169
6 – CONCLUSÕES.....	172
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	174
ANEXO – REGRAS E FUNÇÕES ESPECIAIS.....	179

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Esquema dos aquíferos quanto às condições de anisotropia e heterogeneidade	6
FIGURA 4.1 – Corte do terreno	22
FIGURA 4.2 – Corte do terreno	27
FIGURA 4.3 – Superfície piezométrica média	30
FIGURA 4.4 – Corte do terreno	32
FIGURA 4.5 – Transição do escoamento na interface aquítarde/aquífero	34
FIGURA 4.6 – Corte do terreno	38
FIGURA 4.7 – Corte do terreno	43
FIGURA 4.8 – Corte do terreno	48
FIGURA 4.9 – Corte do terreno	55
FIGURA 4.10 – Corte do terreno	59
FIGURA 4.11 – Esquema das linhas de fluxo e equipotenciais, num aquífero confinado, sob bombeamento de um poço parcialmente penetrante	66
FIGURA 4.12 – Esquema das linhas de fluxo e equipotenciais, num aquífero não confinado, sob bombeamento de um poço parcialmente penetrante	66
FIGURA 4.13 – Variação da função de poço com o tempo de bombeamento para uma distância fixa	72
FIGURA 4.14 – Bombeamento intermitente	73
FIGURA 4.15 – Variação, em escala bilogarítmica, de W com ts	75
FIGURA 4.16 – Esquema de dois poços interferentes	77
FIGURA 4.17 – Trecho de código em Visual Basic utilizado no programa	78
FIGURA 4.18 – Opções de cálculo disponíveis no programa	78
FIGURA 4.19 – Opções de modelos	81
FIGURA 4.20 – Janela de cálculo de funções de poços	82
FIGURA 4.21 – Intervalos de tempo utilizados no aplicativo	84
FIGURA 4.22 – Formulário para o cadastro de poços	85
FIGURA 4.23 – A planilha POÇOS	87
FIGURA 4.24 – A planilha MEIO	89

FIGURA 4.25 – A planilha DISTÂNCIAS.....	90
FIGURA 4.26 – A planilha de funções de poços (W)	92
FIGURA 4.27 – A planilha de funções W2	93
FIGURA 4.28 – Artificio para cálculo do intervalo de tempo da planilha W2	94
FIGURA 4.29 – A planilha REBAIXAMENTOS	96
FIGURA 4.30 – A planilha de resultados finais	98
FIGURA 4.31 – A planilha de cadastro das seções	100
FIGURA 4.32 – A superfície piezométrica final	102
FIGURA 4.33 – Formulário de entrada de dados	103
FIGURA 4.34 – Formulário de entrada de dados	104
FIGURA 5.1 – Esquema de vazões distribuídas e concentradas	115
FIGURA 5.2 – Perfil inicial dos poços	143
FIGURA 5.3 – Situação inicial do poço 11	146
FIGURA 5.4 – Artificio utilizado para simular recarga do aquífero por um canal	157
FIGURA 5.5 - Artificio utilizado para simular a presença de contornos impermeáveis no aquífero	160
FIGURA 5.6 – Artificio utilizado no cálculo de rebaixamentos em aquíferos diferentes	163
FIGURA 5.7 – Esquema de vazões para o cálculo de diferenças finitas	168
FIGURA 5.8 – Esquema dos poços da bateria	169

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Valores de k para diferentes formações (BOWER, 1978).....	9
TABELA 5.1 – Dados dos poços utilizados na simulação.....	108
TABELA 5.2 – Dados de entrada dos poços – referência 01/01/1996.....	115
TABELA 5.3 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/1996.....	116
TABELA 5.4 – Dados de entrada dos poços – referência 01/01/1997.....	119
TABELA 5.5 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/1997.....	120
TABELA 5.6 – Dados de entrada dos poços – referência 01/01/2001.....	123
TABELA 5.7 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2001.....	124
TABELA 5.8 – Dados de entrada dos poços – referência 01/01/2006.....	127
TABELA 5.9 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2006.....	128
TABELA 5.10 – Dados de entrada dos poços – referência 01/01/2011.....	131
TABELA 5.11 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2011.....	132
TABELA 5.12 – Dados de entrada dos poços – referência 01/01/2016.....	135
TABELA 5.13 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2016.....	136
TABELA 5.14 – Resumo dos níveis dinâmicos calculados pelo programa.....	139
TABELA 5.14 – Poços utilizados na simulação de bateria.....	144
TABELA 5.15 – Rebaixamentos calculados - referência 01/02/2000.....	144
TABELA 5.16 – Rebaixamentos calculados - referência 01/03/2000.....	144
TABELA 5.17 – Rebaixamentos calculados - referência 01/06/2000.....	145
TABELA 5.18 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2001.....	145
TABELA 5.19 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2002.....	145
TABELA 5.20 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2003.....	146
TABELA 5.21 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2004.....	147
TABELA 5.22 – Rebaixamentos calculados - referência 01/01/2005.....	147
TABELA 5.23 – Rebaixamentos (m) calculados para o sistema equivalente.....	158
TABELA 5.24 – Rebaixamentos (m) calculados para o sistema equivalente.....	161
TABELA 5.25 – Rebaixamentos (m) calculados para o setor 1.....	165
TABELA 5.26 – Rebaixamentos (m) calculados para o setor 2.....	165
TABELA 5.27 – Dados dos poços da bateria	170
TABELA 5.28 – Resultados das simulações.....	170

LISTA DE SÍMBOLOS

- d = distância do topo do aquífero ao topo do filtro do poço [L]
- d_o = distância do topo do aquífero ao topo do filtro do poço de observação [L]
- k = condutividade hidráulica do meio [LT^{-1}]
- k_r = condutividade hidráulica na direção radial ao poço [LT^{-1}]
- k_v = condutividade hidráulica na direção vertical ao poço [LT^{-1}]
- l = distância do topo do aquífero à base do filtro do poço [L]
- l_o = distância do topo do aquífero à base do filtro do poço de observação [L]
- m = espessura saturada do aquífero [L]
- Q = vazão do poço [L^3T^{-1}]
- r = distância radial do centro do poço a um ponto do cone de depressão [L]
- S = armazenabilidade do meio, adimensional
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento [L]
- S_y = rendimento específico ou produção específica do meio, adimensional
- t = tempo de bombeamento [T]
- T = transmissividade do aquífero [L^2T^{-1}]
- z = distância vertical em relação ao topo do aquífero [L]

RESUMO

ALAMY FILHO, J. E. (2002). *Determinação de rebaixamentos em sistemas de poços tubulares através da construção e aplicação de programa específico*. São Carlos, 2002, 185 p., Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A utilização de modelos matemáticos em águas subterrâneas permite avaliar várias formas de gerenciamento desse recurso. Este assunto é de grande utilidade, principalmente diante de uma situação em que se deve decidir sobre a perfuração de novos poços. Assim, os órgãos responsáveis pelo abastecimento público de água necessitam de uma ferramenta para tomada de decisões, quer na perfuração de poços destinados ao abastecimento público, quer na concessão de novos poços particulares, de modo a evitar interferências significativas no sistema já existente.

Este trabalho discorre sobre a construção e aplicação de um programa computacional para cálculo de rebaixamentos, permitindo estimar interferências em sistemas de poços. O programa foi construído dentro do EXCEL 7.0, utilizando a linguagem de programação Visual Basic. A idéia da construção de um programa mais amigável ao usuário, tanto em termos de entrada dos dados, quanto em termos de apresentação dos resultados, é justificada, uma vez que os programas existentes geralmente exigem conhecimentos específicos mais avançados na área de matemática computacional (elementos finitos e diferenças finitas). As estimativas de interferências efetuadas pelo programa baseiam-se na avaliação das funções de poço (W) e no cálculo dos rebaixamentos totais pela teoria da superposição de efeitos. São também apresentados os resultados da aplicação do modelo nas simulações de sistemas de poços, permitindo avaliar os efeitos do bombeamento no declínio da superfície piezométrica.

Palavras-chave: rebaixamentos em poços; sistemas de poços; interferências entre poços; funções de poços; programa computacional.

ABSTRACT

ALAMY FILHO, J. E. (2002). *Determination of drawdowns in well systems by building and application of a specific program*. São Carlos, 2002, 185 p., Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The use of mathematical models in groundwater problems allows to estimate several ways of this resource management. This subject is useful, mainly facing a situation where new wells must be drilled. Thus, sectors for public water supply needs a tool to decide about drilling of new public or private wells, in order to avoid significant interferences in the present system.

This paper relates a building and an application of a computing program connected with drawdown calculations, allowing to evaluate interferences in well systems. The program was build in EXCEL 7.0, using the Visual Basic programming language. The idea of building a new program, easy to apply, as in values inlet and results display, is justified because present programs usually demands advanced knowledge on computing mathematic area (finite elements and finite differences). The interference calculations performed by the program bases in well functions theory and the evaluation of total drawdowns is done by the theory of superposition. The results of using it at evaluations of well systems are presented, allowing to estimate pumping effects at the piezometric surface drawdown.

Keywords: drawdowns in wells; well systems; interferences; well functions; computational program.

1 – INTRODUÇÃO

De acordo com as mais recentes avaliações, dos 1360 quatrilhões de toneladas de água do planeta, apenas 0,8% corresponde à água doce. Desta pequena fração, 3% apresentam-se na forma de água superficial e 97% na forma de água subterrânea (BARROS et al., 1995). Ocorrendo em maiores quantidades, as águas subterrâneas têm grande potencial de exploração, destacando-se ainda vantagens evidentes como boa qualidade (em geral) para o consumo humano e possibilidade de localização de obras de captação nas proximidades das áreas de consumo. As águas subterrâneas podem oferecer uma alternativa qualitativamente mais adequada. Pode-se evitar mais facilmente a poluição de aquíferos subterrâneos em relação à poluição de rios e lagos, muito embora o lençol freático seja vulnerável à contaminação. Porém na despoluição desses mananciais ocorre exatamente o contrário.

Um dos equívocos mais freqüentes no entendimento dessa matéria costuma estar associado à expectativa de que as reservas subterrâneas podem ser exploradas como fontes alternativas, somente para completar disponibilidades superficiais escassas ou altamente comprometidas. A própria expressão “reservas hídricas subterrâneas”, largamente utilizada para designar este tipo de ocorrência, contém a idéia de uma quantidade adicional de água, reservada para livre utilização futura ou sempre que as demais formas de disponibilidades estiverem já comprometidas.

Nas cidades abastecidas por águas subterrâneas é comum a presença de áreas com elevada concentração de poços. Essas concentrações aparecem geralmente nas regiões centrais da cidade ou em áreas de captação destinadas ao abastecimento público, denominadas baterias de poços. A proximidade entre poços realça o problema das interferências que faz com que eles se tornem

concorrentes, acentuando os rebaixamentos na superfície piezométrica. Nesse contexto insere-se também a presença de poços particulares próximos a poços públicos, o que agrava ainda mais a questão. A concessão para perfuração e operação de um poço particular é fornecida pelo órgão responsável pelo abastecimento público de água e deve se basear na viabilidade técnica desse empreendimento, reduzindo os prejuízos aos poços públicos.

Explorações desproporcionais comprometem o equilíbrio geral do sistema. De modo geral, os inconvenientes dessas explorações demoram a ser observados por causa da própria natureza dos fenômenos envolvidos, da lentidão com que eles atuam e da magnitude das disponibilidades existentes. Por isto mesmo, os desarranjos provocados por este tipo de imprevidência ou desconhecimento demandam prazos longos para serem corrigidos e reequilibrados. Situações deste tipo já não são raras nas regiões mais desenvolvidas. Em casos como estes, os prejuízos mais freqüentes costumam ser o aumento do custo de extração e o subaproveitamento do manancial.

Diante da crescente exploração das águas subterrâneas, quer por parte do poder público, quer por parte do poder privado, e das dificuldades em se prever com exatidão o escoamento subterrâneo, este trabalho está situado com o escopo de estimar, através de modelos matemáticos, os efeitos do bombeamento de vários poços nos rebaixamentos da superfície piezométrica. Uma extensão, também de grande praticidade, consiste na estimativa dos efeitos da introdução de novos poços no sistema.

Modelos matemáticos relacionados ao escoamento das águas subterrâneas têm sido utilizados desde o século XIX. Um modelo matemático consiste em um conjunto de equações que visam governar o fluxo das águas subterrâneas. O grau de confiança em determinado modelo depende do quanto ele aproxima suas previsões às situações de campo. Inevitavelmente considerações simplificadoras devem ser tomadas para a construção de um modelo, porque as condições reais são demasiado complexas para serem simuladas com exatidão.

Geralmente as considerações necessárias à resolução analítica de um modelo matemático são bastante restritivas. Por exemplo, muitas soluções analíticas requerem que o meio seja homogêneo e isotrópico. Aquíferos

heterogêneos e isotrópicos são simulados usando a média de suas características hidráulicas. Modelos analíticos requerem dimensões uniformes para a camada aquífera. Para se obter esta exigência, as variações na extensão superficial do aquífero são convertidas de forma a se obter uma área uniforme equivalente. Da mesma forma, os contornos e descontinuidades são idealizados para se adaptarem a formas geométricas mais elementares. Em outros casos, modelos analíticos mais complexos apresentam considerações que põem em dúvida a veracidade de suas soluções.

Desde a década de 60, quando os computadores se tornaram mais disponíveis, formas aproximadas através de técnicas numéricas têm sido amplamente utilizadas nos estudos de águas subterrâneas. Nos modelos numéricos, as equações diferenciais parciais são aproximadas a um conjunto de equações discretas no tempo e no espaço. A área de estudo do aquífero é subdividida em grande número de elementos discretos, geralmente retangulares no método das diferenças finitas e triangulares no método dos elementos finitos. O tempo é discretizado em pequenos incrementos e uma equação algébrica, ou conjunto de equações, é escrita para cada elemento e incremento de tempo.

A simulação do escoamento subterrâneo diante da ação de um campo de poços foi a questão de estudo do presente trabalho. Utilizaram-se métodos analíticos baseados no cálculo das funções dos poços. Oito modelos de cálculo de funções foram analisados e agrupados na construção de um programa computacional que fornece, como resultado final, os rebaixamentos, quer nos poços, quer nos nós de uma malha pré-definida. O estudo de poços isolados é outra opção do programa, permitindo tanto o cálculo dos rebaixamentos em pontos situados a várias distâncias do poço bombeado quanto a evolução desses rebaixamentos com o tempo.

2 – OBJETIVOS

A utilização de modelos em águas subterrâneas permite testar várias formas de gerenciamento desse recurso e prever o efeito de certas ações. Na prática, há disponibilidade de uma série de programas computacionais utilizados para estimar o escoamento das águas subterrâneas. Os programas numéricos são os mais divulgados e, por consequência, mais amplamente utilizados. Todavia, muitas vezes o emprego desses programas requer do usuário estudos intensivos e conhecimentos na área da matemática computacional.

A utilização de programas numéricos tem demonstrado sua viabilidade na estimativa de escoamentos em grandes escalas de área. Contudo, quando se quer analisar regiões menores, os resultados desses programas são, no mínimo, questionáveis. Como exemplo, podem-se citar os rebaixamentos avaliados no próprio poço, que apresentam valores aquém daqueles verificados em campo.

Diante de fatores como estes, o objetivo principal deste trabalho foi a produção de um programa computacional para avaliação de rebaixamentos em sistemas de poços tubulares. A simplicidade de utilização, tanto em termos de entrada dos dados, quanto em termos de apresentação dos resultados, foi também uma meta importante, tornando o programa mais amigável ao usuário. Para isto, todos os procedimentos foram construídos dentro do EXCEL 7.0, utilizando a linguagem de programação Visual Basic.

A adoção do programa na prática do abastecimento de água também faz parte do escopo deste trabalho. Seus resultados fornecem importantes diretrizes acerca da operação de sistemas de poços, constituindo uma alternativa módica e interessante para tomadas de decisões quanto aos efeitos da introdução de novos poços no sistema.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo resume, além dos conceitos básicos e da definição de termos relevantes utilizados neste trabalho, alguns estudos realizados na área de hidráulica de poços.

3.1 – Aquífero, Aquitarde e Aquiclude

De acordo com KRUSEMAN e DE RIDDER (1990), as formações subterrâneas podem ser divididas em três tipos, de acordo com a facilidade de fornecer água explotável.

Um aquífero é definido como uma unidade geológica saturada, permeável o bastante para fornecer econômicas quantidades de água aos poços de extração.

Um aquitarde é uma unidade geológica permeável o suficiente para transmitir quantidades significativas de água em grandes áreas e longos períodos de tempo. Contudo, um aquitarde possui permeabilidade incapaz de justificar poços de produção situados nele. Por isso aquitardes são considerados formações semi-permeáveis.

Um aquiclude é uma unidade geológica impermeável, praticamente incapaz de transmitir água. Na natureza, todavia, meios verdadeiramente impermeáveis raramente ocorrem, havendo transmissão de água em alguns pontos da extensão total da formação. Na prática, entretanto, as unidades geológicas podem ser classificadas como aquicludes quando suas permeabilidades possuem ordens de grandeza bem menores que as permeabilidades de aquíferos adjacentes.

3.2 – Tipos de Aquífero

Segundo KRUSEMAN e DE RIDDER (1990), os aquíferos podem ser divididos em três tipos principais: confinado, não confinado e semi-confinado.

Um aquífero confinado é limitado acima e abaixo por um aquíclode. Num aquífero confinado a pressão da água é geralmente superior à pressão atmosférica e a superfície piezométrica situa-se acima do topo da formação.

Um aquífero não confinado é limitado abaixo por um aquíclode, mas não possui nenhuma camada confinante superior. O limite superior é atribuído à superfície piezométrica e a pressão no topo da formação equivale à pressão atmosférica.

Um aquífero semi-confinado, é uma formação limitada por aquítarde, ou por um aquítarde e um aquíclode. A superfície piezométrica é livre para se mover através dos aquítarde.

3.3 – Anisotropia e Heterogeneidade

Figura 3.1 – Esquema dos aquíferos quanto às condições de anisotropia e heterogeneidade.

A maioria das equações na hidráulica de poços são baseadas na consideração de que os aquíferos e aquitardes são homogêneos e isotrópicos. Isto significa que a condutividade hidráulica é a mesma em todas as direções através da formação geológica (figura 3.1.A). As partículas individuais de um meio, contudo, raramente são esféricas e, em condições saturadas, elas geralmente depositam-se sobre as faces planas das outras partículas. Este efeito faz com que a condutividade vertical seja geralmente menor que a condutividade horizontal, gerando o fenômeno da anisotropia (figura 3.1.C). A litologia da maioria dos meios tende a variar significativamente nas direções horizontal e vertical. Consequentemente as formações geológicas tendem a ser heterogêneas. Esta heterogeneidade pode ocorrer quando o aquífero é composto por camadas de diferentes condutividades (figura 3.1.B) ou quando as dimensões e forma de depósito das partículas geram condutividades diferentes nas inúmeras direções horizontais.

3.4 – A lei de Darcy

A lei de Darcy estabelece que a taxa de fluxo através de um meio poroso é proporcional à perda de carga e inversamente proporcional ao comprimento da trajetória de escoamento. Assim:

$$V = -k \cdot \frac{dh}{dl} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, $V = Q/A$ representa a descarga específica, também conhecida como velocidade de Darcy, Q é a vazão de escoamento e A é a área da seção transversal à direção do fluxo. A diferença $-dh = h_2 - h_1$ representa a perda de carga medida entre dois pontos (1 e 2), sendo o valor dl a distância entre estes dois pontos. A razão $dh/dl = i$ é comumente chamada de gradiente hidráulico ou perda de carga unitária e k representa uma constante de proporcionalidade chamada de condutividade hidráulica do meio poroso.

A lei de Darcy também pode ser escrita como:

$$Q = k \cdot \frac{-dh}{dl} \cdot A \quad (3.2)$$

Convém citar que o conceito de descarga específica assume que o movimento da água ocorre através de todo meio poroso. A grande vantagem desta idéia é que a velocidade pode ser facilmente medida. Contudo, esta velocidade deve ser diferenciada das velocidades microscópicas através das várias trajetórias do meio poroso.

Experimentos têm mostrado que a lei de Darcy é válida para números de Reynolds menores que 1, não ocorrendo, todavia, erros tão significativos até números de Reynolds próximos a 10. Assim, este valor representa o limite máximo de validade da lei de Darcy. Como a maioria dos escoamentos subterrâneos ocorre com Reynolds menores que 1, a lei de Darcy é eficaz. Apenas em situações excepcionais, como escoamentos em rochas com fendas de grande diâmetro ou na proximidade do poço bombeado, o critério de fluxo laminar é contrariado. A lei de Darcy também é inválida nos escoamentos com baixos gradientes (dh/dl), como pode ocorrer em solos argilosos compactos. Para baixos valores de dh/dl , a relação entre descarga específica (Q) e perda de carga unitária (dh/dl) deixa de ser linear. É impossível estimar um único gradiente que sirva de limite inferior para aplicação da lei de Darcy, porque os valores de dh/dl variam com o tipo e estrutura do solo argiloso, enquanto que os componentes minerais da água também devem ser levados em conta (de MARSILY, 1986).

3.5 – Propriedades Físicas dos Aquíferos

Nas equações que descrevem o escoamento em direção a um poço bombeado, várias propriedades físicas e parâmetros do aquífero ou do aquitarde apresentam grande relevância. Tais propriedades serão esclarecidas nos itens seguintes.

3.5.1 – Condutividade Hidráulica (k)

A condutividade hidráulica é a constante de proporcionalidade da lei de Darcy (equação 3.1). Ela é definida como a vazão de água que escoar através do meio poroso por unidade de perda de carga unitária através de uma seção unitária transversal à direção do escoamento.

A tabela 3.1 resume as magnitudes dos valores de k para diferentes materiais.

Tabela 3.1 - Valores de k para diferentes formações (BOUWER, 1978)

classificação geológica	k (m/d)
materiais não consolidados:	
argila	$10^{-8} - 10^{-2}$
areia fina	1 - 5
areia média	$5 - 2 \times 10^1$
areia grossa	$2 \times 10^1 - 10^2$
cascalho	$10^2 - 10^3$
mistura de areia e cascalho	$5 - 10^2$
mistura de areia, cascalho e argila	$10^{-3} - 10^{-1}$
material consolidado:	
arenito	$10^{-3} - 1$
argila xistosa	10^{-7}
rocha fraturada ou desgastada	$0 - 3 \times 10^2$
rocha vulcânica	$0 - 10^3$

3.5.2 – Transmissividade (T)

A transmissividade é o produto da condutividade hidráulica do meio pela espessura saturada do aquífero. Consequentemente, a transmissividade é a vazão de água que escoar através de uma faixa vertical de largura unitária e espessura igual à da camada saturada quando o gradiente hidráulico é unitário. Assim, a transmissividade indica quanta água pode mover-se através da formação aquífera.

3.5.3 – Armazenamento Específico (Ss)

O armazenamento específico é o volume de água que um volume unitário do aquífero libera do armazenamento sob um declínio unitário de pressão. Esta libertação de água do armazenamento sob condições de diminuição de pressão

origina-se da compactação do aquífero devido ao aumento de tensão efetiva e da expansão da água devido ao decréscimo de pressão.

3.5.4 – Coeficiente de Armazenamento ou Armazenabilidade (S)

A armazenabilidade corresponde ao produto do armazenamento específico (Ss) pela espessura saturada do aquífero. Este parâmetro pode ser definido como o volume de água que sai ou que entra no aquífero, por unidade de área horizontal do mesmo e por unidade de variação de rebaixamento. Assim, a armazenabilidade indica quanta água pode ser removida da formação por bombeamento ou por drenagem.

Quando se começa a bombear um poço e antes do cone atingir uma área de recarga, o poço só fornece água de armazenamento. Assim, o cone de depressão cresce até capturar um volume de água igual ao volume bombeado. A expansão do cone e sua profundidade apresentam variação decrescente com o tempo. Isso ocorre porque, a cada unidade de expansão horizontal, passa-se a dispor de maior volume de água armazenada.

3.5.5 – Rendimento ou Produção Específica (Sy)

A produção específica é o volume de água que um aquífero não confinado libera do armazenamento, por unidade de área superficial do aquífero, por unidade de declínio da superfície piezométrica. Os valores de produção específica variam de 0,01 a 0,30 e são muito maiores que a armazenabilidade dos aquíferos confinados (KRUSEMAN e DE RIDDER, 1990). Nas formações não confinadas, os efeitos da elasticidade da matriz do aquífero e da água são, geralmente, desprezíveis. A produção específica é geralmente chamada de porosidade efetiva. Pequenos interstícios não contribuem para a porosidade efetiva porque as forças de retenção nestes poros são bem maiores que o peso da água. Assim, a drenagem por gravidade não consegue liberar a água dos pequenos interstícios.

3.5.6 – Rebaixamento (s)

A redução de nível ou de pressão que se efetua em um ponto qualquer do cone de depressão e no próprio poço, denomina-se rebaixamento nesse ponto.

3.6 – Métodos Analíticos e Numéricos para Escoamentos Subterrâneos

Modelos matemáticos relacionados ao escoamento das águas subterrâneas têm sido utilizados desde o século XIX. Um modelo matemático consiste em um conjunto de equações que visam governar o fluxo das águas subterrâneas. O grau de confiança em determinado modelo depende do quanto ele aproxima suas previsões às situações de campo. Inevitavelmente considerações simplificadoras devem ser tomadas para a construção de um modelo, porque as condições reais são demasiado complexas para serem simuladas com exatidão.

Geralmente as considerações necessárias à resolução analítica de um modelo matemático são bastante restritivas. Por exemplo, muitas soluções analíticas requerem que o meio seja homogêneo e isotrópico. Aquíferos heterogêneos e isotrópicos são simulados usando a média de suas características hidráulicas. Modelos analíticos requerem dimensões uniformes para a camada aquífera. Para se obter esta exigência, as variações na extensão superficial do aquífero são convertidas de forma a se obter uma área uniforme equivalente. Da mesma forma, os contornos e descontinuidades são idealizados para se adaptarem a formas geométricas mais elementares. Em outros casos, modelos analíticos mais complexos apresentam considerações que põem em dúvida a veracidade de suas soluções.

A vantagem principal dos métodos analíticos sobre as técnicas convencionais de diferenças e elementos finitos é que não há necessidade de discretizar o domínio do escoamento. Assim, pode-se, por exemplo, representar o escoamento nas proximidades do poço e, da mesma forma, representar características do escoamento regional a distâncias consideráveis do mesmo.

Desde a década de 60, quando os computadores se tornaram mais disponíveis, formas aproximadas através de técnicas numéricas têm sido amplamente utilizadas nos estudos de águas subterrâneas. Atualmente, a

facilidade de acesso aos computadores faz com que a maioria dos modelos utilizados sejam numéricos. Nos modelos numéricos, as equações diferenciais parciais são aproximadas a um conjunto de equações discretas no tempo e no espaço. A área de estudo do aquífero é subdividida em grande número de elementos discretos. O tempo é discretizado em pequenos incrementos e uma equação algébrica, ou conjunto de equações, é escrita para cada elemento e incremento de tempo. O Método das Diferenças Finitas é talvez a aproximação numérica mais difundida. Nesse método, a área analisada é dividida em elementos discretos retangulares, sendo escritas equações de diferenças finitas em função da carga piezométrica nos nós da malha do modelo. Outra aproximação bastante utilizada consiste no Método dos Elementos Finitos. Nesse método, a região é dividida numa rede de elementos e uma solução é proposta para o escoamento de água subterrânea em cada elemento.

Os métodos numéricos, por aproximarem as soluções através de discretizações do tempo e do espaço, apresentam algumas desvantagens. A subjetividade nessas divisões pode comprometer os resultados. Outra desvantagem dos métodos numéricos tradicionais reside na solução para o escoamento da água subterrânea. Essa solução é definida em função da carga hidráulica nos nós dos elementos. Assim, a carga em outros locais tem que ser estimada ou interpolada, resultando numa falta de continuidade na definição da superfície piezométrica e num traçado impreciso das linhas de fluxo. Problemas como esses podem ser minimizados através do refinamento da malha numérica. Em contrapartida, esse procedimento pode acarretar tempos de processamento e esforços computacionais excessivos.

3.7 – Estudos de Soluções Numéricas

Uma vez que os métodos analíticos são freqüentemente restritos a domínios de geometrias mais simples, os métodos numéricos assumem grande interesse na estimativa do escoamento subterrâneo. As técnicas numéricas mais empregadas em águas subterrâneas são o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos.

O Método das Diferenças Finitas é adequado para resolver problemas de escoamento regional em aquíferos. Esse método pode ser utilizado para problemas em uma, duas ou três dimensões, permitindo ainda simular sistemas de múltiplas camadas. Na prática, o Método das Diferenças Finitas discretiza o domínio em malhas geometricamente simples como quadrados, retângulos ou paralelepípedos retangulares nos problemas tridimensionais. Essa técnica pode considerar a heterogeneidade do meio, contanto que a forma dessas regiões de heterogeneidade possam ser adequadamente descrita pela geometria das malhas. A anisotropia, em termos práticos, deve ser limitada a direções paralelas aos lados das malhas.

O Método dos Elementos Finitos geralmente é mais complexo que o Método das Diferenças Finitas, podendo ainda requerer maiores tempos de processamento computacional. Apesar disso, há mais flexibilidade quanto às geometrias das malhas. Na prática, triângulos ou quadriláteros são utilizados em duas dimensões, enquanto que tetraedros ou paralelepípedos são adotados para problemas tridimensionais. Isso possibilita descrever de maneira mais precisa os contornos e heterogeneidades do meio. A anisotropia pode ser considerada em qualquer direção e ainda variável com o tempo.

PRICKETT e LONNQUIST (1971) e TRESCOTT et al. (1976) desenvolveram modelos em diferenças finitas largamente utilizados para resolver problemas de escoamentos bidimensionais. Ambos os modelos podem ser aplicados em aquíferos anisotrópicos e heterogêneos..

CROWE et al. (1999) apresentaram um algoritmo para gerar malhas de elementos finitos em aquíferos não confinados e heterogêneos. O algoritmo calcula a posição do nível freático, a formação de regiões de percolação e a distribuição da carga hidráulica no aquífero. Essa aproximação considera somente a porção saturada da formação, ou seja, a região situada abaixo do nível freático. A malha numérica varia ao longo do domínio de escoamento, reduzindo erros gerados por uma malha fixa.

SZÉKELY et al. (2000) desenvolveram um modelo numérico em diferenças finitas, o simulador FLOW. O programa FLOW simula o escoamento subterrâneo em aquíferos submetidos a sistemas de poços. Esse programa admite certas características locais do sistema, tais como formações descontínuas e poços

com diferentes seções filtrantes. As malhas propiciam uma discretização retangular do domínio heterogêneo do escoamento e podem ser refinadas em qualquer lugar de interesse, assumindo desde escalas regionais até escalas locais. Teoricamente, uma seqüência infinita de setores com diferentes refinamentos pode ser introduzida. Assim, o modelo admite malhas com discretizações regionais, geralmente mais grosseiras, e discretizações refinadas, nas proximidades dos poços.

OSNES e LANGTANGEN (1998) apresentaram um método numérico para resolver problemas estocásticos de escoamentos em meios porosos. Esse método é baseado em técnicas de elementos finitos e não exige malhas numéricas tão refinadas. Dessa forma, há uma diminuição no esforço computacional requerido.

Um pacote da IBM PC BASIC é distribuído pela International Groundwater Modeling Center com o nome de BAS 23. Esses programas utilizam diferenças finitas e elementos finitos para simular situações de escoamento bidimensional em regime permanente e não permanente em aquíferos não homogêneos, além de simular escoamento através de barragens, transporte de contaminantes e intrusão de água salgada.

Modelos mais populares incluem o MODFLOW, MOC e SUTRA que são disponíveis comercialmente. Com o aumento na aplicação de técnicas de modelagem numérica ocorrido nos últimos vinte anos, os programas USGS-MODFLOW, MODPATH e MT3D estabeleceram-se como os mais utilizados para modelagem tridimensional de escoamento, linhas de fluxo e transporte para águas subterrâneas. Atualmente, os programas com interface gráfica, tais como o Visual MODFLOW da Waterloo Hydrogeologic, têm revolucionado a forma de aplicação destes programas. Seu ambiente de modelagem gráfica combina o MODFLOW, MODPATH e MT3D a uma interface gráfica para a entrada de dados, execução de simulação, calibração do modelo e visualização dos resultados.

A avaliação dos resultados de programas como o MODFLOW, por exemplo, indicam que para uma simulação mais real de campos de poços, melhorias nos modelos e nas técnicas computacionais são ainda necessárias.

Dentre essas melhorias, pode-se citar um maior detalhamento da região próxima aos poços. Outro fator é que o programa precisa considerar e avaliar o escoamento dirigido a poços com diferentes penetrações de filtros (SZÉKELY et al., 2000).

3.8 – Estudos de Soluções Analíticas

THEIS (1935) foi o primeiro a desenvolver uma fórmula, para escoamento subterrâneo transiente, que introduz o fator tempo e a armazenabilidade. De acordo com Theis, quando um poço bombeia, com vazão constante, um aquífero confinado e de extensão infinita, a influência da descarga varia com o tempo. A taxa de declínio da carga piezométrica, multiplicada pela armazenabilidade e integrada sobre a área de influência é igual à vazão produzida pelo poço. A fórmula de Theis, largamente empregada no cálculo analítico dos rebaixamentos em sistemas confinados, é derivada de uma analogia entre o escoamento de água subterrânea e a condução de calor, e pode ser escrita como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad (3.3)$$

onde:

- s = rebaixamento a uma distância r do poço bombeado;
- Q = vazão produzida pelo poço;
- T = transmissividade do aquífero;
- $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$;
- S = armazenabilidade do aquífero;
- t = tempo desde o início do bombeamento.

A integral exponencial, escrita simbolicamente como $W(u)$, é conhecida como função de poço de Theis e denota o rebaixamento adimensional, enquanto que o argumento u denota o tempo adimensional. A função de Theis não pode ser avaliada analiticamente em termos de funções elementares e uma série de

procedimentos numéricos são utilizados para sua aproximação. TSENG (1998) realizou uma revisão dos métodos mais relevantes na avaliação da integral exponencial, destacando as propriedades básicas e as limitações de cada um. Os métodos revisados abrangiam expansão de séries, expansão assintótica, fração continuada, aproximações polinomiais, relações de recorrência e quadratura numérica. Nesse mesmo estudo, o autor apresentou um algoritmo para o cálculo da função de Theis.

O procedimento de cálculo da integral exponencial utilizado neste trabalho reúne os métodos de expansão de séries combinado com o método das aproximações polinomiais, como indica o capítulo 4.

HANTUSH (1967) apresentou um estudo analítico de aquíferos semi-confinados. Dessa maneira, soluções para vários problemas em aquíferos adjacentes a aquíferos foram obtidas, considerando a transmissão de água na interface aquífero/aquífero como uma condição de contorno. Uma das principais considerações referiu-se às condutividades hidráulicas das camadas semi-permeáveis que foram reputadas pequenas quando comparadas às condutividades dos aquíferos principais (ver item 4.2.3.1). Essa condição tem ocorrência comum na natureza. Assim, o escoamento foi considerado essencialmente vertical nos aquíferos e praticamente horizontal nos aquíferos.

NEUMAN (1972) apresentou um modelo analítico para caracterizar o escoamento em direção a um poço situado num aquífero não confinado. Esse modelo forneceu uma possível explicação para a resposta atrasada do nível freático. A aproximação de Neuman levou a soluções que representam desde o estágio incipiente de bombeamento até estágios mais avançados, sem utilizar constantes empíricas e sem recorrer à teoria do escoamento em meios não saturados. O autor defendeu que a compressibilidade do aquífero pode ser um fator muito mais importante que o escoamento não saturado acima do nível freático. Essa formulação tratou o nível freático como uma condição de contorno móvel e o aquífero como um sistema compressível. A água é então liberada do armazenamento por compactação do meio, expansão do fluido e drenagem gravitacional na superfície freática. Neuman linearizou as equações diferenciais que governam o escoamento, utilizando técnicas de perturbação e transformadas

de Laplace e de Hankel, obtendo uma solução de primeira ordem para o rebaixamento em função do tempo. Essa linearização é válida quando o rebaixamento da superfície piezométrica é pequeno em relação à espessura saturada do aquífero, permitindo ainda a aplicação da superposição de efeitos para qualquer número de poços no aquífero. A natureza tridimensional da aproximação de Neuman possibilitou aplicar sua teoria aos casos de penetração parcial de poços (NEUMAN, 1974).

BOULTON e STRELTSOVA (1975) utilizaram uma aproximação semelhante à de NEUMAN (1972), indicando um consenso entre esses autores no que diz respeito ao modelo matemático que descreve o escoamento em aquíferos não confinados. Assim, desenvolveram equações analíticas levando em conta fatores como a compressibilidade e anisotropia do aquífero principal, a penetração parcial do poço de observação, a presença de um aquitarde acima do aquífero e zonas saturadas e não saturadas acima da superfície piezométrica inicial.

Quando a taxa de bombeamento é elevada ou a transmissividade do aquífero é pequena, a superfície piezométrica pode declinar abaixo da base da camada confinante, ocorrendo a conversão de uma condição artesianas para uma condição de não confinamento. Essa conversão ocorre instantaneamente a uma determinada distância do poço bombeado, havendo a distinção entre as duas regiões. MOENCH e PRICKETT (1972) propuseram uma fórmula analítica para casos de escoamento num aquífero com regiões não confinadas e confinadas. Sua formulação considera o bombeamento de um poço totalmente penetrante num aquífero homogêneo, isotrópico e infinito.

SALEEM e JACOB (1974) apresentaram um trabalho relacionado com a distribuição dos rebaixamentos causados por sistemas de poços em aquíferos duplos de extensão infinita. A solução para o problema foi obtida pela modificação na transformada de Hankel de ordem zero. O objetivo desse trabalho foi desenvolver soluções analíticas para os rebaixamentos causados por um sistema de poços num aquífero infinito, duplo e separado por um aquitarde. Assim (como em todos os estudos analíticos), uma série de considerações foram adotadas. Assumiram-se aquíferos individualmente homogêneos, isotrópicos, de espessura uniforme e inclinação desprezível. A condutividade hidráulica e a

armazenabilidade dos aquíferos foram consideradas constantes no tempo e no espaço. A armazenabilidade do aquífero foi julgada desprezível e a diferença, entre as condutividades do aquífero e do aquífero, considerada tão grande que o escoamento torna-se essencialmente vertical no aquífero e horizontal nos aquíferos. Esse modelo pode ainda abranger casos de escoamento permanente, fazendo o tempo tender ao infinito nas equações analíticas.

DAWSON e ISTOK (1991) reuniram em seu livro dezenove modelos analíticos, descrevendo as formulações e considerações dos mesmos. Este trabalho fornece uma apreciável exposição dos principais modelos analíticos existentes na literatura.

HAITJEMA (1985) propôs um método baseado na superposição de soluções analíticas aproximadas para escoamento em aquíferos confinados e infinitos. Nas proximidades dos poços parcialmente penetrantes o escoamento foi considerado tridimensional, apresentando as componentes vertical e horizontal. A grandes distâncias dos poços adotou-se a suposição de Dupuit-Forchheimer e o escoamento foi considerado horizontal. Consequentemente, a distâncias maiores dos poços, as soluções tridimensionais foram substituídas por soluções bidimensionais, o que contribuiu para um incremento na eficiência computacional do modelo. Isso pode ocorrer porque o escoamento nessas regiões assume características bidimensionais, uma vez que podem ser consideradas desprezíveis as componentes verticais de velocidade. Numa escala regional, onde a espessura do aquífero é pequena em relação à sua extensão lateral, o escoamento vertical pode ser ignorado (consideração de Dupuit-Forchheimer). Assim, um sistema regional pode ser simulado de uma maneira mais simplificada, considerando escoamento em três ou em duas dimensões para certos setores, dependendo da sua proximidade a particularidades do sistema, como poços parcialmente penetrantes, por exemplo. A adoção de modelos tridimensionais para pontos muito distantes dos poços, pode ser uma medida, embora exata, dotada de zelo excessivo e inapropriada em termos computacionais.

A superposição de soluções analíticas consiste no fundamento do Método dos Elementos Analíticos (MEA). Esse método foi desenvolvido para a modelagem matemática do escoamento de água subterrânea em sistemas

regionais. A solução é obtida pela combinação das influências de elementos individuais, representados por funções analíticas correspondentes às características do aquífero. GOMES e de CASTRO (2001) apresentaram um interessante trabalho, resumindo os princípios do Método dos Elementos Analíticos. Nesse trabalho, os autores também citaram uma série de programas que utilizam esse método, dentre eles o SLAEM (Single Layer Analytic Element Method), o MLAEM (Multi-Layer Analytic Element Method), o GFLOW1 (HAITJEMA, 1995), o MLWL (STRACK, 1989) e o SPLIT (JANKOVIC, 2001).

LUTHER e HAITJEMA (1999) apresentaram uma solução em elementos analíticos na modelagem de escoamentos permanentes em direção a poços parcialmente penetrantes situados em aquíferos não confinados. Assim, esses autores mostraram que a superfície freática, nas adjacências de poços parcialmente penetrantes, pode ser determinada através de um processo iterativo que utiliza o método dos elementos analíticos. LUTHER e HAITJEMA (2000) estenderam a mesma técnica de solução para incluir múltiplos poços verticais e horizontais. Essas soluções foram combinadas com modelos regionais bidimensionais. As soluções tridimensionais utilizaram singularidades distribuídas (elementos analíticos) para cumprir as condições de contorno na superfície freática e regiões de percolação nos poços.

Quando a água é retirada de um aquífero num sistema regional, um estado permanente de escoamento é alcançado com o tempo. Esse estado caracteriza-se pela estabilização dos rebaixamentos, os quais não mais se alteram com o passar do tempo. Nessa condição, um cone de depressão fixo é delineado. O cone de depressão é normalmente descrito na literatura das águas subterrâneas como zona ou curva de captura. A curva de captura consiste de uma linha equipotencial que passa por pontos de estagnação, onde a velocidade da água subterrânea é nula. SHAN (1999) apresentou uma solução analítica para calcular o cone de depressão, causado por dois poços totalmente penetrantes, num aquífero confinado, homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme. Essa solução, apesar de ser flexível quanto à locação dos poços, demonstrou-se bastante restritiva quanto à taxa de bombeamento. Assim, os poços podem ser arbitrariamente locados na área analisada, porém restritos a apresentarem a mesma vazão.

UPADHYAYA E CHAUHAN (2001) obtiveram uma solução analítica linearizada para a variação do nível freático num aquífero não confinado, horizontal e situado entre dois canais. Essa solução adaptou as situações de infiltração, devido aos canais, e recarga variável com o tempo, devido à precipitação. Algumas considerações foram adotadas, visando simplificar e formular o problema físico em termos matemáticos. Assim, o aquífero foi concebido como homogêneo, isotrópico e com propriedades hidráulicas invariantes com o tempo. Também considerou-se a taxa de recarga pequena quando comparada à condutividade hidráulica do aquífero. Essa restrição faz com que o escoamento vertical da água percolada seja praticamente horizontal ao encontrar a porção saturada do aquífero.

BAKKER (2001) apresentou uma solução analítica aproximada para modelar o escoamento tridimensional em direção a poços parcialmente penetrantes. Essa solução foi alcançada dividindo o aquífero em camadas, de forma a obter um sistema de equações diferenciais resultante que considera o escoamento em aquíferos múltiplos. Nota-se que há uma discretização vertical do aquífero. Esse processo de discretização é uma característica comum nos modelos numéricos. A acurácia das soluções aumenta com o número de camadas. Contudo, esse modelo fornece estimativas satisfatórias para uma discretização do aquífero em três camadas apenas. O modelo de Bakker também permite simular escoamentos em direção a poços totalmente penetrantes, sendo aplicável a aquíferos isotrópicos ou anisotrópicos, confinados ou não confinados. Outra característica é que a solução pode ser obtida nas proximidades do poço, estimando de maneira mais acurada os efeitos da penetração parcial.

Os modelos utilizados no programa computacional apresentado neste trabalho são analíticos e têm como fundamento as funções integrais de poços. Uma descrição mais detalhada dessas formulações é apresentada no Capítulo 4 (item 4.2).

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Considerações Preliminares

O Microsoft EXCEL, versão 7.0, apresenta como uma de suas ferramentas a linguagem de programação Visual Basic. Essa linguagem, empregada dentro de um outro programa, também recebe o nome de Visual Basic for Applications (VBA), sendo largamente utilizada na construção de macros. O VBA utiliza o Visual Basic aplicado aos objetos do EXCEL.

O objetivo das macros no EXCEL é reduzir o número de operações repetitivas por parte do usuário. No presente trabalho, elas compõem todo o programa, automatizando e conduzindo os cálculos mediante simples operações de teclado e mouse.

Os modelos analíticos utilizados no cálculo dos rebaixamentos são todos baseados em funções de poços. Dessa maneira, estima-se o rebaixamento que um poço ativo causa num determinado ponto, representado por um poço de observação, situado a uma distância conhecida do ponto de produção. Os rebaixamentos são calculados pela multiplicação de uma constante ($Q/4\pi T$) pela função de poço W . Oito modelos de funções foram utilizados e apresentam-se no programa como opções, selecionadas de acordo com a situação de cada poço bombeado em relação ao aquífero. As formulações desses modelos serão apresentadas nos itens seguintes.

Todos os modelos levam em conta escoamentos em regime não permanente. Isto significa que os níveis piezométricos, no poço bombeado e vizinhança, variam com o tempo. A influência do tempo nos rebaixamentos representa uma das mais importantes conceituações do programa e será discutida com mais detalhes no item 4.4.

Outra abstração de grande importância e largamente empregada no programa é a superposição de efeitos que também será discutida no item 4.5.

A resolução da maioria dos modelos requer integração numérica de funções, uma vez que o cálculo analítico dessas integrais é impossível de ser feito. A solução numérica de uma integral é também chamada de quadratura. No presente trabalho as quadraturas foram baseadas nas fórmulas de Newton-Côtes, utilizando-se a regra de Simpson (1/3).

O cálculo das funções de poços dos modelos não confinados requer utilização de métodos numéricos para obtenção de zeros de funções. Este trabalho adotou a regra de Newton-Raphson.

A partir do item 4.6 serão discutidas as opções do programa e as formas de melhor utilizá-las.

4.2 – Modelos de Funções de Poços

4.2.1 – Modelo 1 : Transiente, Confinado

4.2.1.1 – Modelo Conceitual

Figura 4.1 - Corte do terreno

Da Figura 4.1 podem-se definir os seguintes termos:

- k = condutividade hidráulica do aquífero, LT^{-1} ;
- m = espessura saturada do aquífero, L ;
- Q = vazão de bombeamento, L^3T^{-1} ;
- r = distância radial do poço bombeado a um ponto do cone de depressão, medida a partir do centro do poço, L ;
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento, L ;
- S = armazenamento do aquífero, adimensional.

Antes de apresentar as formulações deste modelo, convém citar as considerações nas quais elas se baseiam:

- O aquífero é limitado acima e abaixo por aquicludes;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente em direção radial ao poço;
- A superfície piezométrica inicial (antes do início do bombeamento) é horizontal e se estende infinitamente em direção radial ao poço;
- O aquífero é homogêneo e isotrópico;
- A água subterrânea apresenta densidade e viscosidade constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- As linhas de fluxo são horizontais e dirigidas ao poço em direção radial;
- Os poços bombeado e de observação possuem filtros que penetram toda camada saturada do aquífero;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga nos filtros e na entrada da bomba são tomadas como desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;
- O aquífero é compressível e elástico.

4.2.1.2 – Equacionamento

A equação que governa o escoamento nessa situação é obtida a partir de uma combinação entre a Lei de Darcy e o princípio da conservação de massa num sistema de coordenadas radial. Tal equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} = \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.1)$$

onde:

$$T = \text{transmissividade do aquífero}, [L^2 T^{-1}] \quad T = k \cdot m \quad (4.2)$$

t = tempo de bombeamento [T].

A equação acima ainda admite as seguintes condições de contorno:

- Antes do início do bombeamento os rebaixamentos são nulos em qualquer ponto na vizinhança do poço;
- Numa distância infinita do poço, após o início do bombeamento, os rebaixamentos também são nulos;
- O escoamento da água em direção ao poço é constante e uniforme na espessura saturada do aquífero.

A solução da equação (4.1) foi obtida por THEIS (1935). O rebaixamento em qualquer tempo e a qualquer distância radial do poço bombeado é dado por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u) \quad (4.3)$$

$$\text{onde:} \quad W(u) = \int_u^\infty \left(\frac{e^{-u}}{u} \right) du \quad (4.4)$$

$$\text{e:} \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4.5)$$

Os valores da função $W(u)$ podem ser aproximados por séries que dispensam a resolução numérica da equação (4.4). A série abaixo é a mais

difundida na literatura e a função de Theis pode ser expressa por (STEGUN e ZUCKER, 1974):

$$W(u) = -0,577216 - \ln(u) + u - \frac{u}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (4.6)$$

Esta série fornece bons resultados para $u \leq 1$. Para $u > 1$, outra série aproxima a função de Theis :

$$W(u) = \left[(u^4 + a_1 u^3 + a_2 u^2 + a_3 u + a_4) / (u^4 + b_1 u^3 + b_2 u^2 + b_3 u + b_4) \right] / [u \cdot e^u] \quad (4.7)$$

onde:

$a_1 = 8,5733287601$	$b_1 = 9,5733223454$
$a_2 = 18,0590169730$	$b_2 = 25,6329562486$
$a_3 = 8,6347608925$	$b_3 = 21,0996530827$
$a_4 = 0,2677737343$	$b_4 = 3,9584969228$

A variação da função de poço em relação ao adimensional u é mais claramente visualizada pelos gráficos a seguir:

Gráfico 4.1 - Valores de $W(u)$ para $u \leq 1$

Gráfico 4.2 - Valores de $W(u)$ para $u > 1$

A função de Theis é também utilizada nos outros modelos de aquífero confinado, como será visto mais adiante.

Embora largamente disseminado na literatura de águas subterrâneas, este primeiro modelo dificilmente ocorre em situações práticas de exploração, uma vez que, fora em aquíferos de pequena espessura, é rara a ocorrência de poços totalmente penetrantes. A hipótese de isotropia leva à adoção de condutividades iguais nas direções radial e vertical, e isto pode, também, não se verificar em condições de campo.

4.2.1.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Dados de entrada:

- do aquífero : m , k , S ;
- dos poços e operacionais: r , t .

Cálculo de T : $T = k \cdot m$ (equação (4.2));

Cálculo de u : $u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$ (equação (4.5));

Cálculo de $W(u)$:

Se $u \leq 1$ então :

$W(u)$: equação (4.6), senão

$W(u)$: equação (4.7).

Fim.

4.2.2 – Modelo 2 : Transiente, Confinado, Penetração Parcial

4.2.2.1 – Modelo Conceitual

Figura 4.2 - Corte do terreno

Convém definir os seguintes termos da figura acima:

- d = distância do topo do aquífero ao topo do filtro do poço, L;
- l = distância do topo do aquífero à base do filtro do poço, L;
- do = distância do topo do aquífero ao topo do filtro do poço de observação, L;
- lo = distância do topo do aquífero à base do filtro do poço de observação, L;
- kr = condutividade hidráulica radial do aquífero, LT^{-1} ;
- kv = condutividade hidráulica vertical do aquífero, LT^{-1} ;
- m = espessura saturada do aquífero, L;
- r = distância radial do centro do poço a um ponto do cone de depressão, L;

- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento, L;
- S = armazenamento do aquífero, adimensional;
- z = distância vertical em relação ao topo do aquífero, L.

Dentre as considerações feitas para este modelo estão:

- O aquífero é limitado no seu topo e na sua base por aquícludes;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente na direção radial;
- A superfície piezométrica, antes do início do bombeamento, é horizontal e se estende infinitamente na direção radial;
- O aquífero é homogêneo e anisotrópico. As condutividades do aquífero nas direções radial e vertical podem ser diferentes;
- A densidade e a viscosidade da água subterrânea são constantes;
- O escoamento da água pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga no filtro e na entrada da bomba são desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;
- O aquífero é compressível e elástico.

4.2.2.2 - Equacionamento

Como no modelo anterior, a equação que governa o escoamento também é obtida de uma combinação entre a Lei de Darcy e o princípio da conservação de massa num sistema radial de coordenadas. Segundo HANTUSH (1964):

$$\left(\frac{kr}{kv}\right)^2 \cdot \left[\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \left(\frac{S}{kv \cdot m} \right) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.8)$$

onde : t = tempo de bombeamento.

Assumem-se como condições de contorno as seguintes:

- Antes do início do bombeamento os rebaixamentos são nulos em qualquer ponto na vizinhança do poço;
- Numa distância infinita do poço bombeado, os rebaixamentos também são nulos;
- Não há escoamento vertical no topo e base do aquífero;
- escoamento da água em direção ao poço bombeado é constante e uniforme na extensão do filtro, sendo este fluxo horizontal na vizinhança do poço.

A solução analítica da equação (4.8) num poço de observação situado a qualquer distância do poço bombeado é (HANTUSH, 1964):

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot kr \cdot m} \right) \cdot [W(u) + f(u, x, d/m, l/m, z/m)] \quad (4.9)$$

onde:

$$u = \frac{r^2 S}{4 \cdot kr \cdot m \cdot t} \quad (4.10)$$

$$x = \frac{r}{m} \cdot \sqrt{\frac{kv}{kr}} \quad (4.11)$$

$$f = \left[\frac{2m}{\pi(l-d)} \right] \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \right) \left[\operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot l}{m} \right) - \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot d}{m} \right) \right] \cos \left(\frac{n\pi \cdot z}{m} \right) \cdot W(u, x) \quad (4.12)$$

$$W(u, x) = \int_u^{\infty} \frac{e^{\left(-y - \frac{x^2}{4y} \right)}}{y} dy \quad (4.13)$$

$W(u)$ é a função de Theis definida no modelo 1 (equações 4.6 e 4.7).

Destas equações pode-se notar que os rebaixamentos são calculados para a coordenada z do poço de observação, medida verticalmente a partir do topo do aquífero. Assim, esta coordenada varia de do a lo que corresponde à extensão do filtro do poço de observação.

Rebaixamentos calculados para $z = do$ são maiores do que aqueles calculados para $z = lo$. Como a pretensão do presente trabalho é estimar o rebaixamento em toda extensão filtrante de poços de observação situados a distâncias conhecidas de um poço bombeado, o rebaixamento médio torna-se mais representativo, pois corresponde ao próprio valor medido em campo (figura 4.3).

Figura 4.3 - Superfície piezométrica média

Para calcular o rebaixamento médio num poço de observação, a equação (4.9) deve ser integrada entre as profundidades filtrantes $z = do$ e $z = lo$ e dividida pela extensão do filtro deste poço ($lo - do$). Assim, o resultado médio é descrito por:

$$s_{\text{médio}} = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot kr \cdot m} \right) \cdot [W(u) + f'(u, x, l/m, d/m, lo/m, do/m)] \quad (4.14)$$

onde:

$$f'(u, x, l/m, d/m, lo/m, do/m) = \frac{2m^2}{\pi^2(l-d) \cdot (lo-do)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot l}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot d}{m} \right) \right] \cdot \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot lo}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot do}{m} \right) \right] \cdot W(u, n\pi x) \quad (4.15)$$

De uma maneira mais simplificada, a equação (4.14) ainda pode ser escrita como:

$$s_{médio} = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot kr \cdot m} \right) \cdot W \text{ (penetração parcial)} \quad (4.16)$$

A introdução das situações de penetração parcial e de condutividades diferentes nas direções horizontal e vertical, faz com que a função de poço para este modelo seja, visivelmente, de resolução mais complicada do que aquela do modelo 1 (função de Theis). Nota-se também que, como foi dito no item anterior, a função de Theis é parte integrante da solução da função para este modelo 2.

4.2.2.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Dados de Entrada:

- do aquífero: m , kr , k_v , S ;
- operacionais: r , t ;
- do poço bombeado: d , l ;
- do poço de observação: do , lo .

Cálculo de T : equação 4.2;

Cálculo de u : equação 4.10;

Cálculo da função de Theis $W(u)$;

Cálculo de x_0 : equação 4.11;

Cálculo de $f'(u, x, l/m, d/m, lo/m, do/m)$ (equação 4.15):

$somatório = 0$

Para $n: 1, \dots, \infty$:

$$A = \left(\frac{1}{n^2} \right) \cdot \left[\operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot l}{m} \right) - \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot d}{m} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot lo}{m} \right) - \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot do}{m} \right) \right]$$

$x = n\pi \cdot x_0$

Cálculo de $W(u, n\pi \cdot x)$ pelo método de Simpson (1/3)

$somatório = A \cdot W(u, n\pi \cdot x) + somatório$;

$$f'(u, x, l/m, d/m, lo/m, do/m) = \frac{2m^2}{\pi(l-d) \cdot (lo-do)} \cdot \text{somat\u00f3rio};$$

Função de poço : $W = W(u) + f'(u, x, l/m, d/m, lo/m, do/m)$.

Fim.

4.2.3 – Modelo 3 : Transiente, Confinado, Aquitarde Superposto ao Aquífero

4.2.3.1 – Modelo Conceitual

Figura 4.4 - Corte do terreno

Em casos como este, o poço não retira água apenas do aquífero, havendo também uma contribuição vertical do aquitarde. Em bacias sedimentares profundas são comuns situações como esta em que o aquífero é apenas uma parte de um sistema com várias camadas.

Convém definir os seguintes termos da figura 4.4:

- k = condutividade hidráulica do aquífero, LT^{-1} ;
- k' = condutividade hidráulica vertical do aquitarde, LT^{-1} ;
- m = espessura do aquífero, L ;

- m' = espessura saturada do aquítarde, L;
- Q = vazão de bombeamento (constante), L^3T^{-1} ;
- r = distância radial do centro do poço bombeado a qualquer ponto da superfície piezométrica, L;
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento, L;
- S = armazenamento do aquífero, adimensional;
- S' = armazenamento do aquítarde, adimensional.

Dentre as considerações do modelo estão as seguintes:

- O aquífero é limitado superiormente por um aquítarde e por uma formação não confinada. A limitação inferior ocorre por um aquíclode;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente na direção radial;
- A superfície piezométrica antes de se iniciar o bombeamento é horizontal e se estende infinitamente na direção radial;
- O aquífero e o aquítarde são homogêneos e isotrópicos;
- A densidade e a viscosidade da água subterrânea são constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- Tanto o poço bombeado quanto o poço de observação possuem filtros totalmente penetrantes no aquífero;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga no filtro e na entrada da bomba são desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;
- O aquífero é compressível e elástico. O aquítarde é incompressível, isto é, nenhuma água é liberada do armazenamento do aquítarde durante o bombeamento.
- O fluxo de água subterrânea no aquítarde é vertical. No aquífero este fluxo é horizontal e dirigido radialmente ao poço.

Para escoamento que passa de um meio de condutividade k' para outro de condutividade k , ocorre uma refração nas linhas de fluxo tal que:

$$\frac{\tan(\theta')}{\tan(\theta)} = \frac{k'}{k} \quad (4.17)$$

onde: θ' = ângulo que as linhas de fluxo fazem com a normal à interface no aquitarde;

θ = ângulo que as linhas de fluxo fazem com a normal à interface no aquífero.

Assim, se a condutividade k' do meio semipermeável (aquitarde) é pequena comparada com a condutividade k do aquífero, ou seja $k / k' > 500$ (HANTUSH, 1964), e desde que, na interface, a componente vertical da velocidade no aquífero não seja desprezível, o escoamento no aquitarde será aproximadamente vertical, isto é, as componentes horizontais de fluxo no meio semipermeável serão tão pequenas que, na prática, elas podem ser desprezadas.

Figura 4.5 - Transição do escoamento na interface aquitarde / aquífero

4.2.3.2 – Equacionamento

O modelo matemático, da mesma forma que nos modelos anteriores, é derivado de combinação entre a Lei de Darcy e o princípio da conservação de massa num sistema de coordenadas radial:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} - \frac{s}{B^2} = \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.18)$$

onde:

t = tempo de bombeamento;

$$T = k \cdot m \quad (\text{equação 4.2}) \quad B = \sqrt{\frac{T \cdot m'}{k'}} \quad (4.19)$$

Recorrendo à Lei de Darcy, pode-se estimar a taxa de escoamento vertical da água subterrânea (vazamento) através do aquitarde. Essa taxa é representada por $s \cdot k' / m'$, onde o gradiente corresponde à mudança de pressão (s) dividido pela trajetória do escoamento (m').

Se o aquitarde é considerado impermeável ($k'=0$), tem-se :

$$B \rightarrow \infty \quad \frac{s}{B^2} = 0$$

Assim, a equação (4.18) reduz-se à equação (4.1), válida para o modelo 1.

Assumem-se como condições de contorno as seguintes:

- Antes do início do bombeamento, os rebaixamentos são nulos em qualquer lugar na vizinhança do poço;
- Após o início do bombeamento, os rebaixamentos são nulos a distâncias infinitas do poço bombeado;
- O escoamento da água em direção ao poço é constante e uniforme sobre a espessura do aquífero.

A solução para a equação diferencial (4.18) foi desenvolvida por HANTUSH e JACOB (1955) e pode ser usada para estimar rebaixamentos quando:

$$t > 30 \cdot r^2 \cdot \left(\frac{S}{T} \right) \left[1 - \left(\frac{10r}{B} \right)^2 \right] \quad \text{e} \quad \frac{m}{B} < 0,1$$

A solução é a seguinte:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u, r/B) \quad (4.20)$$

onde:

$$W(u, r/B) = \int_u^\infty \left(\frac{1}{y} \right) \exp \left[-y - \frac{r^2}{4B^2 y} \right] dy \quad (4.21)$$

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

A equação (4.21) é também chamada de função de poço de Hantush-Jacob.

Os valores de $W(u, r/B)$ podem ser calculados pela série (HUNT, 1983):

$$W(u, r/B) = \sum \frac{E_{n+1}(u)}{n!} \left[-\frac{r^2}{4uB^2} \right]^n \quad (4.22)$$

onde:

$$E_n(u) = \int_1^\infty \frac{e^{-ux}}{x^n} dx \quad (4.23)$$

O valor de $E_1(u)$ equivale ao valor da função de Theis $W(u)$. Dessa maneira, é somente necessário calcular o valor de $E_1(u)$, uma vez que os outros valores podem ser calculados por:

$$E_{n+1}(u) = \left(\frac{1}{n}\right) \left[e^{-u} - u \cdot E_n(u) \right] \quad \text{com } n=1,2,3,\dots \quad (4.24)$$

4.2.3.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Dados de entrada:

- do aquífero: m, k, S ;
- do aquitard : m', k' ;
- do poço e operacionais: r, t .

Cálculo de $T = k \cdot m$ (equação 4.2);

Cálculo de u (equação 4.5);

Cálculo de B (equação 4.19);

Cálculo da função de Theis $W(u)$;

Cálculo da função do poço:

$$E_n = W(u);$$

Para $n=1,\dots,(\infty - 1)$:

$$E_{n+1} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left[e^{-u} - u E_n(u) \right] \quad (\text{equação 4.24});$$

somatório = 0;

Para contador = 0,..., $(\infty - 1)$:

$$\text{somatório} = \text{somatório} + \frac{E_{\text{contador}+1}(u)}{\text{contador}!} \cdot \left[\frac{-r^2}{4uB^2} \right]^{\text{contador}} ;$$

Função de poço : $W(u, r/B) = \text{somatório}$;

Fim.

- r = distância radial do centro do poço a um ponto do cone de depressão, L;
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento, L;
- S = armazenamento do aquífero, adimensional;
- S' = armazenamento do aquitarde, adimensional;
- z = distância vertical em relação ao topo do aquífero, L.

Dentre as considerações deste modelo podem-se citar:

- O aquífero é limitado superiormente por um aquitarde e por uma formação não confinada. A limitação inferior ocorre por um aquíclode;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente na direção radial;
- A superfície piezométrica antes de se iniciar o bombeamento é horizontal e se estende infinitamente na direção radial;
- O aquífero é homogêneo e anisotrópico. As condutividades hidráulicas horizontal e vertical podem ser diferentes;
- A densidade e a viscosidade da água subterrânea são constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- O fluxo de água subterrânea no aquitarde é vertical. No aquífero este fluxo é horizontal e dirigido radialmente ao poço;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga no filtro e na entrada da bomba são desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;
- O aquífero é compressível e elástico. O aquitarde é incompressível, isto é, nenhuma água é liberada do armazenamento do aquitarde durante o bombeamento.

4.2.4.2 - Equacionamento

A equação que governa o escoamento deriva da Lei de Darcy e do princípio da conservação de massa num sistema de coordenadas radial (HANTUSH, 1964):

$$\left(\frac{kr}{kv}\right)^2 \left[\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} - \frac{s \cdot k'}{kv \cdot m \cdot m'} = \frac{S}{kv \cdot m} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.25)$$

onde :

$$\frac{s \cdot k'}{m'} = \text{taxa de vazamento através do aquitarde;}$$

t = tempo de bombeamento.

Citam-se dentre as condições de contorno da equação (4.25) as seguintes:

- Antes do início do bombeamento os rebaixamentos são nulos em qualquer ponto na vizinhança do poço;
- A distâncias infinitas do poço, após iniciado o bombeamento, os rebaixamentos também são nulos;
- Não há escoamento vertical no topo e na base do aquífero;
- O escoamento da água subterrânea em direção ao poço é constante e uniforme sobre a extensão do filtro, ou seja, o fluxo da água na vizinhança do poço é horizontal.

A solução analítica para o cálculo dos rebaixamentos num poço de observação é a seguinte (HANTUSH, 1964):

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot kr \cdot m} \right) \left[W(u, r/Br) + f(u, x, r/Br, d/m, l/m, z/m) \right] \quad (4.26)$$

onde:

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot kr \cdot m \cdot t} \quad x = \frac{r}{m} \cdot \sqrt{\frac{kv}{kr}} \quad Br = \frac{kr \cdot m \cdot m'}{k'} \quad (4.27)$$

$W(u, r/Br)$ corresponde à função de Hantush-Jacob (equação 4.21) utilizada no modelo anterior.

Convém ainda lembrar que o termo $kr \cdot m$ corresponde à transmissividade (T) do aquífero.

$$f = \left[\frac{2m}{\pi(l-d)} \right] \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \right) \left[\operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot l}{m} \right) - \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot d}{m} \right) \right] \cdot \cos \left(\frac{n\pi \cdot z}{m} \right) \cdot W \left(u, \sqrt{\left(\frac{r}{Br} \right)^2 + (n\pi x)^2} \right) \quad (4.28)$$

$$\text{com: } W \left(u, \sqrt{\left(\frac{r}{Br} \right)^2 + (n\pi x)^2} \right) = \int_u^{\infty} \left(\frac{1}{y} \right) \exp \left[-y - \frac{(r/Br)^2 + (n\pi x)^2}{4y} \right] dy \quad (4.29)$$

De maneira análoga ao modelo 2, que também leva em consideração a penetração parcial de poços, os rebaixamentos são calculados pontualmente pela equação (4.26) para coordenadas verticais z na extensão do filtro do poço de observação. Contudo precisa-se conhecer o rebaixamento em todo comprimento desse filtro e o valor médio no segmento $(lo - do)$ torna-se mais representativo.

Para calcular o rebaixamento médio num poço de observação, a equação (4.26) deve ser integrada entre as profundidades filtrantes $z = do$ e $z = lo$ e dividida entre o comprimento $(lo - do)$ do filtro. Nota-se que o procedimento é, pois, análogo àquele feito para o modelo 2. Dessa maneira, o resultado é o seguinte:

$$s_{\text{médio}} = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot kr \cdot m} \right) \left[W \left(u, r/Br \right) + F(u, x, r/Br, l/m, d/m, lo/m, do/m) \right] \quad (4.30)$$

onde:

$$F = \left[\frac{2m^2}{\pi^2(l-d)(lo-do)} \right] \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot l}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot d}{m} \right) \right] \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot lo}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi \cdot do}{m} \right) \right] W \left(u, \sqrt{\left(\frac{r}{Br} \right)^2 + (n\pi x)^2} \right) \quad (4.31)$$

Por conveniência a equação (4.30) pode ser escrita como:

$$s_{\text{médio}} = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot kr \cdot m} \right) \cdot W(\text{penetração parcial}) \quad (4.32)$$

4.2.4.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Dados de entrada:

- do aquífero: m, kr, kv, S;
- operacionais: r, t;
- do poço bombeado: d, l;
- do poço de observação: do, lo.

Cálculo de $T = kr \cdot m$ (equação 4.2);

Cálculo de u (equação 4.5);

Cálculo de B (equação 4.19);

Cálculo da função de Theis $W(u)$;

Cálculo de x (equação 4.11);

Cálculo de F :

somatório = 0;

$$A_1 = \frac{2m^2}{\pi^2 \cdot (l-d)(lo-do)};$$

Para $n = 1, \dots, \infty$:

$$A_2 = \left(\frac{1}{n^2} \right) \cdot \left[\operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot l}{m} \right) - \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot d}{m} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot lo}{m} \right) - \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi \cdot do}{m} \right) \right]$$

Cálculo de A_3 :

Integração da equação 4.29 pelo método de Simpson (1/3)

somatório = somatório + $A_2 \cdot A_3$;

$F = A_1 \cdot \text{somatório}$;

Cálculo de $W(u, r/B)$;

Função de poço: $W = W(u, r/B) + F$;

Fim.

4.2.5 – Modelo 5 : Transiente, não Confinado, Anisotrópico

4.2.5.1 – Modelo Conceitual

Figura 4.7 - Corte do terreno

Do modelo conceitual representado pela figura acima, podem-se definir os seguintes termos:

- kr = condutividade hidráulica radial do aquífero, LT^{-1} ;
- kv = condutividade hidráulica vertical do aquífero, LT^{-1} ;

- m = espessura saturada do aquífero antes de se iniciar o bombeamento, L;
- r = distância radial do poço bombeado a um ponto qualquer do poço de observação, L;
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento, L;
- S = armazenamento do aquífero, adimensional;
- S_s = armazenamento específico do aquífero (S / m), L^{-1} ;
- S_y = produção específica do aquífero, adimensional;
- z = coordenada vertical com origem na base do aquífero, L;
- Q = taxa de bombeamento (vazão) constante, L^3T^{-1} .

Este modelo assume as seguintes considerações:

- O aquífero é limitado na base por um aquicludo;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente em direção radial ao poço;
- A superfície piezométrica inicial (antes do início do bombeamento) é horizontal e se estende infinitamente em direção radial ao poço;
- O escoamento da água subterrânea acima da superfície piezométrica inicial é desprezível;
- O aquífero é homogêneo e anisotrópico. As condutividades hidráulicas nas direções radial e vertical podem ser diferentes;
- A água subterrânea apresenta densidade e viscosidade constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- As linhas de fluxo são horizontais e dirigidas ao poço em direção radial;
- Os poços bombeado e de observação possuem filtros que penetram toda camada saturada do aquífero;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga nos filtros e na entrada da bomba são tomadas como desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;
- O aquífero é compressível e elástico;
- Os rebaixamentos são pequenos em relação à espessura saturada do aquífero.

4.2.5.2 - Equacionamento

Como nos modelos anteriores, a equação diferencial que governa o escoamento, também é obtida de uma combinação entre a Lei de Darcy e o princípio da conservação de massa num sistema de coordenadas radial (NEUMAN, 1972, 1973,):

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{kv}{kr} \cdot \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{Ss}{kr} \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.33)$$

onde : t = tempo de bombeamento.

Dentre as condições de contorno assumem-se:

- Antes do início do bombeamento, os rebaixamentos são nulos em qualquer ponto na vizinhança do poço;
- Após o início do bombeamento e a distâncias infinitas do poço bombeado, os rebaixamentos também são nulos;
- Na base do aquífero, a variação do rebaixamento com a profundidade é nula;
- A superfície piezométrica é um contorno móvel. Quando este contorno sofre declínio, a água dos poros flui da superfície piezométrica para o aquífero;
- O escoamento da água subterrânea, em direção ao poço, é constante e uniforme na espessura saturada do aquífero.

A solução da equação diferencial (4.33), fornece o valor do rebaixamento num poço de observação totalmente penetrante (NEUMAN, 1972, 1973):

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot T} \right) \cdot W(ts, \sigma, \beta) \quad (4.34)$$

onde:

$T = kr \cdot m$ é a transmissividade do aquífero.

$$ts = \frac{T \cdot t}{Ss \cdot m \cdot r^2} \quad (4.35)$$

$$\sigma = \frac{Ss \cdot m}{Sy} \quad (4.36) \quad \beta = \frac{r^2}{m^2} \cdot \frac{kv}{kr} \quad (4.37)$$

$$W(ts, \sigma, \beta) = \int_0^{\infty} 4y \cdot Jo\left(y\beta^{1/2}\right) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^{\infty} un(y) \right] dy \quad (4.38)$$

$Jo(x)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero

$$uo(y) = \frac{\left\{ 1 - \exp\left[-ts\beta(y^2 - \gamma o^2)\right] \right\} \cdot \tanh(\gamma o)}{\left\{ y^2 - (1 + \sigma)\gamma o^2 - \left[(y^2 - \gamma o^2)^2 / \sigma\right] \right\} \cdot \gamma o} \quad (4.39)$$

$$un(y) = \frac{\left\{ 1 - \exp\left[-ts\beta(y^2 + \gamma n^2)\right] \right\} \cdot \tan(\gamma n)}{\left\{ y^2 - (1 + \sigma)\gamma n^2 - \left[(y^2 + \gamma n^2)^2 / \sigma\right] \right\} \cdot \gamma n} \quad (4.40)$$

Os termos γo e γn são as raízes das equações:

$$\sigma \cdot \gamma o \cdot \sinh(\gamma o) - (y^2 - \gamma o^2) \cdot \cosh(\gamma o) = 0 \quad \text{com: } \gamma o^2 < y^2 \quad (4.41)$$

$$\sigma \cdot \gamma n \cdot \sin(\gamma n) + (y^2 + \gamma n^2) \cdot \cos(\gamma n) = 0$$

$$\text{com: } (2n-1)(\pi/2) < \gamma n < n\pi \quad n \geq 1 \quad (4.42)$$

4.2.5.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Dados de entrada:

- do aquífero: m, kr, kv, S, Sy;
- operacionais: r, t.

Cálculo de $T = kr \cdot m$ (equação 4.2);

Cálculo de ts (equação 4.35);

Cálculo de σ (equação 4.36);

Cálculo de β (equação 4.37);

Para $y = 0, \dots, \infty$:

Cálculo de γo pelo método de Newton-Raphson:

$$\gamma o_{n+1} = \gamma o_n - \frac{\sigma \gamma o_n \cdot \sinh(\gamma o_n) - (y^2 - \gamma o_n^2) \cosh(\gamma o_n)}{\sinh(\gamma o_n) \cdot [\sigma - (y^2 - \gamma o_n^2)] + \cosh(\gamma o_n) \cdot (\sigma \gamma o_n + 2 \gamma o_n)}$$

Cálculo de $uo(y)$ (equação 4.39)

Para $n = 1, \dots, \infty$:

Cálculo de γm pelo método de Newton-Raphson:

$$\gamma m_{n+1} = \gamma m_n - \frac{\sigma \gamma m_n \cdot \sin(\gamma m_n) + (y^2 + \gamma m_n^2) \cos(\gamma m_n)}{\sin(\gamma m_n) \cdot [\sigma - (y^2 + \gamma m_n^2)] + \cos(\gamma m_n) \cdot (\sigma \gamma m_n + 2 \gamma m_n)};$$

somatório = 0

Cálculo de um (equação 4.40)

somatório = somatório + um

$F = 4y \cdot Jo(y \cdot \beta^{1/2}) \cdot (uo + \text{somatório})$;

Função de poço:

$W = \text{Integração de } F \text{ pelo método de Simpson (1/3)}$;

Fim.

4.2.6 – Modelo 6 : transiente, não confinado, penetração parcial, anisotrópico

4.2.6.1 – Modelo Conceitual

Figura 4.8 - Corte do terreno

Do modelo conceitual representado pela figura, podem-se definir os seguintes termos:

- d = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) ao topo do filtro do poço bombeado, L;
- l = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) à base do filtro do poço bombeado, L;
- do = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) ao topo do filtro do poço de observação, L;
- lo = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) à base do filtro do poço de observação, L;
- k_r = condutividade hidráulica radial do aquífero, LT^{-1} ;
- k_v = condutividade hidráulica vertical do aquífero, LT^{-1} ;

- m = espessura saturada do aquífero antes de se iniciar o bombeamento, L;
- r = distância radial do poço bombeado a um ponto qualquer do poço de observação, L;
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento, L;
- S = armazenamento do aquífero, adimensional;
- S_s = armazenamento específico do aquífero (S / m), L^{-1} ;
- S_y = produção específica do aquífero, adimensional;
- z = coordenada vertical com origem na base do aquífero, L;
- Q = taxa de bombeamento (vazão) constante, L^3T^{-1} .

Este modelo assume as seguintes considerações:

- O aquífero é limitado na base por um aquícluíde;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente em direção radial ao poço;
- A superfície piezométrica inicial (antes do início do bombeamento) é horizontal e se estende infinitamente em direção radial ao poço;
- O escoamento da água subterrânea acima da superfície piezométrica inicial é desprezível;
- O aquífero é homogêneo e anisotrópico. As condutividades hidráulicas nas direções radial e vertical podem ser diferentes;
- A água subterrânea apresenta densidade e viscosidade constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga nos filtros e na entrada da bomba são tomadas como desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;
- O aquífero é compressível e elástico;
- Os rebaixamentos são pequenos em relação à espessura saturada do aquífero.

4.2.6.2 – Equacionamento

A equação diferencial que governa o escoamento é obtida de uma combinação entre a Lei de Darcy e o princípio da conservação de massa num sistema de coordenadas radial (NEUMAN, 1974,):

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{kv}{kr} \cdot \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{Ss}{kr} \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.43)$$

onde : t = tempo de bombeamento.

Nota-se que esta equação é idêntica à equação (4.33).

Dentre as condições de contorno assumem-se:

- Antes do início do bombeamento, os rebaixamentos são nulos em qualquer ponto na vizinhança do poço;
- Após o início do bombeamento e a distâncias infinitas do poço bombeado, os rebaixamentos também são nulos;
- Na base do aquífero, a variação do rebaixamento com a profundidade é nula;
- A superfície piezométrica é um contorno móvel. Quando este contorno sofre declínio, a água dos poros flui da superfície piezométrica para o aquífero;
- O escoamento da água subterrânea, em direção ao poço, é constante e uniforme na espessura saturada do aquífero.

A solução final para a equação diferencial (4.43) é função de seis parâmetros adimensionais: σ , β , z_d , l_d , d_d , ts ou ty . A solução tem a forma:

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot T} \right) \cdot W(\sigma, \beta, z_d, l_d, d_d, ts(ty)) \quad (4.44)$$

onde :

$T = kr \cdot m$ é a transmissividade do poço;

$$z_d = z/m \quad (4.44) \quad l_d = l/m \quad (4.45) \quad d_d = d/m \quad (4.46)$$

$$\sigma = Ss \cdot m/Sy \quad (4.47) \quad \beta = (r^2/m^2) \cdot (kv/kr) \quad (4.48)$$

$$ts = T \cdot t / (Ss \cdot m \cdot r^2) \quad (4.49) \quad ty = T \cdot t / (Sy \cdot r^2) \quad (4.50)$$

$$W(\sigma, \beta, z_d, l_d, d_d, ts) = \int_0^\infty 4y \cdot Jo\left(y\beta^{1/2}\right) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^\infty un(y) \right] dy \quad (4.51)$$

$Jo(x)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero.

$$uo(y) = \frac{\{1 - \exp[-ts\beta(y^2 - \gamma o^2)]\} \cdot \cosh(\gamma o \cdot z_d)}{\left[y^2 + (1 + \sigma)\gamma o^2 - (y^2 - \gamma o^2)^2 / \sigma \right] \cdot \cosh(\gamma o)} \cdot \frac{\sinh[\gamma o(1 - d_d)] - \sinh[\gamma o(1 - l_d)]}{(l_d - d_d) \cdot \sinh(\gamma o)} \quad (4.52)$$

$$un(y) = \frac{\{1 - \exp[-ts\beta(y^2 + \gamma n^2)]\} \cdot \cos(\gamma n \cdot z_d)}{\left[y^2 - (1 + \sigma)\gamma n^2 - (y^2 + \gamma n^2)^2 / \sigma \right] \cdot \cos(\gamma n)} \cdot \frac{\sen[\gamma n(1 - d_d)] - \sen[\gamma n(1 - l_d)]}{(l_d - d_d) \cdot \sen(\gamma n)} \quad (4.53)$$

Como no modelo anterior, os termos γo e γn são as raízes das equações (4.41) e (4.42):

$$\sigma \cdot \gamma o \cdot \sinh(\gamma o) - (y^2 - \gamma o^2) \cdot \cosh(\gamma o) = 0 \quad , \text{ com } \gamma o^2 < y^2$$

$$\sigma \cdot \gamma n \cdot \sen(\gamma n) + (y^2 + \gamma n^2) \cdot \cos(\gamma n) = 0 \quad ,$$

$$\text{com } (2n-1)(\pi/2) < \gamma n < n\pi \quad n \geq 1$$

Nos modelos de penetração parcial, como visto anteriormente, os rebaixamentos são calculados pontualmente, de acordo com a coordenada vertical z do ponto. Nosso estudo objetiva o cálculo do rebaixamento médio num poço de observação dentro de sua extensão filtrante $(l_o - d_o)$. Dessa maneira, a equação (4.44) deve ser integrada entre $z = (m - d_o)$ e $z = (m - l_o)$ e dividida pelo comprimento do filtro $(l_o - d_o)$. Convém lembrar que, a coordenada z para os modelos não confinados tem definição diferente daquela para os modelos confinados, possuindo mesma direção (vertical), mas orientada no sentido base – topo do aquífero.

O rebaixamento médio no poço de observação é obtido por:

$$s_{\text{médio}} = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot T} \right) \cdot W(\sigma, \beta, d_d, l_d, z_{2d}, z_{1d}, ts(ty)) \quad (4.54)$$

onde:

d_d , l_d , σ , β , ts e ty são definidas pelas equações (4.46) a (4.50) respectivamente;

$$z_{2d} = \frac{(m - d_o)}{m} \quad (4.55)$$

$$z_{1d} = \frac{(m - l_o)}{m} \quad (4.56)$$

A função de poço $W(\sigma, \beta, d_d, l_d, z_{2d}, z_{1d}, ts(ty))$ é definida de acordo com a equação (4.51):

$$W(\sigma, \beta, d_d, l_d, z_{2d}, z_{1d}, d_d, ts) = \int_0^{\infty} 4y \cdot Jo\left(y\beta^{1/2}\right) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^{\infty} un(y) \right] dy$$

onde:

$$u_o(y) = \frac{\{1 - \exp[-ts\beta(y^2 - \gamma^2)]\} \cdot [\sinh(\gamma \cdot z_{2d}) - \sinh(\gamma \cdot z_{1d})]}{[y^2 + (1 + \sigma)\gamma^2 - (y^2 - \gamma^2)^2 / \sigma] \cosh(\gamma)} \cdot \frac{\{\sinh[\gamma(1 - d_d)] - \sinh[\gamma(1 - l_d)]\}}{(z_{2d} - z_{1d}) \cdot \gamma \cdot (l_d - d_d) \sinh(\gamma)} \quad (4.57)$$

$$u_m(y) = \frac{\{1 - \exp[-ts\beta(y^2 + \gamma^2)]\} \cdot [\sin(\gamma \cdot z_{2d}) - \sin(\gamma \cdot z_{1d})]}{[y^2 - (1 + \sigma)\gamma^2 - (y^2 + \gamma^2)^2 / \sigma] \cos(\gamma)} \cdot \frac{\{\sin[\gamma(1 - d_d)] - \sin[\gamma(1 - l_d)]\}}{(z_{2d} - z_{1d}) \cdot \gamma \cdot (l_d - d_d) \sin(\gamma)} \quad (4.58)$$

Convém lembrar que γ e γ correspondem respectivamente aos valores das raízes das equações (4.41) e (4.42):

$$\sigma \cdot \gamma \cdot \sinh(\gamma) - (y^2 - \gamma^2) \cdot \cosh(\gamma) = 0 \quad , \text{ com } \gamma^2 < y^2$$

$$\sigma \cdot \gamma \cdot \sin(\gamma) + (y^2 + \gamma^2) \cdot \cos(\gamma) = 0 \quad ,$$

com $(2n - 1)(\pi/2) < \gamma < n\pi \quad n \geq 1$

4.2.6.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Dados de entrada:

- do aquífero: m, kr, kv, S, S_y;
- operacionais: r, t;
- do poço bombeado: d, l;
- do poço de observação: do, lo.

Cálculo de $T = kr \cdot m$ (equação 4.2);

Cálculo de ts (equação 4.49);

Cálculo de σ (equação 4.47);

Cálculo de β (equação 4.48);

Cálculo de l_{db} d_{db} z_{2db} z_{1d} (equações 4.45, 4.46, 4.55 e 4.56; respectivamente);

Para $y = 0, \dots, \infty$:

Cálculo de γo pelo método de Newton-Raphson:

$$\gamma o_{n+1} = \gamma o_n - \frac{\sigma \gamma o_n \cdot \sinh(\gamma o_n) - (y^2 - \gamma o_n^2) \cosh(\gamma o_n)}{\sinh(\gamma o_n) \cdot [\sigma - (y^2 - \gamma o_n^2)] + \cosh(\gamma o_n) \cdot (\sigma \gamma o_n + 2 \gamma o_n)}$$

Cálculo de $uo(y)$ (equação 4.57)

Para $n = 1, \dots, \infty$:

Cálculo de γm pelo método de Newton-Raphson:

$$\gamma m_{n+1} = \gamma m_n - \frac{\sigma \gamma m_n \cdot \sin(\gamma m_n) + (y^2 + \gamma m_n^2) \cos(\gamma m_n)}{\sin(\gamma m_n) \cdot [\sigma - (y^2 + \gamma m_n^2)] + \cos(\gamma m_n) \cdot (\sigma \gamma m_n + 2 \gamma m_n)};$$

somatório = 0

Cálculo de $um(y)$ (equação 4.58)

somatório = somatório + um

$F = 4y \cdot Jo(y \cdot \beta^{1/2}) \cdot (uo + \text{somatório})$;

Função de poço:

$W = \text{Integração de F pelo método de Simpson (1/3)}$;

Fim.

4.2.7 – Modelo 7: Transiente, Conversão de Confinado para não Confinado

4.2.7.1 – Modelo Conceitual

Figura 4.9 - Corte do terreno

Da figura, podem-se definir os seguintes termos:

- h_1 = carga de pressão na zona não confinada ($r < R$), L;
- h_2 = carga de pressão na zona confinada ($r > R$), L;
- H = carga de pressão inicial (antes do início do bombeamento), L;
- k = condutividade hidráulica radial do aquífero, LT^{-1} ;
- m = espessura saturada do aquífero, L;
- r = distância radial do poço bombeado, medida a partir do centro desse poço, a um ponto da superfície piezométrica, L;
- R = distância radial do poço bombeado ao ponto onde ocorre a conversão de confinado para não confinado, L;
- s_1 = rebaixamento ($m - h_1$) na zona não confinada ($r < R$), L;
- s_2 = rebaixamento ($H - h_2$) na zona confinada ($R < r$), L;
- S_1 = armazenamento na zona não confinada, adimensional;
- S_2 = armazenamento na zona confinada, adimensional;

- Q = taxa de bombeamento (vazão) constante, LT^{-3} ;

Este modelo assume as seguintes considerações:

- O aquífero é limitado na base e no topo por aquicludes;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente na direção radial do poço;
- A superfície piezométrica inicial (antes do início do bombeamento) é horizontal e se estende infinitamente na direção radial do poço;
- O escoamento da água subterrânea acima da superfície piezométrica inicial é desprezível;
- aquífero é homogêneo e isotrópico.
- A água subterrânea apresenta densidade e viscosidade constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- Os poços bombeado e de observação possuem filtros que penetram toda camada saturada do aquífero;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga nos filtros e na entrada da bomba são tomadas como desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;
- O aquífero é compressível e elástico;
- Os rebaixamentos, na zona não confinada, são pequenos em relação à espessura saturada do aquífero;
- O escoamento da água subterrânea é horizontal e dirigido radialmente ao poço. O escoamento continua horizontal mesmo depois da conversão de uma parte do aquífero de confinado para não confinado;
- A conversão, de uma porção do aquífero de confinado para não confinado, ocorre quando a superfície piezométrica declina, de forma a ficar abaixo da camada confinante.

4.2.7.2 - Equacionamento

O problema pode ser expresso matematicamente através de equações de difusão para as duas regiões (MOENCH e PRICKETT, 1972):

- Para a zona não confinada: $\frac{\partial^2 h_1}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial h_1}{\partial r} = \left(\frac{S_1}{k \cdot m}\right) \frac{\partial h_1}{\partial t}, \quad 0 \leq r \leq R \quad (4.59)$

- Para a zona confinada: $\frac{\partial^2 h_2}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial h_2}{\partial r} = \left(\frac{S_2}{k \cdot m}\right) \frac{\partial h_2}{\partial t}, \quad r \geq R \quad (4.60)$

onde: t = tempo de bombeamento.

Dentre as condições de contorno assumem-se:

- Antes do início do bombeamento, os rebaixamentos são nulos em qualquer ponto na vizinhança do poço;
- Após o início do bombeamento e a distâncias infinitas do poço bombeado, os rebaixamentos também são nulos;
- A uma distância do poço equivalente ao raio de transição (R), a carga de pressão sobre a base do aquífero é igual à espessura do mesmo. Na transição a superfície piezométrica se mantém contínua;
- O escoamento da água subterrânea ,em direção ao poço, é constante e uniforme na espessura saturada do aquífero.

As soluções das equações diferenciais (4.59) e (4.60) são:

$$h_1 = m - \left(\frac{Q}{4\pi \cdot T}\right) [W(u_1) - W(v)], \quad r < R \quad (4.61)$$

$$h_2 = H - \frac{(H - m) \cdot W(u_2)}{W\left(\frac{v S_2}{S_1}\right)}, \quad r > R \quad (4.62)$$

onde :

$T = k \cdot m$ é a transmissividade do aquífero;

$$u_1 = \frac{r^2 S_1}{4T \cdot t} \quad (4.63) \quad u_2 = \frac{r^2 S_2}{4T \cdot t} \quad (4.64) \quad v = \frac{R^2 S_1}{4T \cdot t} \quad (4.65)$$

$W(u_1)$, $W(u_2)$, $W(vS_2/S_1)$ são valores da função de Theis (equação 4.4), definida para o modelo 1.

Pelas equações (4.61) e (4.62), pode-se calcular a carga de pressão sobre a base do aquífero nas regiões não confinadas e confinadas, respectivamente. Na forma em que estão definidas, essas equações não fornecem diretamente o valor do rebaixamento, mas podem ser reescritas como :

- Na zona não confinada: $s_1 = m - h_1 = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot T} \right) W(u_1, v) \quad (4.66)$

$$\text{onde: } W(u_1, v) = W(u_1) - W(v) \quad (4.67)$$

- Na zona confinada: $s_2 = H - h_2 = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot T} \right) W(u_2) \cdot \exp[v(S_2/S_1 - 1)] \quad (4.68)$

4.2.7.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Entrada de dados:

- do aquífero: m , k , S_1 , S_2 ;
- operacionais: r , t , R .

Cálculo de $T = k \cdot m$ (equação 4.2);

Cálculo de u_1 , u_2 , v (equações 4.63, 4.64 e 4.65; respectivamente);

Se $r < R$ então:

$$W = W(u_1, v) \quad (\text{equação 4.67});$$

senão:

$$W = W(u_2) \cdot \exp[v \cdot (S_2/S_1 - 1)];$$

Função de poço = W ;

Fim.

4.2.8 – Modelo 8: Transiente, não Confinado, Aquitarde Superposto ao Aquífero

4.2.8.1 – Modelo Conceitual

Figura 4.10 - Corte do terreno

Os termos apresentados na Figura 4.10 são definidos como:

- d = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) ao topo do filtro do poço bombeado, L ;
- l = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) à base do filtro do poço bombeado, L ;
- do = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) ao topo do filtro do poço de observação, L ;
- lo = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) à base do filtro do poço de observação, L ;

- k_r = condutividade hidráulica radial do aquífero, LT^{-1} ;
- k_v = condutividade hidráulica vertical do aquífero, LT^{-1} ;
- k' = condutividade hidráulica vertical do aquitarde, LT^{-1} ;
- m = espessura saturada do aquífero antes de se iniciar o bombeamento, L ;
- m' = espessura saturada do aquitarde antes de se iniciar o bombeamento, L ;
- r = distância radial do poço bombeado a um ponto qualquer do poço de observação, L ;
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento, L ;
- S = armazenamento do aquífero, adimensional;
- S_s = armazenamento específico do aquífero (S / m), L^{-1} ;
- S_y = produção específica do aquífero, adimensional;
- S' = produção específica do aquitarde, adimensional;
- z = coordenada vertical com origem na base do aquífero, L ;
- Q = taxa de bombeamento (vazão) constante, L^3T^{-1} .

Este modelo assume as seguintes considerações:

- O aquífero é limitado na base por um aquícluído e no topo por um aquitarde;
- Todas as camadas são horizontais e se estendem infinitamente na direção radial do poço;
- A superfície piezométrica inicial (antes do início do bombeamento) é horizontal e se estende infinitamente na direção radial do poço;
- O aquífero é homogêneo e anisotrópico. As condutividades hidráulicas nas direções radial e vertical podem ser diferentes. O aquitarde é homogêneo e isotrópico;
- A água subterrânea apresenta densidade e viscosidade constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- A taxa de bombeamento (vazão) é constante;
- As perdas de carga nos filtros e na entrada da bomba são tomadas como desprezíveis;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal;

- O aquífero é compressível e elástico. O aquitarde é considerado incompressível, isto é, o armazenamento não libera água durante o bombeamento;
- As perdas de carga no filtro e na entrada da bomba são desprezíveis;
- O escoamento da água subterrânea no aquitarde é vertical. No aquífero, o escoamento é horizontal e na direção radial do poço. Esta consideração é válida quando $kr / k' > 100$ (NEUMAN, 1969).

A diferença entre este modelo e os modelos 3 e 4 é que aqueles assumem a presença de um aquífero não confinado, acima do aquitarde, que não é afetado pelo bombeamento.

4.2.8.2 – Equacionamento

A equação diferencial para o escoamento no aquífero compressível e anisotrópico é (NEUMAN, 1974):

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s}{\partial r} \right) + \frac{kv}{kr} \cdot \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{Ss}{kr} \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \quad (4.69)$$

onde: t = tempo de bombeamento.

Dentre as condições de contorno assumidas no estudo deste modelo estão:

- Antes do início do bombeamento, os rebaixamentos são nulos na vizinhança do poço;
- A superfície piezométrica (livre) é considerada um contorno móvel. Com o seu declínio, a água dos poros escoar para o aquífero;
- O escoamento da água em direção ao poço é constante e uniforme ao longo da extensão filtrante;
- No fundo do aquífero, a variação do rebaixamento com a profundidade é inexistente, uma vez que o contorno inferior é feito por uma camada impermeável.

A solução analítica para a equação diferencial (4.69) é, segundo BOULTON e STRELTSOVA (1975):

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi \cdot T} \right) \cdot W(\tau, \rho, c, \nu, l', l'_1, z') \quad (4.70)$$

onde:

$T = kr \cdot m$ é a transmissividade do aquífero;

$$\tau = \frac{kv \cdot t}{S \cdot m} \quad (4.71) \quad \rho = \left(\frac{kv}{kr} \right)^{1/2} \cdot \frac{r}{m} \quad (4.72)$$

$$c = \frac{k' \cdot m}{kv \cdot m'} \quad (4.73) \quad \nu = \frac{S'}{S} \quad (4.74)$$

$$l' = \frac{l}{m} \quad (4.75) \quad l'_1 = \frac{d}{m} \quad (4.76) \quad z' = \frac{z}{m} \quad (4.77)$$

$$W(\tau, \rho, c, \nu, l', l'_1, z') = \left(\frac{1}{l' - l'_1} \right) \cdot \int_0^\infty 4y \cdot Jo(\rho y) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^\infty un(y) \right] dy \quad (4.78)$$

Da equação (4.78), que descreve analiticamente o valor da função de poço para este modelo 8, definem-se os seguintes termos:

$Jo(x)$ = função de Bessel de primeira espécie e ordem zero;

$$uo(y) = \frac{\{\sinh[\gamma o(1 - l'_1)] - \sinh[\gamma o(1 - l')]\} \cdot \{\cosh[\gamma o(1 - z')]\} \cdot \{1 - \exp[-(y^2 - \gamma o^2)\tau]\}}{(y^2 - \gamma o^2) \cdot \chi_o \cdot \cosh(\gamma o)} \quad (4.79)$$

$$un(y) = \frac{\{\sin[m(1-l_1')]-\sin[m(1-l')]\} \cdot \{\cos[m(1-z')]\} \cdot \{1-\exp[-(y^2+m^2)\tau]\}}{(y^2+m^2) \cdot \chi_n \cdot \cos(m)} \quad (4.80)$$

$$\chi_o = \left[1 + \frac{c \cdot (y^2 - \gamma o^2)}{y^2 - \gamma o^2 - c/\nu}\right] \cdot \sinh(\gamma o) + \left[1 + \frac{2c^2/\nu}{(y^2 - \gamma o^2 - c/\nu)^2}\right] \cdot \gamma o \cdot \cosh(\gamma o) \quad (4.81)$$

$$\chi_n = \left[1 + \frac{c \cdot (y^2 + m^2)}{y^2 + m^2 - c/\nu}\right] \cdot \sin(m) + \left[1 + \frac{2c^2/\nu}{(y^2 + m^2 - c/\nu)^2}\right] \cdot m \cdot \cos(m) \quad (4.82)$$

- o termo γo é a raiz positiva de:

$$(y^2 - \gamma o^2 - c/\nu) \cdot \gamma o \cdot \sinh(\gamma o) + c \cdot (y^2 - \gamma o^2) \cdot \cosh(\gamma o) = 0, \quad \gamma o^2 < y^2 \quad (4.83)$$

- o termo m é a enésima raiz positiva de:

$$(y^2 + m^2 - c/\nu) \cdot m \cdot \sin(m) - c \cdot (y^2 + m^2) \cdot \cos(m) = 0 \quad (4.84)$$

Este modelo, assim como todos os outros que levam em consideração um aquitarde superposto ao aquífero (modelos 3 e 4), deve ser aplicado com muito critério, principalmente no que se refere aos dados de entrada. A utilização de valores de condutividade e armazenamento incompatíveis com o sistema real pode, desta maneira, levar a resultados incoerentes.

Este modelo pode ainda aproximar outras condições. Se a condutividade hidráulica do aquitarde é desprezível, o sistema se comporta como um aquífero confinado. Se as condutividades do aquífero e do aquitarde são iguais, o sistema se comporta como um aquífero não confinado simples.

4.2.8.3 – Algoritmo para Cálculo da Função de Poço

Dados de entrada:

- do aquífero: m , k_r , k_v , S , S_y ;
- do aquitard: m' , k' ;
- operacionais: r , t ;
- do poço bombeado: l , d ;
- do poço de observação: do , lo .

Cálculo de $T = k_r \cdot m$ (equação 4.2);

Cálculo de τ , c , ρ , ν (equações 4.71 a 4.74, respectivamente);

Para $z = do, \dots, lo$:

$W = 0$;

Para $y = 0, \dots, \infty$:

Cálculo de γo pelo método de Newton-Raphson:

$$\gamma o_{n+1} = \gamma o_n - \frac{(y^2 - \gamma o_n^2 - c/\nu) \cdot \gamma o_n \cdot \text{senl}(\gamma o_n) + c(y^2 - \gamma o_n^2) \cosl(\gamma o_n)}{\text{senl}(\gamma o_n) [(y^2 - 3\gamma o_n^2 - c/\nu) + c \cdot (y^2 - \gamma o_n^2)] + \cosl(\gamma o_n) [\gamma o(y^2 - \gamma o_n^2 - c/\nu) - 2c\gamma o_n]}$$

Cálculo de l' , l_1' , z' (equações 4.75 a 4.77, respectivamente)

Cálculo de $uo(y)$ (equação 4.79)

Para $n = 1, \dots, \infty$:

Cálculo de m pelo método de Newton-Raphson:

$$m_{n+1} = m_n - \frac{(y^2 + m_n^2 - c/\nu) m_n \text{sen}(m_n) - c \cdot (y^2 + m_n^2) \cos(m_n)}{\text{sen}(m_n) [(y^2 + 3m_n^2 - c/\nu) + c \cdot (y^2 + m_n^2)] + \cos(m_n) [m_n(y^2 + m_n^2 - c/\nu) - 2cm_n]};$$

somatório = 0

Cálculo de $un(y)$ (equação 4.80)

somatório = somatório + $un(y)$

$F_1 = 4y \cdot Jo(y \cdot \rho) \cdot (uo + \text{somatório})$;

Função de poço:

$F_2 =$ Integração de F_1 pelo método de Simpson (1/3);

Função de poço:

$A =$ Integração de F_2 , na extensão $(l_o - d_o)$, pelo método de Simpson (1/3);

$W = A / (l_o - d_o)$;

Fim.

4.3 – Efeitos da Penetração Parcial de Poços

Um poço é parcialmente penetrante quando a extensão filtrante, que permite a entrada de água, é menor que a espessura saturada do aquífero. Essa situação é das mais comuns na prática. Em relação aos poços totalmente penetrantes, há uma perda de carga adicional, devido à convergência das linhas de fluxo nas proximidades do poço.

Quando o filtro de um poço bombeado penetra totalmente a espessura saturada de um aquífero confinado, o escoamento, na vizinhança do poço, é considerado praticamente horizontal. Dessa maneira, as linhas equipotenciais, perpendiculares às linhas de fluxo, são verticais e a superfície piezométrica, obtida em poços de observação ou piezômetros, descreve a distribuição de pressão no aquífero. O rebaixamento é função da distância ao poço e do tempo de bombeamento, não se relacionando com a profundidade do poço de observação.

Quando ocorre penetração parcial de poços, o escoamento não é horizontal e, por consequência, não há verticalidade das linhas equipotenciais. Esse efeito torna relevante o conhecimento das profundidades dos filtros nos poços de observação, uma vez que, nessa extensão, há várias linhas equipotenciais e não apenas uma, como ocorre nos casos de penetração total.

Num aquífero freático, o escoamento nunca é exatamente horizontal. O nível d'água num piezômetro indica, aproximadamente, a cota da superfície piezométrica no poço, dependendo da declividade dessa superfície. Na realidade, esse nível d'água representa exatamente a carga piezométrica do ponto onde a água entra no piezômetro.

Nos poços de observação, a água penetra pelos filtros e o nível d'água medido corresponde ao valor médio em toda extensão filtrante.

As figuras 4.11 e 4.12 ilustram os casos de poços parcialmente penetrantes em circunstâncias de confinamento e não confinamento.

Figura 4.11 - Esquema das linhas de fluxo e equipotenciais, num aquífero confinado, sob bombeamento de um poço parcialmente penetrante

Figura 4.12 - Esquema das linhas de fluxo e equipotenciais, num aquífero não confinado, sob o bombeamento de um poço parcialmente penetrante

Esta parte do trabalho, baseada em análises feitas para o modelo 2 (confinado com penetração parcial), procura estabelecer uma tendência de variação da função de poço (consequentemente dos rebaixamentos) com a penetração dos filtros dos poços bombeado e de observação.

Quando a extensão filtrante do poço bombeado penetra totalmente a espessura saturada do aquífero, o valor da função W num poço de observação, independe da penetração do filtro desse poço (do e lo). Dessa maneira, W é função apenas da distância, do tempo, do armazenamento e da transmissividade do aquífero (r , t , S e T ; respectivamente). Essas grandezas podem ser agrupadas por um adimensional já conhecido, $u = r^2 S / 4 T t$, dado pela equação (4.5). Fato análogo ocorre quando o poço de observação é totalmente penetrante e o poço bombeado penetra o aquífero parcialmente.

Em situações como essas, não há diferença entre os resultados dos modelos 2 e 1, e o valor da função W (*penetração parcial*) é exatamente igual ao resultado da função de Theis $W(u)$. O gráfico a seguir mostra uma relação interessante dessa função com o adimensional u e pode ser generalizada para qualquer circunstância que apresenta penetração total, quer do poço bombeado, quer do poço de observação.

Gráfico 4.3 - Variação da função de poço com o adimensional u , para casos de penetração total, do poço bombeado ou do poço de observação.

A função que descreve a variação de W com o adimensional u , nada mais é do que uma aproximação da função de Theis. Assim, o modelo 2 recai na solução do modelo 1. Como não há escoamento vertical, uma possível anisotropia do aquífero não tem qualquer influência na solução.

Quando não se verifica penetração total em nenhum dos poços, a função de poço $W(\text{penetração parcial})$ se distancia da função de Theis, não podendo mais ser relacionada apenas com o adimensional u . Aqui, outras variáveis tornam-se de grande relevo, dentre elas, as penetrações dos filtros (d , l , do , lo) e a anisotropia do aquífero nas direções radial e vertical (kr e k_v).

A seguir mostram-se as situações relacionadas à penetração de filtros e as tendências seguidas pela função $W(\text{penetração parcial})$ em cada caso:

- $d > do$:

Gráfico 4.4 - Variação da função W com a penetração do poço de observação

Esta situação é válida nos casos em que a penetração de topo do filtro do poço de observação é menor que a penetração de topo do filtro do poço bombeado. Nota-se que a função de poço é máxima, o que consequentemente acarretará maiores rebaixamentos no poço de observação, quando as bases das extensões filtrantes dos dois poços (bombeado e de observação) forem iguais. À medida que $lo \rightarrow m$ (espessura do aquífero), verifica-se que a função de poço se aproxima da função de Theis.

- $d = d_o$:

Gráfico 4.5 - Variação da função W com a penetração do poço de observação

Nos casos em que a penetração dos topos dos filtros dos poços bombeado e de observação forem iguais, nota-se que os rebaixamentos máximos ocorrem quando o filtro do poço de observação tiver comprimento desprezível (piezômetro). À medida que $l_o \rightarrow m$, a função de poço tende a ser menor que a função de Theis, acarretando menores rebaixamentos no poço de observação. Essa tendência será melhor evidenciada no caso seguinte.

- $l = d_o$:

Gráfico 4.6 - Variação da função W com a penetração do poço de observação

No caso em que a penetração de topo do filtro do poço de observação é igual à penetração de base do filtro do poço bombeado, os rebaixamentos máximos também ocorrem quando o poço de observação tem extensão filtrante desprezível, ou seja, $do = lo$. À medida que $lo \rightarrow m$, a função $W(\text{penetração parcial})$ tende a ser menor que a função de Theis, ou seja, os rebaixamentos no poço de observação tornam-se menores do que aqueles que ocorreriam se os poços fossem totalmente penetrantes.

- $l \ll do$:

Gráfico 4.7 - Variação da função W com a penetração do poço de observação

Quando o topo do filtro do poço de observação tem penetração superior à da base do filtro do poço bombeado, a tendência é que os rebaixamentos no poço passivo sejam menores do que aqueles em casos de penetração total. Aqui, os rebaixamentos também são máximos se a extensão filtrante do poço de observação for desprezível, havendo entrada de água apenas pelo fundo desse poço.

- $d = 0, l = 0, do = 0$:

Gráfico 4.8 - Variação da função W com a penetração do poço de observação

Este é um caso extremo, onde o poço bombeado tem penetração nula no aquífero. Neste caso a entrada de água no poço ocorre na mesma cota de base da formação impermeável (aquiclude). Percebe-se que o rebaixamento máximo no poço de observação ocorre quando sua penetração no aquífero é nula. ($do = 0$ e $lo = 0$). À medida que as penetrações do poço de observação aumentam ($lo \rightarrow m$), os rebaixamentos se aproximam daqueles calculados para penetração total (Theis).

4.4 – Efeitos do Tempo de Bombeamento

Há, na literatura, dois tipos de equações de poços relacionadas aos efeitos do tempo de bombeamento nos rebaixamentos: aquelas que descrevem escoamento permanente e aquelas que descrevem escoamento não permanente.

O escoamento permanente independe do tempo. Isto quer dizer que os níveis piezométricos, no poço bombeado e nos poços de observação vizinhos, não se alteram com o tempo. O escoamento permanente ocorre, a rigor, quando o aquífero, que está sob efeito de bombeamento, sofre recarga de uma fonte externa que pode ser, por exemplo, a chuva, corpos d'água superficiais ou vazamento através de um aquítarde. Tal recarga deve ser suficiente para impedir o

crescimento do cone de rebaixamentos (cone de depressão) com o tempo. Contudo, em termos práticos, o escoamento permanente é atingido quando as alterações nos níveis piezométricos dos poços são tão pequenas a ponto de serem desprezadas.

O escoamento não permanente ocorre desde o instante em que o bombeamento começa até alcançar o estado em que os rebaixamentos praticamente não variam com o tempo. Nota-se, pois, que nos primeiros instantes, a utilização de equações de escoamento permanente é bastante inadequada, além disso, esse estado pode demorar a ser atingido, dependendo das características do aquífero e do bombeamento.

Este estudo, de acordo com as equações apresentadas no item 4.2, abrange apenas casos de escoamento não permanente. Apesar disso, as soluções podem ser estendidas para grandes intervalos de bombeamento, onde os rebaixamentos praticamente não mais variam. Essa tendência será objeto das discussões seguintes.

4.4.1 – Bombeamento Contínuo

O efeito do bombeamento contínuo é gerar rebaixamentos sempre crescentes da superfície piezométrica nas vizinhanças do poço. A figura a seguir ilustra melhor este comportamento.

Figura 4.13 - Variação da função de poço com o tempo de bombeamento para uma distância fixa

Convém mais uma vez lembrar a proporcionalidade direta entre função de poço (W) e rebaixamento. Da Figura 4.13 conclui-se que os rebaixamentos aumentam sempre com o tempo. Contudo essa variação está longe de ser uniforme e o comportamento se assemelha a uma curva logarítmica, com elevados gradientes iniciais e baixos gradientes finais.

Assim, os rebaixamentos são grandes nos primeiros instantes de bombeamento, atenuando-se paulatinamente com o passar do tempo, até chegar a valores que praticamente não se alteram. Esse comportamento mostra, com clareza, que as equações para escoamento não permanente também cobrem os casos em que a variação dos rebaixamentos com o tempo é desprezível.

4.4.2 – Bombeamento Intermitente

O bombeamento intermitente é dos mais comuns na prática dos sistemas de abastecimento de água. Na verdade, a continuidade no funcionamento de bombas não é atingida devido à previsão de horários para desligamento das mesmas ou devido a problemas operacionais.

A figura a seguir ilustra o comportamento do aquífero nesses casos.

Figura 4.14 - Bombeamento intermitente

Percebe-se que, a partir do momento em que a bomba é desligada (td), ocorre uma recuperação do aquífero, denotada pela queda de valor da função de poço e, conseqüentemente, dos rebaixamentos. Essa recuperação é rápida nos primeiros instantes após o desligamento, atenuando-se com o passar do tempo. Contudo, o nível piezométrico inicial (nível estático) nunca é atingido e um rebaixamento residual subsiste para longos períodos de tempo após a interrupção do bombeamento (tr). Esse fenômeno é descrito pela superposição do bombeamento de to a tr , e da recuperação de td a tr . Esse conceito pode se estender à aplicação de vazões diferentes, para cada intervalo de tempo, com desligamentos e religações sucessivas de bombas. Assim, a função de poço passa a depender desses intervalos e os rebaixamentos podem ser calculados, de forma geral, como:

$$s = \frac{1}{4\pi \cdot T} \sum_{i=1}^n Q_i \cdot [W(t - t_{i-1}) - W(t - t_i)] \quad (4.85)$$

onde: n = número de intervalos de bombeamento.

Convém lembrar que as funções de poço da equação (4.85) são calculadas de acordo com um dos modelos apresentados no item 4.2 e, por conseguinte, não dependem apenas do intervalo de tempo, mas também das variáveis inerentes a cada modelo.

A equação (4.85) nada mais é do que a superposição de efeitos de diferentes bombeamentos, efetuados em intervalos de tempo conhecidos. A superposição de efeitos é um conceito de grande relevância neste trabalho e será discutida, à parte, no item 4.5.

4.4.3 – O Caso de Aquíferos não Confinados

Nos aquíferos não confinados, quando os rebaixamentos são plotados contra o tempo, numa escala bilogarítmica, constrói-se uma curva com três estágios diferentes. Esses estágios aparecem cronologicamente, de acordo com o

tempo de bombeamento, e são também percebidos quando se relaciona a função de poço W com o tempo adimensional ts (equação 4.49). Isso pode ser ilustrado pela figura 4.15. O primeiro segmento indica a liberação instantânea de água do armazenamento pela compactação do aquífero e expansão da água dos poros. Segundo NEUMAN (1972), o primeiro estágio da curva $W \times tempo$ tende a diminuir conforme a relação S/S_y tenda a zero. O segmento intermediário sugere a existência de uma fonte adicional de água que é liberada com algum atraso. Nota-se que o estágio intermediário é caracterizado por pequenas variações da função de poço com o aumento de ts . Quando a maioria da água é liberada dessa fonte, a curva assume maior declividade. Esse fenômeno tem sido tradicionalmente referido na literatura das águas subterrâneas como escoamento retardado. Assim, o escoamento retardado é verificado por um intervalo de tempo entre a resposta incipiente do aquífero ao bombeamento, e o subsequente declínio do nível freático.

Figura 4.15 - Variação, em escala bilogarítmica, de W com ts

As primeiras respostas ao dilema do escoamento retardado, baseadas em conceitos físicos bem definidos, foram apresentadas simultaneamente e independentemente por NEUMAN (1972,1973) e STRELTSOVA (1972, 1973). Esses autores trataram o aquífero não confinado como um sistema compressível e o nível freático como um contorno móvel. Dessa maneira, eles desconsideraram

os efeitos da zona não saturada e da entrada de ar no aquífero. Ambos os pesquisadores também mostraram que o fenômeno do escoamento retardado pode ser simulado matematicamente, tratando a armazenabilidade específica e a produção específica como constantes.

4.5 – A Superposição de Efeitos

Todos os oito modelos conceituais, utilizados neste trabalho e descritos no item 4.2, baseiam-se em aquíferos que se estendem infinitamente na direção radial do poço e em taxas de bombeamento constantes. Essas considerações podem ser estendidas ao estudo de sistemas de poços, utilizando a teoria da superposição.

A superposição pode ser usada para estimar os efeitos de poços interferentes, descontinuidades do aquífero, recarga, recuperação da superfície piezométrica após interrupção do bombeamento e bombeamentos intermitentes. As equações dos modelos que descrevem o escoamento são lineares na variável independente rebaixamento, por conseguinte, uma combinação linear de soluções individuais é também uma solução.

De todos os casos em que pode ser utilizada, a superposição de efeitos assume, neste trabalho, fundamental destaque no estudo das interferências entre poços, sendo a principal ferramenta na avaliação dos rebaixamentos totais.

Os efeitos de sistemas de poços múltiplos, no prognóstico dos rebaixamentos num determinado ponto, é calculado pelo somatório dos rebaixamentos calculados individualmente para cada poço. A Figura 4.16 ilustra essa situação. Essa figura representa, de maneira simplificada, a alteração da superfície piezométrica causada pelo bombeamento de dois poços vizinhos. O efeito individual do poço 1 é o rebaixamento s_1 . Da mesma forma, o efeito individual do poço 2 é o rebaixamento s_2 . Assim, o rebaixamento total, calculado pela superposição dos dois efeitos, pode ser representado pela soma: $s_{total} = s_1 + s_2$. Este procedimento é válido para qualquer número de poços.

Figura 4.16 - Esquema de dois poços interferentes.

4.6 – O Programa Computacional

4.6.1 – Preliminares

Diante dos conceitos básicos discutidos nos itens anteriores, esta parte do trabalho encerra como objeto, a apresentação das estruturas do programa e as diretrizes para a correta utilização do mesmo.

As estruturas principais do programa são planilhas que atuam como dispositivos de saída e apresentação de dados. Treze planilhas são disponíveis, a saber: PLAN1, FUNÇÕES, IND, IND2; POÇOS, MEIO, SEÇÕES, DISTÂNCIAS, W, W2, REBAIXAMENTOS, REBAIXAMENTOS2 e COTAS FINAIS.

Vale lembrar que, embora a parte mais notável do programa se destine ao cálculo de interferências entre poços, outras opções de grande valor são disponíveis, dentre elas, o cálculo das funções de poços (W) e a análise individual de rebaixamentos. O próprio cerne do programa, a interferência entre poços, divide-se em opções que serão discutidas nos itens seguintes.

Figura 4.17 - Trecho de código em Visual Basic utilizado no programa.

Figura 4.18 – Opções de cálculo disponíveis no programa

O início do aplicativo ocorre a partir da planilha PLAN1, através do acionamento do botão INICIAR. Mediante essa operação, abre-se uma tela com uma listagem de seis opções gerais, quatro delas destinadas à análise de sistemas de poços. A Figura 4.18 ilustra essa janela, a partir da qual as diretrizes de cálculo se ramificam.

A seleção de uma das alternativas deve ser seguida do acionamento do botão CONTINUAR. De uma maneira geral, cada opção leva a seqüências de procedimentos diferentes. Convém, portanto, traçar, ainda neste item, a estrutura seqüencial básica de cada preferência. Maiores detalhes acerca de cada procedimento serão discutidos nos itens seguintes. De forma simplificada, as diretrizes de cálculo, para cada opção, seguem o seguinte esquema:

- Cálculo de Funções de Poços:

- Interferências entre Poços / Interferências com Desligamento de Poços:

- Curvas de Nível – Cálculos em Seções / Cálculos em Seções com Desligamento de Poços:

- Análise Individual de Poços:

4.6.2 – Cálculo de Funções de Poços

Esta opção reúne os algoritmos apresentados no item 4.2 devidamente codificados para a linguagem utilizada. Ainda que assuma, dentro do programa, um caráter secundário no que se refere ao cálculo de rebaixamentos, constitui uma escolha interessante quando se quer estimar o rebaixamento causado, por um único poço, num determinado ponto, para um tempo de bombeamento pré-fixado. Representa ainda uma alternativa viável quando se quer confirmar rebaixamentos calculados por outras opções do programa.

Como foi mostrado anteriormente, sua utilização ocorre por meio de duas janelas, a primeira para escolha do modelo a ser aplicado, a segunda para entrada

de dados e apresentação de resultados. Os resultados finais de cada cálculo são ainda resumidos na planilha PLAN1.

As figuras abaixo ilustram, de maneira esquemática, as janelas desta opção.

Figura 4.19 – Opções de modelos

A primeira janela, representada pela figura 4.19, apresenta ao usuário as oito opções de modelos descritas no item 4.2. A partir do acionamento do botão CONTINUAR, abre-se nova janela, representada pela Figura 4.20. Ainda no mesmo formulário (Figura 4.19), o acionamento do botão VOLTAR, retorna o aplicativo para o formulário de opções gerais do programa, representado pela Figura 4.18.

A Figura 4.20 reproduz o formulário de entrada e saída de dados relacionados ao cálculo das funções de poços. Os dois primeiros campos absorvem os dados de entrada que devem ser totalmente fornecidos pelo usuário.

ENTRADA DE DADOS:

do aquífero	operacionais	resumo
ESPESSURA (m): 150	DISTÂNCIA (m): 100	TRANSMISSIBILIDADE (mD): 15
PERMEABILIDADE (mD): 0.1		U: 1.90258751902588E-06
ARMAZENAMENTO: 0.0001	TEMPO (h): 8760	W(u): 12.5950816487392

CALCULAR PLANILHA LIMPAR VOLTAR

Figura 4.20 – Janela de cálculo de funções de poços

Nos casos de cálculo de aquífero superposto por aquitard, modelos 3, 4 e 8, há ainda um outro campo para entrada de dados referentes ao aquitard. De toda forma, o último campo dispõe os resultados calculados pelo acionamento do botão CALCULAR. É interessante notar que a figura 4.20 é apenas esquemática, pois a cada modelo corresponde um formulário específico.

Nota-se que essa segunda janela apresenta ainda mais três botões. O acionamento do botão PLANILHA leva o usuário ao resumo do último procedimento de cálculo efetuado, armazenado na planilha FUNÇÕES. O botão LIMPAR apaga de todos os campos os dados incorporados na operação anterior, possibilitando nova seqüência de cálculos. Esse botão tem boa praticidade quando o novo cálculo se refere a aquíferos e situações operacionais diferentes da operação anterior. Quando se efetua avaliações sucessivas com circunstâncias que conservam a maioria dos dados, pode-se simplesmente selecionar cada campo com o mouse e alterar seu valor, repetindo o processo de cálculo para essa nova situação. Essa alternativa conduz a certa economia de tempo quando se realiza um

grande número de operações semelhantes. O botão VOLTAR, apresenta o formulário anterior para que nova opção de modelo seja selecionada.

4.6.3 – Interferências entre Poços / Interferências com Desligamento de Poços

Estas duas opções constituem a parte essencial do programa e, conforme foi mostrado nos esquemas do item 4.6.1, absorvem a maior quantidade de planilhas e, por conseguinte, uma maior seqüência de cálculos. A seleção de uma destas duas opções, a partir da janela de opções gerais, apresenta diretamente o formulário de cadastro de poços. Dispõe-se de duas janelas, uma para cada alternativa, seja interferências com ou sem desligamento de bombas. Antes de apresentar os procedimentos de cadastro, é fundamental que se tornem inteligíveis os conceitos básicos dos cálculos de interferência desenvolvidos e utilizados neste trabalho. Serão estes conceitos objeto das discussões apresentadas no item seguinte.

4.6.3.1 – Generalidades

É interessante que se conheça previamente a quantidade total de poços a serem considerados na simulação de interferências. Porquanto uma análise anterior da extensão do problema (poços, área de estudo, períodos de bombeamento, etc.) torna-se das mais convenientes. Esse procedimento evita uma série de transtornos, dentre eles, a necessidade de se retornar aos procedimentos de cadastro quando os cálculos estão já adiantados.

O fornecimento das coordenadas dos poços é obrigatório para que sejam calculadas as distâncias entre eles. O sistema de coordenadas utilizado neste trabalho é retangular. Como exemplo, podem-se utilizar as coordenadas UTM nas direções norte-sul e leste-oeste, não havendo porém, nenhuma obrigatoriedade de se aplicar essa regra. Quando não se dispõe das coordenadas dos poços estudados, estas podem ser levantadas, de maneira relativa, através de medições em mapas.

Outro conceito da mais fundamental importância refere-se aos períodos de bombeamento. Neste trabalho tais períodos são fixados por datas (dia/ mês/ ano).

Essas datas são introduzidas ao aplicativo na fase de cadastramento dos poços. No caso de interferências sem desligamento de bombas duas datas são necessárias: aquela de início ou inauguração do poço, e aquela em que, no decorrer da operação, foi coletado o nível dinâmico do poço. Os rebaixamentos são então calculados a partir deste nível medido e a cota dinâmica final no poço é obtida da subtração, ao nível dinâmico verificado, dos rebaixamentos estimados. Nos casos de interferências com desligamento de bombas um novo dado, correspondente à data em que a bomba foi desligada, é adicionado ao formulário de cadastro. No final do cadastro, uma caixa de diálogo é aberta para fixação da data de referência, que representa o instante em que se quer conhecer os níveis dinâmicos finais nos poços.

Definem-se pois, três intervalos de tempo que são calculados no final do processo de cadastramento e anexados à planilha POÇOS. O intervalo chamado TEMPO1 abrange toda operação do poço desde a inauguração até a data de referência. O intervalo TEMPO2 abrange a operação desde a inauguração até a data de medição em campo dos níveis dinâmicos. Eventualmente este TEMPO2 pode ser nulo quando se considera o nível medido igual ao nível estático do poço, desta forma as datas de inauguração e de medição são coincidentes. O TEMPO3 aparece apenas nos casos de interferências com desligamento de bombas e compreende a operação desde a inauguração até a data em que houve a interrupção do bombeamento. A figura 4.21 ilustra esses três intervalos definidos.

Figura 4.21- Intervalos de tempo utilizados no aplicativo

Vale lembrar que a data de desligamento pode percorrer toda a escala de tempo, não precisando necessariamente estar entre as datas de medição e de

referência. Ainda, esses intervalos não precisam ser calculados previamente pelo usuário, uma vez que, a partir das datas informadas no cadastro, tais períodos são determinados automaticamente pelo programa.

4.6.3.2 – O Procedimento de Cadastro de Poços

Diante dos aspectos conceituais percorridos no item anterior, torna-se fundamental que se expliquem os processos para o correto cadastramento dos poços. Convém lembrar que a diferença no formulário de cadastro da opção de interferência sem desligamento em relação à interferência com desligamento é que, esta última apresenta campos adicionais para entrada da data de desligamento do poço que está sendo cadastrado. A figura 4.22 apresenta, de maneira esquemática, esse formulário.

CADASTRO DE POÇOS TUBULARES

LISTA DE MODELOS :

- MODELO 1 - TRANSIENTE, CONFINADO
- MODELO 2 - TRANSIENTE, CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 3 - TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARDO SUPERPOSTO
- MODELO 4 - TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARDO SUPERPOSTO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 5 - TRANSIENTE, NÃO CONFINADO
- MODELO 6 - TRANSIENTE, NÃO CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 7 - TRANSIENTE, CONVERSÃO DE CONFINADO PARA NÃO CONFINADO

NÚMERO DE POÇOS A SEREM ANALISADOS: 4

NÚMERO DO POÇO: A

COORDENADAS UTM (m): L = 0: 205500
N = 5: 7659040

PROFUNDIDADES DAS EXTREMIDADES DO FILTRO (m):
TOPO: 0
BASE: 150

INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO POÇO: DIA: 15 MÊS: 6 ANO: 1980
DATA DA COLETA DE CAMPO: DIA: 18 MÊS: 10 ANO: 1990

COTA DA CUA (m): 455

VAZÃO (m³/s): 78 MODELO: 1

LIMPAR PLANILHA ORDENAR CONTINUAR CADASTRO VER CADASTRO VOLTAR

Pronto CAPS NUM

Figura 4.22 . Formulário para o cadastro de poços

Antes de se iniciar o cadastro propriamente dito, o qual será afixado na planilha POÇOS, convém acionar o botão LIMPAR PLANILHA. Esse procedimento justifica-se pela necessidade de apagar resquícios da aplicação anterior. O campo de inserção do total de poços é preenchido apenas no cadastro do primeiro poço, pois trata-se, na verdade, de uma importante variável que definirá não somente o término do cadastramento, mas também a extensão das outras planilhas. Não há necessidade de maiores precauções do usuário quanto a este campo, pois o próprio cursor indicará os dados que devem ser preenchidos a cada momento.

Após preenchidos todos os campos, deve-se acionar o botão CADASTRAR e, em seguida, o botão CONTINUAR CADASTRO. A anexação dos poços à planilha é feita mediante essas duas operações. Quando todos os poços tiverem sido cadastrados, abre-se automaticamente uma caixa de diálogo informando o fim deste processo. Há também a necessidade de se fazer a entrada da data de referência, do valor da precipitação média anual e do coeficiente de infiltração, estes dois últimos valores são utilizados no cálculo da recarga pela precipitação. Todos estes dados são inseridos em caixas de diálogo que surgem automaticamente durante esta fase do cadastro. A última operação consiste em acionar o botão VER PLANILHA. A partir daí todos os poços que devem ser analisados já estão corretamente dispostos na planilha, inclusive com os intervalos de tempo calculados. O acionamento do botão VOLTAR retorna ao formulário de opções gerais.

4.6.3.3 – A Planilha POÇOS

Esta planilha encerra todos os dados do cadastro e os intervalos de tempo calculados. As características de cada poço são dispostas em cada linha da tabela. Seis botões são ainda disponíveis: dois CONTINUAR CADASTRO (interferências sem e com desligamento), CARACTERIZAR AQUÍFERO, LIMPAR PLANILHA, DISPOSIÇÃO DOS POÇOS e PRÓXIMA PLANILHA.

Os botões CONTINUAR CADASTRO retornam ao formulário de cadastro de poços, permitindo a inserção de novos poços na análise. Nesses casos, o

número total de poços deve ser novamente preenchido de forma a resultar nos poços já cadastrados e naqueles a cadastrar.

Figura 4.23 – A planilha POÇOS

O botão CARACTERIZAR AQUÍFERO conduz o processo para nova etapa, apresentando a planilha MEIO. Nessa planilha são afixados os dados cadastrais das formações subterrâneas mediante caixas de diálogo que são apresentadas automaticamente após o preenchimento da anterior.

O botão LIMPAR PLANILHA apaga, da tabela de poços, todos os dados. O botão DISPOSIÇÃO DOS POÇOS apresenta o arranjo espacial dos poços de acordo com suas coordenadas. Essa alternativa gráfica é representada pelo GRÁFICO1. O botão PRÓXIMA PLANILHA conduz o usuário à planilha MEIO, todavia sem acionar as caixas de diálogo de cadastramento das formações subterrâneas.

O processo de acionamento de botões nas planilhas é uma característica do programa. Assim, o usuário transfere cada etapa de cálculo de uma planilha para outra sem necessidade de maiores conhecimentos acerca do EXCEL.

4.6.3.4 – A Planilha MEIO

Além das características da formação subterrânea no local de cada poço, esta planilha resume ainda os dados necessários à recarga, ou seja, a precipitação média anual e o coeficiente de infiltração. A planilha MEIO assume, juntamente com a planilha POÇOS, importante papel, pois ambas encerram a base de dados para a formação das planilhas seguintes.

Concluído o cadastro do meio subterrâneo, encerra-se a etapa de maior interação do usuário com o programa. Nessa circunstância pode-se optar por duas alternativas: realizar operação direta, ou calcular planilha por planilha. Em termos de execução não há nenhuma diferença entre essas duas alternativas. A única disparidade é que a primeira opção preenche todas as planilhas necessárias, apresentando no final apenas aquela com os resultados requeridos. A segunda opção calcula cada etapa sem, no entanto, passar para a próxima planilha, a menos que um evento seja disparado – no caso, o acionamento de botões pelo usuário.

A escolha entre as opções de cálculos diretos e cálculos por planilhas depende da comodidade do usuário. Os cálculos por planilhas têm a vantagem de mostrar os valores calculados que preenchem as tabelas, enquanto que o cálculo direto oculta todas as tabelas até que os resultados requeridos sejam totalmente calculados, constituindo uma opção prática quando, por exemplo, o usuário não quer ou não pode acompanhar as operações.

A planilha MEIO dispõe de quatro botões: OPÇÕES DE CÁLCULO (no caso de se optar por cálculo direto); DISTÂNCIAS ENTRE OS POÇOS, CADASTRAR SEÇÕES e LIMPAR PLANILHA (estes três últimos no caso de cálculos por planilhas).

Figura 4.24 – A planilha MEIO

O botão OPÇÕES DE CÁLCULO abre uma janela de opções gerais de cálculo de interferências. Nesse formulário pode-se optar pelas quatro alternativas fornecidas pelo programa, seja interferência entre poços ou em seções, com ou sem desligamento de poços. A seleção de qualquer dessas quatro alternativas abre o formulário de cálculos diretos. Cada cálculo refere-se a uma planilha do programa e o usuário pode optar, de acordo com sua conveniência, até qual planilha ele deseja obter valores.

O botão DISTÂNCIA ENTRE OS POÇOS abre a etapa de cálculos propriamente ditos. Seu acionamento mostra, de início, a construção da planilha DISTÂNCIAS e, posteriormente, os valores de distâncias calculados e anexados às células da planilha.

O botão CADASTRO DE SEÇÕES abre um formulário de cadastro que será apresentado no item 4.7, quando a opção de cálculo de interferências em

seções for discutida. Portanto, este botão não tem qualquer utilidade na avaliação de interferências entre poços.

O botão LIMPAR PLANILHA apaga da planilha MEIO todos os dados, possibilitando novo cadastro.

4.6.3.5 – A Planilha DISTÂNCIAS

Figura 4.25 – A planilha DISTÂNCIAS

Esta planilha é construída a partir das coordenadas armazenadas na planilha POÇOS. Os valores são dispostos em forma de matriz e o esquema de leitura dos mesmos é esquematizado na parte superior da tabela, como na Figura 4.25.

Pela figura 4.25 nota-se que os poços são dispostos numa determinada linha e numa determinada coluna, formando uma matriz cujos valores que a preenchem são as distâncias entre eles. É fácil notar que, como os poços se

repetem na linha e na coluna, tal matriz é simétrica, com a diagonal principal nula, uma vez que corresponde às distâncias entre o poço e ele mesmo.

Essa planilha possui sete botões, a saber: quatro botões FUNÇÕES para cálculo das funções dos poços (*W*), LIMPAR PLANILHA, PLANILHA MEIO, PLANILHA SEÇÕES.

Os quatro botões para cálculo das funções dos poços correspondem às quatro opções de cálculo de interferência disponíveis no programa. Para o caso de interferências entre poços, apenas os botões para as alternativas sem e com desligamento de bombas interessam. Esses botões constroem a planilha *W*, iniciando a principal parte do procedimento, que é justamente o cálculo das funções.

Aos demais botões dispensam-se importâncias secundárias. O LIMPAR PLANILHA apenas apaga todos os valores da tabela e os botões PLANILHA MEIO e PLANILHA SEÇÕES, nada mais são do que simples atalhos para estas tabelas, não ativando nenhum tipo de cálculo.

4.6.3.6 – A Planilha *W*

Aqui inicia-se a parte de maior importância e, em termos de tempo de execução, mais dispendiosa do programa. A planilha *W* resume os valores das funções dos poços para o intervalo TEMPO1, definido no item 4.6.2.1. Assim, aproveitam-se os intervalos correspondentes já calculados para cada poço durante o processo de cadastro dos mesmos. Tais valores são os mesmos da planilha POÇOS, correspondentes à coluna TEMPO1. Convém citar que qualquer intervalo de tempo considerado neste programa está na unidade [h].

Forma-se uma matriz com os valores calculados das funções de cada poço. A forma de leitura dessa planilha, muito semelhante à da planilha DISTÂNCIAS, é ilustrada pela Figura 4.26.

É importante citar que a cada coluna correspondem os valores das funções de um determinado poço nos demais. A leitura em linha não tem nenhum significado.

Figura 4.26 – A planilha de funções de poços (W)

Esta planilha tem construção bem mais lenta que as demais, pois os valores são calculados de acordo com os modelos de cada poço. E como foi mostrado no item 4.2, há modelos mais complexos que outros. O tempo de execução do programa é praticamente limitado pela construção desta e da próxima planilha, a W2.

Nos casos de desligamentos de poços, o intervalo TEMPO3 fatalmente será menor ou igual ao intervalo TEMPO1 (ver figura 4.21). Nessa situação, as funções calculadas provêm da superposição dos efeitos do bombeamento no período TEMPO1, causando rebaixamento; e do bombeamento no intervalo TEMPO1 – TEMPO3, causando recuperação da superfície piezométrica na vizinhança do poço. O efeito final é uma diminuição do valor da função do poço.

Seis botões são disponíveis, a saber: quatro FUNÇÕES para casos de interferências, LIMPAR PLANILHA e PLANILHA ANTERIOR.

Os botões de cálculo de funções abrangem as quatro opções de cálculo de interferências fornecidas pelo programa, mas aqui apenas interessam os casos de

interferências entre poços. Esses botões ativam a planilha W2 que é a próxima na seqüência de operações, calculando as funções para um intervalo obtido dos valores de TEMPO1 e TEMPO2 de cada poço. Esse intervalo será especificado no item seguinte.

Com uma importância secundária, os botões LIMPAR PLANILHA e PLANILHA ANTERIOR são pouco utilizados, mas constituem uma opção quando se quer apagar os valores da planilha W ou voltar à planilha DISTÂNCIA sem efetuar, contudo, qualquer tipo de cálculo.

4.6.3.7 – A Planilha W2

Figura 4.27 – A planilha de funções W2

Esta planilha apresenta grande semelhança com a planilha anterior. Nela resumem-se os valores das funções para um intervalo obtido dos valores TEMPO1 e TEMPO2 de cada poço. Para delimitar esse intervalo, fez-se uma

abstração, utilizando um sistema genérico de dois poços (i e j), ilustrada pela Figura 4.28.

Figura 4.28 - Artifício para cálculo do intervalo de tempo da planilha W2

Da Figura 4.28, definem-se os seguintes termos:

- to_i = tempo de início ou de inauguração do poço i ;
- to_j = tempo de início ou de inauguração do poço j ;
- tm_i = instante de coleta de nível dinâmico no poço i ;
- tm_j = instante de coleta de nível dinâmico no poço j ;
- tr = tempo de referência (comum a todos os poços);
- $\delta = tm_j - tm_i$.

Quando se calcula o rebaixamento causado pelo poço i no poço j , a partir do nível dinâmico medido neste último, o intervalo de tempo resultante é aquele em destaque na figura 4.28. Este intervalo não pode, contudo, ser calculado pela diferença $TEMPO1_j - TEMPO2_j$, pois a planilha W já foi construída baseada no período $TEMPO1_i$. Desta maneira o intervalo de tempo a ser considerado no cálculo da planilha W2 é definido por:

$$\Delta t = TEMPO2_i + \delta, \text{ onde : } \delta = (TEMPO1_i - TEMPO2_i) - (TEMPO1_j - TEMPO2_j) \quad (4.89)$$

Essa formulação é geral e pode ser aplicada em análises de vários poços, uma vez que as funções são avaliadas dois a dois, ou seja, pela ação de um poço ativo em outro poço considerado como passivo. Um bom exemplo é quando se calcula o rebaixamento do poço i nele mesmo. Nesse caso, o intervalo δ é nulo e o período considerado corresponde ao valor TEMPO2 para o próprio poço i . Nos casos de desligamento de poços, a análise é semelhante à da planilha W, superpondo efeitos de rebaixamento e recuperação da superfície piezométrica.

A forma de leitura da planilha W2 é idêntica à da planilha W, com as funções do poço ativo nos pontos (poços considerados como passivos) observadas por coluna.

A planilha W2 possui quatro botões de ativação, a saber: dois botões REBAIXAMENTOS, LIMPAR PLANILHA e PLANILHA ANTERIOR.

Os botões REBAIXAMENTOS ativam e calculam a planilha REBAIXAMENTOS. Um dos botões relaciona-se ao cálculo de interferência, com ou sem desligamento; e o outro ao cálculo de interferência em seções.

Os botões LIMPAR PLANILHA e PLANILHA ANTERIOR têm destaque secundário, pois não executam cálculos; apenas servem de auxiliares na limpeza de valores e de atalho, respectivamente.

4.6.3.8 – A Planilha REBAIXAMENTOS

Encerrados os cálculos das planilhas W e W2, chega ao fim a parte mais onerosa da avaliação de interferências. As próximas planilhas, como esta REBAIXAMENTOS, são construídas por operações bem menos complexas.

A planilha REBAIXAMENTOS resume os valores calculados para o intervalo TEMPO1 de cada poço. A forma de leitura segue o mesmo esquema das planilhas de funções, uma vez que os valores são dispostos num arranjo matricial. A Figura 4.29 ilustra a planilha.

Figura 4.29 – A planilha REBAIXAMENTOS

Os valores das funções calculados na planilha W servem de base para a construção da planilha REBAIXAMENTOS, de forma que os mesmos são calculados por:

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T} \right) \cdot W = \text{constante} \cdot W \quad (4.90)$$

Os valores significativos dos rebaixamentos que um poço causa em outro são lidos por coluna, de acordo com a Figura 4.29. A penúltima coluna da tabela refere-se à recarga do aquífero devido à precipitação. Esta recarga aparece apenas nas formações não confinadas e atua na recuperação da superfície piezométrica.

Os rebaixamentos totais no período TEMPO1 resultam da superposição dos rebaixamentos individuais em cada ponto, inclusive do efeito da recarga. Seus valores são mostrados na última coluna da planilha.

A quantidade e as funções dos botões de ativação são semelhantes às da planilha W2. Os botões REBAIXAMENTOS dividem-se para os casos de interferências entre poços e de interferências em seções. Ativam e constroem a planilha REB2, baseada nas funções que a planilha W2 resume.

4.6.3.9 – A Planilha REB2

É grande a semelhança dessa planilha com a anterior. A forma, o modo de leitura e as equações utilizadas na sua construção são, da mesma forma, idênticas.

Convém lembrar que, aqui, os rebaixamentos são calculados tomando por base as funções da planilha W2. Da diferença entre os rebaixamentos totais da planilha anterior com os rebaixamentos totais dessa tabela é que se obtêm os rebaixamentos finais a serem descontados dos níveis dinâmicos medidos de cada poço.

A REB2 possui os seguintes botões de ativação: dois botões COTAS FINAIS, LIMPAR PLANILHA e PLANILHA ANTERIOR.

Os botões COTAS FINAIS ativam e calculam a última planilha da análise, fornecendo os resultados finais dos rebaixamentos nos poços. Os botões LIMPAR PLANILHA e PLANILHA ANTERIOR possuem a mesma função daqueles das outras planilhas.

4.6.3.10 – A Planilha COTAS

Com a apresentação desta planilha terminam os cálculos de interferências entre poços. Nela aparecem os valores dos níveis dinâmicos medidos, dos rebaixamentos totais e dos níveis dinâmicos finais. Por convenção, nesta tabela, os valores dos rebaixamentos aparecem negativos, quando indicam decréscimo de cota do nível dinâmico do poço e positivos, quando indicam recuperação dos mesmos.

Três botões são ainda disponíveis: GRÁFICO DAS SEÇÕES, LIMPAR PLANILHA e PLANILHA ANTERIOR. Estes dois últimos já têm funções conhecidas. O botão GRÁFICO DAS SEÇÕES ativa e constrói um GRÁFICO em

três dimensões da superfície piezométrica final, a partir dos nós de seções pré-estabelecidas. Não tem, portanto, qualquer significado no cálculo de interferências entre poços.

Figura 4.30 – A planilha de resultados finais

Convém citar que, como os poços são aleatoriamente espalhados na área estudada, o Microsoft EXCEL não consegue traçar a superfície piezométrica, pois apenas conta com o recurso de traçar gráficos em três dimensões a partir de pontos alinhados. Quando se parte para a opção de cálculos em seções esse gráfico é perfeitamente construído.

Diante disso, uma sugestão interessante para visualização espacial da superfície piezométrica é a utilização do programa SURFER, como será visto nas simulações realizadas com o programa e apresentadas no Capítulo 5.

4.6.4 – Cálculo de Interferências em Seções, sem e com Desligamento de Poços

Esta opção, embora não avalie os efeitos de interferência entre os poços, estima o efeito do bombeamento desses numa área de estudo pré-especificada. Essa área é dividida em segmentos, traçados em duas direções perpendiculares, e os rebaixamentos são calculados nos nós da malha formada por tais segmentos.

A seqüência de operações é bem parecida com o caso anterior, diferindo basicamente na necessidade de se cadastrar as seções e na saída gráfica final, representando a superfície piezométrica. No mais, as planilhas utilizadas são as mesmas, assim como são idênticas as instruções para seu cálculo. Deve-se porém, tomar cuidado quando do acionamento dos botões de ativação e construção das planilhas, pois esses devem ser específicos para a situação de cálculo em seções. Em suma, deve-se evitar confundi-los com os botões de cálculo de interferências entre poços.

4.6.4.1 – O Procedimento de Cadastro das Seções

O cadastro das seções ocorre a partir do acionamento do botão CADASTRAR SEÇÕES, da planilha MEIO. Quando as operações chegam a esse ponto, os poços e as formações subterrâneas já devem estar cadastrados, seguindo os procedimentos descritos nos itens de interferências entre poços.

O botão CADASTRAR SEÇÕES abre um formulário de entrada dos dados que definem a área estudada e a quantidade de seções traçadas. Essa janela apresenta campos onde são afixados os valores da área em hectares, do total de nós da malha traçada e dos incrementos nas duas direções perpendiculares. Estes valores são automaticamente calculados pelo programa quando do acionamento do botão CALCULAR, presente na própria janela.

Os botões LIMPAR e VOLTAR não têm funções essenciais no cadastramento, pois enquanto o primeiro apenas limpa os campos do formulário, o segundo retorna à janela de cadastro de poços.

CADASTRO DE SEÇÕES

PONTOS	COORDENADAS UTM (m)		COTA D'ÁGUA (m)	SITUAÇÃO	RI
	L-O	N-S			
1	0,00	0,00	200,00	nc	compr
	0,00	100,00	200,00	nc	larg
	0,00	200,00	200,00	nc	total
	0,00	300,00	200,00	nc	s
	0,00	400,00	200,00	nc	point
2	0,00	500,00	200,00	nc	Δ (l
	50,00	0,00	200,00	nc	Δ (l
	50,00	100,00	200,00	nc	

Figura 4.31 – A planilha de cadastro das seções

O cadastro das seções propriamente dito, ou seja, a construção da planilha SEÇÕES, ocorre pelo acionamento do botão CADASTRAR. Esse evento ativa a planilha SEÇÕES, anexando os valores calculados para a área em questão, e apresentando caixas de diálogo para caracterização dos pontos de cada seção pré-definida.

Um dado de grande importância que deve ser fixado é a data em que os níveis dinâmicos dos pontos das seções foram anotados. Essa data deve ser idêntica à de coleta de níveis nos poços, uma vez que parte-se do princípio de que tais níveis sejam coletados a partir de uma carta de cotas dinâmicas e não de medidas de campo feitas aleatoriamente. A entrada desse dado ocorre pelo preenchimento de caixas de diálogo devidamente apresentadas.

Para efeitos de consideração da recarga nos pontos da malha, deve-se entrar com a situação de confinamento de cada ponto. A fixação desse dado

também ocorre pelo preenchimento de caixas de diálogo apresentadas automaticamente no cadastro dos pontos.

A fixação das coordenadas é amarrada pela locação do primeiro ponto da primeira seção. Com os valores já calculados dos espaçamentos entre pontos de cada segmento e entre cada segmento destes, as coordenadas dos pontos são calculadas pelo programa e afixadas nas células adequadas da planilha SEÇÕES.

É livre, por parte do usuário, a escolha do número de seções e do número de pontos por cada seção. Essa liberdade e a busca de maiores refinamentos da malha esbarram, porém, na possibilidade de tornar a operação das mais onerosas em termos de tempo de execução. Não se pode precisar qual deve ser a malha ideal, aquela que não leve o processo a cálculos muito demorados, pois além do fator do número total de pontos a serem calculados, há que se considerar também os modelos conceituais nos quais os poços cadastrados se encaixam.

4.6.4.2 – A Planilha COTAS

Apesar de ser a mesma planilha utilizada na análise de interferências entre poços, sua construção segue uma tendência que a diferencia das demais planilhas desse caso. No estudo de seções, a planilha COTAS assume a forma de uma matriz, onde cada linha representa um ponto do segmento e cada coluna representa um destes segmentos. Os níveis dinâmicos calculados para cada ponto constituem o corpo dessa matriz.

Na verdade, a planilha COTAS representa a tabela base para construção do gráfico em três dimensões que revela a forma tomada pela superfície piezométrica. A formação dessa superfície ocorre pelo acionamento do botão GRÁFICO DAS SEÇÕES. Após este evento, surge uma caixa de diálogo onde o usuário deve autorizar a exclusão do gráfico anterior para que o novo gráfico assumo seu lugar.

Enfim, percebe-se que a opção de cálculo de interferências em seções, embora siga os mesmos princípios, apresenta uma seqüência de operações mais extensa do que o cálculo de poços, uma vez que abrange uma saída gráfica e uma planilha adicional de cadastro.

Figura 4.32 – A superfície piezométrica final

4.6.5 – Análise Individual de Poços

A análise individual de poços constitui o último item da lista de opções gerais do programa. Esta representa uma alternativa interessante quando se quer avaliar o efeito de um único poço num determinado sistema.

A partir do formulário de opções gerais, abre-se outra janela com duas alternativas de cálculo individual de poços: distância fixa com tempo variável e distância variável com tempo fixo. No primeiro caso, avalia-se a variação, com o tempo de bombeamento, dos rebaixamentos causados por um poço num determinado ponto. O segundo caso calcula o cone de depressão, na vizinhança do poço, para um determinado instante após o início do bombeamento. A seleção de cada uma dessas opções abre diferentes formulários para entrada de dados. A seguir discutem-se essas duas alternativas de avaliação individual.

4.6.5.1 – Distância Fixa e Tempo Variável

O formulário de entrada de dados desta alternativa é dos mais simples e pode ser representado esquematicamente pela figura 4.33.

Microsoft Excel - ANTEPRONTO

ANÁLISE INDIVIDUAL DE POÇOS

LISTA DE MODELOS :

- MODELO 1 : TRANSIENTE, CONFINADO
- MODELO 2 : TRANSIENTE, CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 3 : TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARD SUPERPOSTO
- MODELO 4 : TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARD SUPERPOSTO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 5 : TRANSIENTE, NÃO CONFINADO
- MODELO 6 : TRANSIENTE, NÃO CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 7 : TRANSIENTE, CONVERSÃO DE CONFINADO PARA NÃO CONFINADO
- MODELO 8 : TRANSIENTE, NÃO CONFINADO, AQUITARD SUPERPOSTO, PENETRAÇÃO PARCIAL

NÚMERO TOTAL DE VAZÕES DE BOMBEAMENTO:

TEMPO FINAL DA ANÁLISE (h):

INCREMENTO DE TEMPO (h):

modelo 1   modelo 2   modelo 3   modelo 4   modelo 5   modelo 6   modelo 7   modelo 8

Pronto

Microsoft Word - planilhas_D   Microsoft Excel - AN...

15:05

Figura 4.33 – Formulário de entrada de dados

Nota-se que a intermitência na exploração é considerada e o número total de vazões de bombeamento denota cada período de tempo com diferentes taxas de descarga. Deve ainda ser especificado o tempo final da análise e o incremento de tempo, permitindo o cálculo dos pontos da curva *rebaixamento x tempo*.

O formulário apresenta ainda oito botões referentes aos modelos conceituais descritos no item 4.2. O acionamento de cada um desses botões abre caixas de diálogo onde devem ser preenchidos os dados do aquífero e operacionais para o cálculo de cada modelo. As taxas de descarga e os tempos limites de atuação de cada uma devem também ser fornecidos. Após o preenchimento de todas as caixas de diálogo, inicia-se a construção da planilha

IND que expõe, além dos valores de rebaixamentos calculados, os gráficos dos rebaixamentos e das vazões em função do tempo.

A planilha IND apresenta ainda o botão CALCULAR que ativa novamente o formulário, permitindo a realização de novas análises.

4.6.5.2 – Distância Variável e Tempo Fixo

Esta situação também apresenta uma janela de entrada de dados bem simples, mas com significativas diferenças em relação à opção anterior. Essa janela pode ser representada esquematicamente pela Figura 4.34.

ANÁLISE INDIVIDUAL DE POÇOS - CONE DE DEPRESSÃO

LISTA DE MODELOS:

- MODELO 1: TRANSIENTE, CONFINADO
- MODELO 2: TRANSIENTE, CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 3: TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARD SUPERPOSTO
- MODELO 4: TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARD SUPERPOSTO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 5: TRANSIENTE, NÃO CONFINADO
- MODELO 6: TRANSIENTE, NÃO CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 7: TRANSIENTE, CONVERSÃO DE CONFINADO PARA NÃO CONFINADO
- MODELO 8: TRANSIENTE, NÃO CONFINADO, COM AQUITARD SUPERPOSTO

OPÇÕES:

☒ CASO 1: apenas um poço

☐ CASO 2: comparando dois poços

TEMPO (t): 720

DISTÂNCIA INICIAL (m): 10

DISTÂNCIA FINAL (m): 1000

INCRÉMENTO (m): 10

modelo 1 | modelo 2 | modelo 3 | modelo 4 | modelo 5 | modelo 6 | modelo 7 | modelo 8

Pronto NUM

Figura 4.34 – Formulário de entrada de dados

Aqui podem-se comparar, num mesmo gráfico, os cones de dois modelos diferentes, ou apenas estudar o comportamento de um único modelo. Vale lembrar

que o tempo de bombeamento é fixo e deve ser especificado no campo correspondente do formulário.

A extensão em que os rebaixamentos são avaliados e o incremento de espaço devem também ser fornecidos para construção do cone, ou seja, do gráfico *rebaixamento x distância*.

Oito botões são disponíveis no formulário, referindo-se aos modelos conceituais descritos no item 4.2. Quando se faz a opção pelo estudo de apenas um poço, basta que se preencham as caixas de diálogo, apresentadas automaticamente pelo programa, com os dados do aquífero e operacionais. Quando a opção é pelo estudo de dois poços ao mesmo tempo, deve-se acionar o botão referente ao primeiro caso e depois o botão referente ao segundo caso de acordo com o aparecimento de caixas de diálogo específicas.

Os resultados do cálculo e a saída gráfica são expostos na planilha IND2, que, como a planilha IND, também apresenta um botão de acionamento CALCULAR. A função desse botão é idêntica à do caso anterior, ou seja, ativa o formulário de entrada de dados para a realização de uma nova análise.

5 – RESULTADOS

Este capítulo encerra uma série de simulações realizadas com o programa, avaliando, principalmente, casos de interferências entre poços. Com tais simulações formou-se o embasamento das inferências acerca deste trabalho e da sua aplicabilidade em casos práticos de abastecimento de água.

A aplicação do programa, permitiu também um melhor conhecimento do mesmo, das suas limitações e das suas vantagens em termos de tempo de execução e facilidades de manejo.

As análises foram realizadas no Laboratório de Simulação Numérica do Departamento de Hidráulica e Saneamento, na Escola de Engenharia de São Carlos.

Uma ferramenta de grande importância na visualização gráfica dos resultados foi a utilização do SURFER, que possibilitou a construção de superfícies e curvas de contorno, a partir das coordenadas dos poços distribuídos nas áreas estudadas.

As simulações estão divididas em quatro itens, descritos a seguir.

5.1 – Simulações de Interferências entre Poços num Sistema Regional

5.1.1. – Dados e Considerações

Sistemas regionais referem-se a grandes áreas que apresentam domínios de recarga e de descarga de águas subterrâneas. Pela grande extensão, esses sistemas podem reunir diferentes tipos e profundidades de aquífero. A área considerada nestas simulações abrange um quadrado de 20 Km de lado, situada entre as coordenadas UTM(m) 199000 e 219000 na direção oeste-leste; 7646000 e

7666000 na direção sul-norte. Essa região encerra o município de Ribeirão Preto, uma das maiores áreas de concentração de poços do país.

Contudo, as simulações não se referiram ao sistema de abastecimento de água de Ribeirão Preto, embora fossem baseadas nele. Aqui, foram aproveitados os poços dos quais se tinham os níveis dinâmicos coletados em campo, resumidos no relatório da FIPAI (CONTIN NETO, 1996), a respeito de uma avaliação realizada na área considerada. Assim 35 poços tubulares foram considerados nesta avaliação, os quais estão resumidos na tabela 5.1.

Estas simulações consideraram como aquífero o sistema Botucatu-Pirambóia que é o principal manancial subterrâneo da região. Esse aquífero é constituído pelo pacote saturado de arenitos das formações Botucatu (superior) e Pirambóia (inferior). Do topo para a base do aquífero, nota-se uma sucessão de arenitos finos a médios com grãos arredondados, por arenitos siltsos a argilosos com grãos sub angulosos e mal selecionados. A formação Botucatu-Pirambóia é sobreposta pela formação Serra Geral em grandes setores da área analisada.

A formação Serra Geral, por sua vez, é constituída por basaltos fraturados nas porções mais rasas, podendo armazenar e transmitir água para o sistema Botucatu-Pirambóia. Esta simulação considerou, como um aquítarde, a formação Serra Geral, onde esta se encontrava a profundidades menores que 50 m.

O relatório da FIPAI, acerca dos poços de Ribeirão Preto, apresenta ainda uma série de dados, dentre eles os perfis geológicos no local de cada poço, revelando as situações de confinamento ou não confinamento e as formações aquíferas existentes. O lançamento desses dados na área analisada permitiu a construção dos gráficos seguintes que revelam as superfícies delimitadoras do aquífero.

Esses gráficos foram construídos utilizando-se como ferramenta o SURFER. Esse programa permite a construção de gráficos através da interpolação, pelo método de Kriging, de valores aleatoriamente espaçados, o que é totalmente cabível no estudo de interferências, uma vez que os poços apresentam distribuição casual no espaço analisado.

Tabela 5.1 - Dados dos poços utilizados na simulação

poço	vazão (m³/h)	coordenadas UTM		datas		cotas dos filtros (m)			
		L-O (m)	N-S (m)	início	medição	ND (m)	topo	base	modelo
22	77,62	205500,00	7659040,00	15/06/78	18/10/90	455,00	501,00	437,00	6
28	42,48	208400,00	7656300,00	15/07/60	28/09/95	453,09	477,75	443,10	6
37	52,31	206510,00	7653160,00	15/06/62	12/09/94	455,58	457,00	447,00	6
50A	46,47	208540,00	7656170,00	15/06/70	07/02/95	457,34	444,40	420,70	2
57	50,00	205870,00	7659140,00	15/07/79	15/06/95	465,00	500,00	445,00	6
58	73,81	210770,00	7656110,00	15/07/70	19/10/95	453,86	371,60	333,00	6
60	59,63	206280,00	7655860,00	23/10/73	15/06/95	469,00	429,50	305,50	2
61	45,96	213820,00	7654780,00	15/06/72	19/09/95	501,00	501,00	478,60	6
65	221,00	208030,00	7657510,00	15/12/74	17/10/95	431,30	426,00	312,00	6
72	70,00	209310,00	7655400,00	01/11/75	15/06/95	432,00	392,00	278,00	2
76	47,20	201650,00	7655780,00	17/06/78	25/10/94	470,22	418,00	302,99	2
86	30,00	211780,00	7655420,00	30/10/79	15/06/95	531,00	440,10	360,64	6
87	245,72	207840,00	7656960,00	27/07/79	16/10/95	424,00	401,00	301,00	6
91	67,30	210520,00	7656530,00	05/08/80	19/10/95	444,10	437,50	290,00	2
93	85,67	209770,00	7654850,00	14/04/83	27/09/95	456,33	380,00	284,00	2
95	50,00	206900,00	7653020,00	15/06/83	15/06/95	443,00	447,00	321,00	6
99	59,33	205960,00	7652430,00	15/06/83	15/08/95	458,24	451,00	333,00	2
100	50,00	209690,00	7658750,00	28/06/70	15/06/95	431,50	421,74	353,21	6
103	167,00	208670,00	7660840,00	15/01/81	16/05/94	449,00	414,12	314,68	6
106	81,78	209530,00	7660000,00	01/06/86	20/09/95	461,60	406,01	354,96	6
114	62,72	217160,00	7654820,00	16/10/78	17/08/95	536,36	487,80	457,80	6
118	96,79	205920,00	7656920,00	15/04/86	06/06/95	436,24	416,00	288,00	2
125	124,62	210850,00	7661500,00	30/03/87	19/10/95	459,62	436,81	347,27	6
129	185,87	209300,00	7656260,00	16/04/88	06/10/95	413,40	402,00	238,68	6
133	346,50	212500,00	7658070,00	15/08/89	03/08/95	469,02	440,00	338,00	6
139	94,08	212530,00	7652690,00	15/01/90	21/09/95	489,92	447,00	356,00	6
140	246,35	212690,00	7654110,00	15/06/90	28/09/95	485,10	459,20	397,20	6
141	169,48	210250,00	7659860,00	07/06/91	22/09/95	453,20	425,70	355,70	6
142	292,50	205790,00	7652320,00	05/06/91	28/12/94	434,98	383,26	249,05	6
145	200,25	208890,00	7662660,00	15/03/92	26/10/95	466,75	401,55	329,95	6
147	56,34	205850,00	7655810,00	25/04/92	08/12/95	440,00	399,44	255,45	6
151	202,28	206530,00	7651430,00	15/09/94	04/09/95	462,72	414,22	288,64	6
152	219,34	210070,00	7652220,00	15/09/94	04/04/95	477,95	513,00	260,00	6
157	206,43	205900,00	7655460,00	15/06/94	03/10/95	400,69	434,00	245,00	6
B3	131,38	207410,00	7646310,00	10/05/94	26/10/95	508,88	449,00	321,00	6

Gráfico 5.1 - Superfície de topo da formação Serra Geral

Gráfico 5.2 - Gráfico de contorno do topo da formação Serra geral

Gráfico 5.3 - Superfície de topo do aquífero

Gráfico 5.4 - Gráfico de contorno do topo do aquífero

Gráfico 5.5 - Superfície de base do aquífero

Gráfico 5.6 - Gráfico de contorno da base do aquífero

Da superposição entre as superfícies de topo da formação Serra Geral e de topo da formação Botucatu-Pirambóia, podem-se visualizar as regiões de afloramento do aquífero. Outras regiões podem ainda ser discriminadas, dentre elas, as extensões onde se considerou um aquítarde superposto à formação aquífera e os locais onde o aquífero se apresenta confinado pela formação Serra Geral. O gráfico 5.7 ilustra essas áreas.

Gráfico 5.7 - Geologia considerada na simulação

Como mostrado na tabela 5.1, os níveis dinâmicos foram medidos em datas diferentes para cada poço, com a maioria das medições realizadas entre os anos de 1994 e 1995. O gráfico 5.8 ilustra a situação aproximada de confinamento nas datas de medição. As linhas de contorno mais finas representam, em valores absolutos, a carga sobre o topo do aquífero, enquanto que as linhas de contorno mais espessas representam as mesmas regiões delimitadas no gráfico 5.7. De

- condutividade radial (k_r) = 0,1 m/h;
- condutividade vertical (k_v) = 0,01 m/h;
- produção específica (S_y) = 0,2.

Tratando-se de um sistema regional, as espessuras apresentam grandes variações na área analisada. Para fixação da espessura inicial, utilizou-se, para cada poço e nas regiões não confinadas, a diferença entre o nível dinâmico medido e a cota de base do aquífero. Como critério de variação da espessura, devido ao declínio da superfície piezométrica nos setores não confinados, adotou-se uma alteração limite de 5% da espessura inicial. Quando da superação desse limite, causada pelo rebaixamento total, assumiu-se, como nova espessura, a diferença entre o valor inicial e o rebaixamento resultante no poço.

Para adaptar ainda mais este sistema para o caso de Ribeirão Preto, adotou-se o critério da distribuição de vazões na área considerada. De acordo com o relatório da FIPAI (CONTIN NETO, 1996), a vazão total produzida pelos poços de Ribeirão Preto era de 10944,7 m³/h. Os 35 poços tomados na simulação produzem, ao todo, 4258,21 m³/h. Assim, a vazão remanescente que deve ser distribuída na área é de 6686,49 m³/h. Realizaram-se os seguintes cálculos para a determinação da vazão distribuída:

- Área total = 400 Km²;
- Vazão a ser distribuída = 6686,49 m³/h;

$$q = \frac{6686,49}{4 \cdot 10^8} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$$

$$\text{Dessa maneira, o rebaixamento distribuído vale: } s' = q \cdot \Delta t \quad (5.1)$$

$$\Delta t = \text{TEMPO}_{1i} - \text{TEMPO}_{2i}$$

$$\text{O rebaixamento total vale: } s = \sum_{n=1}^{35} \left(\frac{Q_n W}{4\pi T} \right) + s' \quad (5.2)$$

A figura 5.1 ilustra esta consideração.

Figura 5.1 - Esquema das vazões distribuídas e concentradas

5.1.2 – Resultados

Tabela 5.2 - Dados de entrada dos poços – referência : 01/01/1996

poço	modelo	Q (m ³ /h)	medição		espessura (m)		filtro	
			data	ND (m)	m	5% m	d (m)	l (m)
22	6	77,62	18/10/90	455	165	8,25	0	18
28	6	42,48	28/09/95	453,09	168,09	8,40	0	9,99
37	6	52,31	12/09/94	455,58	205,58	10,28	0	8,58
50A	2	46,47	07/02/95	457,34	154,4	7,72	0	23,7
57	6	50	15/06/95	465	205	10,25	0	20
58	6	73,81	19/10/95	453,86	143,86	7,19	82,26	120,86
60	2	59,63	15/06/95	469	209,7	10,49	30,2	148,46
61	6	45,96	19/09/95	501	136	6,80	0	22,4
65	6	221	17/10/95	431,3	119,3	5,97	5,3	119,3
72	2	70	15/06/95	432	114	5,70	0	114
76	2	47,2	25/10/94	470,22	188	9,40	0	115,01
86	6	30	15/06/95	531	191	9,55	90,9	160
87	6	245,72	16/10/95	424	125	6,25	23	123
91	2	67,3	19/10/95	444,1	122,5	6,13	0	122,5
93	2	85,67	27/09/95	456,33	127,8	6,39	17	113
95	6	50	15/06/95	443	183	9,15	0	126
99	2	59,33	15/08/95	458,24	221	11,05	0	118
100	6	50	15/06/95	431,5	82,3	4,12	9,76	78,29
103	6	167	16/05/94	449	142	7,10	34,88	134,32
106	6	81,78	20/09/95	461,6	167,6	8,38	55,59	106,64
114	6	62,72	17/08/95	536,36	81,36	4,07	48,56	78,56
118	2	96,79	06/06/95	436,24	178	8,90	12	135
125	6	124,62	19/10/95	459,62	116,62	5,83	22,81	112,35
129	6	185,87	06/10/95	413,4	131,4	6,57	11,4	131,4
133	6	346,5	03/08/95	469,02	131,02	6,55	29,02	131,02
139	6	94,08	21/09/95	489,92	137,92	6,90	42,92	133,92
140	6	246,35	28/09/95	485,1	100,1	5,01	25,9	89,9
141	6	169,48	22/09/95	453,2	101	5,05	27,5	97,5
142	6	292,5	28/12/94	434,98	196,73	9,84	51,72	160
145	6	200,25	26/10/95	466,75	145,95	7,30	65,2	136,8
147	6	56,34	08/12/95	440	192	9,60	40,56	160
151	6	202,28	04/09/95	462,72	204,72	10,24	48,5	160
152	6	219,34	04/04/95	477,95	217,95	10,90	0	160
157	6	206,43	03/10/95	400,69	155,69	7,78	0	155,69
B3	6	131,38	26/10/95	508,88	248,88	12,44	59,88	160

Tabela 5.3 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/1996

poço	ND _{medido} (m)	rebaixamentos (m)			ND _{calculado} (m)	nova espessura (m)
		calculado	distribuído	total		
22	455	-1,79	-0,76	-2,55	452,45	***
28	453,09	-0,20	-0,04	-0,24	452,85	***
37	455,58	-1,12	-0,19	-1,31	454,27	***
50A	457,34	-0,94	-0,13	-1,07	456,27	***
57	465	-0,20	-0,08	-0,28	464,72	***
58	453,86	-0,17	-0,03	-0,20	453,66	***
60	469	-0,85	-0,08	-0,93	468,07	***
61	501	-0,18	-0,04	-0,22	500,78	***
65	431,3	-0,16	-0,03	-0,19	431,11	***
72	432	-0,57	-0,08	-0,65	431,35	***
76	470,22	-0,42	-0,17	-0,59	469,63	***
86	531	-0,46	-0,08	-0,54	530,46	***
87	424	-0,16	-0,03	-0,19	423,81	***
91	444,1	-0,22	-0,03	-0,25	443,85	***
93	456,33	-0,27	-0,04	-0,31	456,02	***
95	443	-0,51	-0,08	-0,59	442,41	***
99	458,24	-0,46	-0,05	-0,52	457,72	***
100	431,5	-0,52	-0,08	-0,60	430,90	***
103	449	-1,38	-0,24	-1,61	447,39	***
106	461,6	-0,26	-0,04	-0,30	461,30	***
114	536,36	-0,05	-0,09	-0,14	536,22	***
118	436,24	-0,63	-0,08	-0,71	435,53	***
125	459,62	-0,15	-0,03	-0,18	459,44	***
129	413,4	-0,18	-0,03	-0,22	413,18	***
133	469,02	-0,33	-0,06	-0,39	468,63	***
139	489,92	-0,18	-0,04	-0,22	489,70	***
140	485,1	-0,20	-0,04	-0,24	484,86	***
141	453,2	-0,26	-0,04	-0,30	452,90	***
142	434,98	-0,99	-0,15	-1,14	433,84	***
145	466,75	-0,11	-0,03	-0,14	466,61	***
147	440	-0,07	-0,01	-0,08	439,92	***
151	462,72	-0,35	-0,05	-0,40	462,32	***
152	477,95	-1,05	-0,11	-1,16	476,79	***
157	400,69	-0,30	-0,04	-0,33	400,36	***
B3	508,88	-0,04	-0,03	-0,06	508,82	***

Nota-se que, de acordo com a convenção do programa, os rebaixamentos são negativos quando indicam declínio da superfície piezométrica e positivos quando indicam recuperação da mesma.

Os valores finais dos níveis dinâmicos foram lançados, para cada coordenada, no SURFER, permitindo a visualização da superfície piezométrica resultante e das novas situações de confinamento dos poços, como ilustrado pelos gráficos seguintes.

Gráfico 5.9 - Superfície piezométrica em 01/01/1996

Gráfico 5.10 - Níveis dinâmicos em 01/01/1996

Gráfico 5.11 - Regiões confinadas em 01/01/1996

Gráfico 5.12 - Situação de confinamento em 01/01/1996

Tabela 5.4 - Dados de entrada dos poços – referência : 01/01/1997

poço	modelo	Q (m ³ /h)	medição		espessura		filtro	
			data	ND (m)	m (m)	5% m (m)	d (m)	l (m)
22	6	77,62	18/10/90	455	165	8,25	0	18
28	6	42,48	28/09/95	453,09	168,09	8,40	0	9,99
37	6	52,31	12/09/94	455,58	205,58	10,28	0	8,58
50A	2	46,47	07/02/95	457,34	154,4	7,72	0	23,7
57	6	50	15/06/95	465	205	10,25	0	20
58	6	73,81	19/10/95	453,86	143,86	7,19	82,26	120,86
60	2	59,63	15/06/95	469	209,7	10,49	30,2	148,46
61	6	45,96	19/09/95	501	136	6,80	0	22,4
65	6	221	17/10/95	431,3	119,3	5,97	5,3	119,3
72	2	70	15/06/95	432	114	5,70	0	114
76	2	47,2	25/10/94	470,22	188	9,40	0	115,01
86	6	30	15/06/95	531	191	9,55	90,9	160
87	6	245,72	16/10/95	424	125	6,25	23	123
91	2	67,3	19/10/95	444,1	122,5	6,13	0	122,5
93	2	85,67	27/09/95	456,33	127,8	6,39	17	113
95	6	50	15/06/95	443	183	9,15	0	126
99	2	59,33	15/08/95	458,24	221	11,05	0	118
100	6	50	15/06/95	431,5	82,3	4,12	9,76	78,29
103	6	167	16/05/94	449	142	7,10	34,88	134,32
106	6	81,78	20/09/95	461,6	167,6	8,38	55,59	106,64
114	6	62,72	17/08/95	536,36	81,36	4,07	48,56	78,56
118	2	96,79	06/06/95	436,24	178	8,90	12	135
125	6	124,62	19/10/95	459,62	116,62	5,83	22,81	112,35
129	6	185,87	06/10/95	413,4	131,4	6,57	11,4	131,4
133	6	346,5	03/08/95	469,02	131,02	6,55	29,02	131,02
139	6	94,08	21/09/95	489,92	137,92	6,90	42,92	133,92
140	6	246,35	28/09/95	485,1	100,1	5,01	25,9	89,9
141	6	169,48	22/09/95	453,2	101	5,05	27,5	97,5
142	6	292,5	28/12/94	434,98	196,73	9,84	51,72	160
145	6	200,25	26/10/95	466,75	145,95	7,30	65,2	136,8
147	6	56,34	08/12/95	440	192	9,60	40,56	160
151	6	202,28	04/09/95	462,72	204,72	10,24	48,5	160
152	6	219,34	04/04/95	477,95	217,95	10,90	0	160
157	6	206,43	03/10/95	400,69	155,69	7,78	0	155,69
B3	6	131,38	26/10/95	508,88	248,88	12,44	59,88	160

Tabela 5.5 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/1997

poço	ND _{medido} (m)	rebaixamentos (m)			ND _{calculado} (m)	nova espessura (m)
		calculado	distribuído	total		
22	455	-2,15	-0,91	-3,06	451,94	***
28	453,09	-1,01	-0,18	-1,20	451,89	***
37	455,58	-2,04	-0,34	-2,38	453,20	***
50A	457,34	-2,04	-0,28	-2,32	455,02	***
57	465	-0,61	-0,23	-0,83	464,17	***
58	453,86	-1,01	-0,18	-1,19	452,67	***
60	469	-2,14	-0,23	-2,36	466,64	***
61	501	-0,79	-0,19	-0,97	500,03	***
65	431,3	-0,92	-0,18	-1,10	430,20	***
72	432	-1,66	-0,23	-1,89	430,11	***
76	470,22	-0,78	-0,32	-1,10	469,12	***
86	531	-1,30	-0,23	-1,53	529,47	***
87	424	-0,93	-0,18	-1,11	422,89	***
91	444,1	-1,34	-0,18	-1,52	442,58	***
93	456,33	-1,35	-0,18	-1,54	454,79	***
95	443	-1,43	-0,22	-1,66	441,34	***
99	458,24	-1,58	-0,20	-1,78	456,46	***
100	431,5	-1,41	-0,23	-1,64	429,86	***
103	449	-2,12	-0,38	-2,50	446,50	***
106	461,6	-1,13	-0,19	-1,32	460,28	***
114	536,36	-0,13	-0,24	-0,36	536,00	***
118	436,24	-1,66	-0,23	-1,88	434,36	***
125	459,62	-0,86	-0,18	-1,03	458,59	***
129	413,4	-0,99	-0,18	-1,17	412,23	***
133	469,02	-1,08	-0,21	-1,29	467,73	***
139	489,92	-0,83	-0,19	-1,02	488,90	***
140	485,1	-0,95	-0,18	-1,13	483,97	***
141	453,2	-1,17	-0,19	-1,35	451,85	***
142	434,98	-1,77	-0,29	-2,07	432,91	***
145	466,75	-0,69	-0,17	-0,86	465,89	***
147	440	-1,05	-0,16	-1,20	438,80	***
151	462,72	-1,16	-0,20	-1,35	461,37	***
152	477,95	-1,97	-0,26	-2,23	475,72	***
157	400,69	-1,31	-0,18	-1,49	399,20	***
B3	508,88	-0,16	-0,17	-0,33	508,55	***

**Gráfico 5.13 - Superfície piezométrica em 01/01/1997
tempo de simulação : 1 ano**

Gráfico 5.14 - Níveis dinâmicos em 01/01/1997

Gráfico 5.15 - Regiões confinadas em 01/01/1997

Gráfico 5.16 - Situação de confinamento em 01/01/1997

Tabela 5.6 - Dados de entrada dos poços – referência: 01/01/2001

poço	modelo	Q (m ³ /h)	medição		espessura		filtro	
			data	ND (m)	m (m)	5% m (m)	d (m)	l (m)
22	6	77,62	18/10/90	455	165	8,25	0	18
28	6	42,48	28/09/95	453,09	168,09	8,40	0	9,99
37	6	52,31	12/09/94	455,58	205,58	10,28	0	8,58
50A	2	46,47	07/02/95	457,34	154,4	7,72	0	23,7
57	6	50	15/06/95	465	205	10,25	0	20
58	6	73,81	19/10/95	453,86	143,86	7,19	82,26	120,86
60	2	59,63	15/06/95	469	209,7	10,49	30,2	148,46
61	6	45,96	19/09/95	501	136	6,80	0	22,4
65	6	221	17/10/95	431,3	119,3	5,97	5,3	119,3
72	2	70	15/06/95	432	114	5,70	0	114
76	2	47,2	25/10/94	470,22	188	9,40	0	115,01
86	6	30	15/06/95	531	191	9,55	90,9	160
87	6	245,72	16/10/95	424	125	6,25	23	123
91	2	67,3	19/10/95	444,1	122,5	6,13	0	122,5
93	2	85,67	27/09/95	456,33	127,8	6,39	17	113
95	6	50	15/06/95	443	183	9,15	0	126
99	2	59,33	15/08/95	458,24	221	11,05	0	118
100	6	50	15/06/95	431,5	82,3	4,12	9,76	78,29
103	6	167	16/05/94	449	142	7,10	34,88	134,32
106	6	81,78	20/09/95	461,6	167,6	8,38	55,59	106,64
114	6	62,72	17/08/95	536,36	81,36	4,07	48,56	78,56
118	2	96,79	06/06/95	436,24	178	8,90	12	135
125	6	124,62	19/10/95	459,62	116,62	5,83	22,81	112,35
129	6	185,87	06/10/95	413,4	131,4	6,57	11,4	131,4
133	6	346,5	03/08/95	469,02	131,02	6,55	29,02	131,02
139	6	94,08	21/09/95	489,92	137,92	6,90	42,92	133,92
140	6	246,35	28/09/95	485,1	100,1	5,01	25,9	89,9
141	6	169,48	22/09/95	453,2	101	5,05	27,5	97,5
142	6	292,5	28/12/94	434,98	196,73	9,84	51,72	160
145	6	200,25	26/10/95	466,75	145,95	7,30	65,2	136,8
147	6	56,34	08/12/95	440	192	9,60	40,56	160
151	6	202,28	04/09/95	462,72	204,72	10,24	48,5	160
152	6	219,34	04/04/95	477,95	217,95	10,90	0	160
157	6	206,43	03/10/95	400,69	155,69	7,78	0	155,69
B3	6	131,38	26/10/95	508,88	248,88	12,44	59,88	160

Tabela 5.7 - Resultados calculados – referência: 01/01/2001

poço	ND _{medido} (m)	rebaixamentos (m)			ND _{calculado} (m)	nova espessura (m)
		calculado	distribuído	total		
22	455	-3,76	-1,49	-5,25	449,75	***
28	453,09	-4,23	-0,77	-5,00	448,09	***
37	455,58	-4,86	-0,92	-5,78	449,80	***
50A	457,34	-6,45	-0,86	-7,31	450,03	***
57	465	-2,32	-0,81	-3,13	461,87	***
58	453,86	-4,24	-0,76	-5,00	448,86	***
60	469	-6,19	-0,81	-7,00	462,00	***
61	501	-2,91	-0,77	-3,68	497,32	***
65	431,3	-3,91	-0,76	-4,67	426,63	***
72	432	-6,07	-0,81	-6,88	425,12	***
76	470,22	-2,28	-0,90	-3,19	467,03	***
86	531	-4,33	-0,81	-5,15	525,85	***
87	424	-3,97	-0,76	-4,73	419,27	***
91	444,1	-5,71	-0,76	-6,47	437,63	***
93	456,33	-5,69	-0,77	-6,46	449,87	***
95	443	-4,29	-0,81	-5,10	437,90	***
99	458,24	-5,10	-0,79	-5,89	452,35	***
100	431,5	-4,56	-0,81	-5,37	426,13	76,93
103	449	-4,56	-0,97	-5,53	443,47	***
106	461,6	-4,03	-0,77	-4,81	456,79	***
114	536,36	-0,42	-0,82	-1,24	535,12	***
118	436,24	-5,20	-0,81	-6,02	430,22	***
125	459,62	-3,15	-0,76	-3,91	455,71	***
129	413,4	-4,26	-0,77	-5,02	408,38	***
133	469,02	-3,77	-0,79	-4,57	464,45	***
139	489,92	-2,97	-0,77	-3,74	486,18	***
140	485,1	-3,51	-0,77	-4,28	480,82	***
141	453,2	-4,14	-0,77	-4,91	448,29	***
142	434,98	-4,03	-0,88	-4,91	430,07	***
145	466,75	-2,51	-0,76	-3,27	463,48	***
147	440	-3,77	-0,74	-4,51	435,49	***
151	462,72	-3,35	-0,78	-4,13	458,59	***
152	477,95	-4,58	-0,84	-5,42	472,53	***
157	400,69	-4,12	-0,77	-4,89	395,80	***
B3	508,88	-0,33	-0,76	-1,09	507,79	***

Gráfico 5.17 - Superfície piezométrica em 01/01/2001
tempo de simulação: 5 anos

Gráfico 5.18 - Níveis dinâmicos em 01/01/2001

Gráfico 5.19 - Regiões confinadas em 01/01/2001

Gráfico 5.20 - Situação de confinamento em 01/01/2001

Tabela 5.8 - Dados de entrada dos poços – referência: 01/01/2006

poço	modelo	Q (m³/h)	medição		espessura		filtro	
			data	ND (m)	m (m)	5% m (m)	d (m)	l (m)
22	6	77,62	18/10/90	455	165	8,25	0	18
28	6	42,48	28/09/95	453,09	168,09	8,40	0	9,99
37	6	52,31	12/09/94	455,58	205,58	10,28	0	8,58
50A	2	46,47	07/02/95	457,34	154,4	7,72	0	23,7
57	6	50	15/06/95	465	205	10,25	0	20
58	6	73,81	19/10/95	453,86	143,86	7,19	82,26	120,86
60	2	59,63	15/06/95	469	209,7	10,49	30,2	148,46
61	6	45,96	19/09/95	501	136	6,80	0	22,4
65	6	221	17/10/95	431,3	119,3	5,97	5,3	119,3
72	2	70	15/06/95	432	114	5,70	0	114
76	2	47,2	25/10/94	470,22	188	9,40	0	115,01
86	6	30	15/06/95	531	191	9,55	90,9	160
87	6	245,72	16/10/95	424	125	6,25	23	123
91	2	67,3	19/10/95	444,1	122,5	6,13	0	122,5
93	2	85,67	27/09/95	456,33	127,8	6,39	17	113
95	6	50	15/06/95	443	183	9,15	0	126
99	2	59,33	15/08/95	458,24	221	11,05	0	118
100	6	50	01/01/01	426,13	76,93	3,85	4,39	72,92
103	6	167	16/05/94	449	142	7,10	34,88	134,32
106	6	81,78	20/09/95	461,6	167,6	8,38	55,59	106,64
114	6	62,72	17/08/95	536,36	81,36	4,07	48,56	78,56
118	2	96,79	06/06/95	436,24	178	8,90	12	135
125	6	124,62	19/10/95	459,62	116,62	5,83	22,81	112,35
129	6	185,87	06/10/95	413,4	131,4	6,57	11,4	131,4
133	6	346,5	03/08/95	469,02	131,02	6,55	29,02	131,02
139	6	94,08	21/09/95	489,92	137,92	6,90	42,92	133,92
140	6	246,35	28/09/95	485,1	100,1	5,01	25,9	89,9
141	6	169,48	22/09/95	453,2	101	5,05	27,5	97,5
142	6	292,5	28/12/94	434,98	196,73	9,84	51,72	160
145	6	200,25	26/10/95	466,75	145,95	7,30	65,2	136,8
147	6	56,34	08/12/95	440	192	9,60	40,56	160
151	6	202,28	04/09/95	462,72	204,72	10,24	48,5	160
152	6	219,34	04/04/95	477,95	217,95	10,90	0	160
157	6	206,43	03/10/95	400,69	155,69	7,78	0	155,69
B3	6	131,38	26/10/95	508,88	248,88	12,44	59,88	160

Tabela 5.9 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2006

poço	ND _{medido} (m)	rebaixamentos (m)			ND calculado (m)	nova espessura (m)
		calculado	distribuído	total		
22	455	-5,55	-2,22	-7,77	447,23	***
28	453,09	-7,54	-1,50	-9,04	444,05	159,05
37	455,58	-7,13	-1,65	-8,79	446,79	***
50A	457,34	-11,23	-1,59	-12,83	444,51	154,4
57	465	-4,27	-1,54	-5,81	459,19	***
58	453,86	-7,56	-1,49	-9,05	444,81	134,81
60	469	-10,22	-1,54	-11,77	457,23	207,23
61	501	-4,98	-1,50	-6,48	494,52	***
65	431,3	-7,03	-1,49	-8,53	422,77	110,77
72	432	-10,84	-1,54	-12,38	419,62	***
76	470,22	-4,17	-1,64	-5,80	464,42	***
86	531	-7,36	-1,54	-8,91	522,09	***
87	424	-7,09	-1,49	-8,58	415,42	116,42
91	444,1	-10,52	-1,49	-12,02	432,08	117,08
93	456,33	-10,32	-1,50	-11,82	444,51	***
95	443	-6,61	-1,54	-8,15	434,85	***
99	458,24	-8,43	-1,52	-9,94	448,30	218,3
100	426,13	-3,21	-0,74	-3,95	422,18	72,98
103	449	-6,91	-1,70	-8,60	440,40	133,4
106	461,6	-6,82	-1,50	-8,33	453,27	***
114	536,36	-0,68	-1,55	-2,24	534,12	***
118	436,24	-8,91	-1,55	-10,46	425,78	175,78
125	459,62	-5,25	-1,49	-6,74	452,88	109,88
129	413,4	-7,66	-1,50	-9,16	404,24	122,24
133	469,02	-6,51	-1,52	-8,04	460,98	122,98
139	489,92	-4,93	-1,50	-6,43	483,49	***
140	485,1	-5,94	-1,50	-7,44	477,66	92,66
141	453,2	-6,98	-1,50	-8,49	444,71	92,51
142	434,98	-5,80	-1,61	-7,41	427,57	***
145	466,75	-4,14	-1,49	-5,63	461,12	***
147	440	-6,14	-1,47	-7,61	432,39	***
151	462,72	-5,02	-1,51	-6,53	456,19	***
152	477,95	-6,88	-1,57	-8,45	469,50	***
157	400,69	-6,51	-1,50	-8,01	392,68	147,68
B3	508,88	-0,31	-1,49	-1,80	507,08	***

Gráfico 5.21 - Superfície piezométrica em 01/01/2006
tempo de simulação: 10 anos

Gráfico 5.22 - Níveis dinâmicos em 01/01/2006

Gráfico 5.23 - Regiões confinadas em 01/01/2006

Gráfico 5.24 - Situação de confinamento em 01/01/2006

Tabela 5.10 - Dados dos poços – referência: 01/01/2011

poço	modelo	Q (m³/h)	medição		espessura		filtro	
			data	ND (m)	m (m)	5% m (m)	d (m)	l (m)
22	6	77,62	18/10/90	455	165	8,25	0	18
28	6	42,48	01/01/06	444,05	159,05	7,95	0	0,95
37*	6	52,31	12/09/94	455,58	205,58	10,28	0	8,58
50A	6	46,47	01/01/06	444,51	154,4	7,72	0	23,7
57	6	50	15/06/95	465	205	10,25	0	20
58	6	73,81	01/01/06	444,81	134,81	6,74	73,21	111,81
60	6	59,63	01/01/06	457,23	207,23	10,36	27,73	145,99
61	6	45,96	19/09/95	501	136	6,80	0	22,4
65	6	221	01/01/06	422,77	110,77	5,54	0	110,77
72	2	70	15/06/95	432	114	5,70	0	114
76	2	47,2	25/10/94	470,22	188	9,40	0	115,01
86	6	30	15/06/95	531	191	9,55	90,9	160
87	6	245,72	01/01/06	415,42	116,42	5,82	14,42	114,42
91	6	67,3	01/01/06	432,08	117,08	5,85	0	117,08
93	2	85,67	27/09/95	456,33	127,8	6,39	17	113
95	6	50	15/06/95	443	183	9,15	0	126
99	6	59,33	01/01/06	448,3	218,3	10,92	0	115,3
100	6	50	01/01/06	422,18	72,98	3,65	0,44	68,97
103	6	167	01/01/06	440,4	133,4	6,67	26,28	125,72
106	6	81,78	20/09/95	461,6	167,6	8,38	55,59	106,64
114	6	62,72	17/08/95	536,36	81,36	4,07	48,56	78,56
118	6	96,79	01/01/06	425,78	175,78	8,79	9,78	132,78
125	6	124,62	01/01/06	452,88	109,88	5,49	16,07	105,61
129	6	185,87	01/01/06	404,24	122,24	6,11	2,24	122,24
133	6	346,5	01/01/06	460,98	122,98	6,15	20,98	122,98
139	6	94,08	21/09/95	489,92	137,92	6,90	42,92	133,92
140	6	246,35	01/01/06	477,66	92,66	4,63	18,46	82,46
141	6	169,48	01/01/06	444,71	92,51	4,63	19,01	89,01
142	6	292,5	28/12/94	434,98	196,73	9,84	51,72	160
145	6	200,25	26/10/95	466,75	145,95	7,30	65,2	136,8
147	6	56,34	08/12/95	440	192	9,60	40,56	160
151	6	202,28	04/09/95	462,72	204,72	10,24	48,5	160
152	6	219,34	04/04/95	477,95	217,95	10,90	0	160
157	6	206,43	01/01/06	392,68	147,68	7,38	0	147,68
B3	6	131,38	26/10/95	508,88	248,88	12,44	59,88	160

* poço desligado

Tabela 5.11 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2011

poço	ND _{medido} (m)	rebaixamentos (m)			ND _{calculado} (m)	nova espessura (m)
		calculado	distribuído	total		
22	455,00	-6,43	-2,96	-9,38	445,62	155,62
28	444,05	-2,50	-0,73	-3,23	440,82	***
37*	455,58	4,12	-2,38	1,73	457,31	***
50A	444,51	-2,51	-0,73	-3,24	441,27	***
57	465,00	-5,65	-2,27	-7,92	457,08	***
58	444,81	-2,60	-0,73	-3,33	441,48	***
60	457,23	-1,69	-0,73	-2,42	454,81	***
61	501,00	-6,03	-2,24	-8,26	492,74	127,74
65	422,77	-2,42	-0,73	-3,15	419,62	***
72	432,00	-14,82	-2,27	-17,10	414,90	***
76	470,22	-5,13	-2,37	-7,50	462,72	***
86	531,00	-9,53	-2,27	-11,80	519,20	179,2
87	415,42	-2,37	-0,73	-3,10	412,32	***
91	432,08	-2,68	-0,73	-3,41	428,67	***
93	456,33	-14,17	-2,23	-16,40	439,93	***
95	443,00	-6,95	-2,27	-9,22	433,78	173,78
99	448,30	-0,54	-0,73	-1,27	447,03	***
100	422,18	-2,49	-0,73	-3,22	418,96	***
103	440,40	-1,77	-0,73	-2,50	437,90	***
106	461,60	-8,87	-2,23	-11,11	450,49	156,49
114	536,36	0,23	-2,25	-2,02	534,34	***
118	425,78	-1,63	-0,73	-2,36	423,42	***
125	452,88	-1,46	-0,73	-2,19	450,69	***
129	404,24	-2,63	-0,73	-3,36	400,88	***
133	460,98	-2,10	-0,73	-2,83	458,15	***
139	489,92	-5,80	-2,23	-8,03	481,89	129,89
140	477,66	-1,73	-0,73	-2,46	475,20	***
141	444,71	-2,15	-0,73	-2,89	441,82	***
142	434,98	-5,77	-2,34	-8,11	426,87	***
145	466,75	-4,67	-2,22	-6,89	459,86	***
147	440,00	-7,54	-2,20	-9,75	430,25	182,25
151	462,72	-5,00	-2,24	-7,24	455,48	***
152	477,95	-8,01	-2,30	-10,31	467,64	***
157	392,68	-1,45	-0,73	-2,19	390,49	***
B3	508,88	0,85	-2,22	-1,37	507,51	***

* poço desligado

**Gráfico 5.25 - Superfície piezométrica em 01/01/2011
tempo de simulação: 15 anos**

Gráfico 5.26 - Níveis dinâmicos em 01/01/2011

Gráfico 5.27 - Regiões confinadas em 01/01/2001

Gráfico 5.28- Situação de confinamento em 01/01/2011

Tabela 5.12 - Dados de entrada dos poços – referência: 01/01/2016

poço modelo Q (m ³ /h)			medição		espessura		filtro	
			data	ND (m)	m (m)	5% m (m)	d (m)	l (m)
22	6	77,62	01/01/11	445,62	155,62	7,78	0	8,62
28*	6	42,48	01/01/06	444,05	159,05	7,95	0	0,95
37*	6	52,31	12/09/94	455,58	205,58	10,28	0	8,58
50A	6	46,47	01/01/06	444,51	154,4	7,72	0	23,7
57	6	50	15/06/95	465	205	10,25	0	20
58	6	73,81	01/01/06	444,81	134,81	6,74	73,21	111,81
60	6	59,63	01/01/06	457,23	207,23	10,36	27,73	145,99
61	6	45,96	01/01/11	492,74	127,74	6,39	0	14,14
65	6	221	01/01/06	422,77	110,77	5,54	0	110,77
72	2	70	15/06/95	432	114	5,70	0	114
76	2	47,2	25/10/94	470,22	188	9,40	0	115,01
86	6	30	01/01/11	519,2	179,2	8,96	79,1	148,2
87	6	245,72	01/01/06	415,42	116,42	5,82	14,42	114,42
91	6	67,3	01/01/06	432,08	117,08	5,85	0	117,08
93	2	85,67	27/09/95	456,33	127,8	6,39	17	113
95	6	50	01/01/11	433,78	173,78	8,69	0	116,78
99	6	59,33	01/01/06	448,3	218,3	10,92	0	115,3
100	6	50	01/01/06	422,18	72,98	3,65	0,44	68,97
103	6	167	01/01/06	440,4	133,4	6,67	26,28	125,72
106	6	81,78	01/01/11	450,49	156,49	7,82	44,48	95,53
114	6	62,72	17/08/95	536,36	81,36	4,07	48,56	78,56
118	6	96,79	01/01/06	425,78	175,78	8,79	9,78	132,78
125	6	124,62	01/01/06	452,88	109,88	5,49	16,07	105,61
129	6	185,87	01/01/06	404,24	122,24	6,11	2,24	122,24
133	6	346,5	01/01/06	460,98	122,98	6,15	20,98	122,98
139	6	94,08	01/01/11	481,89	129,89	6,49	34,89	125,89
140	6	246,35	01/01/06	477,66	92,66	4,63	18,46	82,46
141	6	169,48	01/01/06	444,71	92,51	4,63	19,01	89,01
142	6	292,5	28/12/94	434,98	196,73	9,84	51,72	160
145	6	200,25	26/10/95	466,75	145,95	7,30	65,2	136,8
147	6	56,34	01/01/11	430,25	182,25	9,11	30,81	150,25
151	6	202,28	04/09/95	462,72	204,72	10,24	48,5	160
152	6	219,34	04/04/95	477,95	217,95	10,90	0	160
157	6	206,43	01/01/06	392,68	147,68	7,38	0	147,68
B3	6	131,38	26/10/95	508,88	248,88	12,44	59,88	160

* poço desligado

Tabela 5.13 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2016

poço	ND _{medido} (m)	rebaixamentos (m)			ND _{calculado} (m)	nova espessura (m)
		calculado	distribuído	total		
22	445,62	-0,99	-0,73	-1,72	443,90	***
28*	444,05	28,10	-1,46	26,64	470,69	***
37*	455,58	2,93	-3,12	-0,19	455,39	***
50A	444,51	-3,15	-1,46	-4,62	439,89	***
57	465	-7,16	-3,01	-10,16	454,84	***
58	444,81	-4,58	-1,46	-6,05	438,76	***
60	457,23	-2,93	-1,46	-4,40	452,83	***
61	492,74	-1,02	-0,73	-1,76	490,98	***
65	422,77	-4,08	-1,46	-5,54	417,23	***
72	432	-18,33	-3,01	-21,34	410,66	***
76	470,22	-6,69	-3,10	-9,79	460,43	***
86	519,2	-1,71	-0,73	-2,44	516,76	***
87	415,42	-3,84	-1,46	-5,30	410,12	***
91	432,08	-4,70	-1,46	-6,17	425,91	***
93	456,33	-17,68	-2,96	-20,64	435,69	***
95	433,78	-0,87	-0,73	-1,60	432,18	***
99	448,3	-1,13	-1,46	-2,59	445,71	***
100	422,18	-4,44	-1,46	-5,90	416,28	***
103	440,4	-3,18	-1,46	-4,64	435,76	***
106	450,49	-1,58	-0,73	-2,31	448,18	***
114	536,36	0,57	-2,98	-2,41	533,95	***
118	425,78	-2,87	-1,46	-4,33	421,45	***
125	452,88	-2,57	-1,46	-4,03	448,85	***
129	404,24	-4,31	-1,46	-5,78	398,46	***
133	460,98	-3,77	-1,46	-5,23	455,75	***
139	481,89	-0,89	-0,73	-1,62	480,27	***
140	477,66	-3,05	-1,46	-4,52	473,14	***
141	444,71	-3,88	-1,46	-5,34	439,37	***
142	434,98	-6,46	-3,07	-9,54	425,44	***
145	466,75	-5,55	-2,95	-8,50	458,25	***
147	430,25	-1,01	-0,73	-1,75	428,50	***
151	462,72	-5,55	-2,97	-8,52	454,20	***
152	477,95	-9,31	-3,03	-12,34	465,61	***
157	392,68	-2,56	-1,46	-4,03	388,65	***
B3	508,88	1,43	-2,95	-1,52	507,36	***

* poço desligado

**Gráfico 5.29 - Superfície piezométrica em 01/01/2016
tempo de simulação: 20 anos**

Gráfico 5.30 - Níveis dinâmicos em 01/01/2016

Gráfico 5.31 - Regiões confinadas em 01/01/2016

Gráfico 5.32 - Situação de confinamento em 01/01/2016

Tabela 5.14 – Resumo dos níveis dinâmicos calculados pelo programa

poço	níveis dinâmicos medidos (m)		níveis dinâmicos calculados (m)					
	data	valor	01/01/96	01/01/97	01/01/01	01/01/06	01/01/11	01/01/16
22	18/10/90	455,00	452,45	451,94	449,75	447,23	445,62	443,90
28	28/09/95	453,09	452,85	451,89	448,09	444,05	440,82	470,69
37	12/09/94	455,58	454,27	453,20	449,80	446,79	457,31	455,39
50A	07/02/95	457,34	456,27	455,02	450,03	444,51	441,27	439,89
57	15/06/95	465,00	464,72	464,17	461,87	459,19	457,08	454,84
58	19/10/95	453,86	453,66	452,67	448,86	444,81	441,48	438,76
60	15/06/95	469,00	468,07	466,64	462,00	457,23	454,81	452,83
61	19/09/95	501,00	500,78	500,03	497,32	494,52	492,74	490,98
65	17/10/95	431,30	431,11	430,20	426,63	422,77	419,62	417,23
72	15/06/95	432,00	431,35	430,11	425,12	419,62	414,90	410,66
76	25/10/94	470,22	469,63	469,12	467,03	464,42	462,72	460,43
86	15/06/95	531,00	530,46	529,47	525,85	522,09	519,20	516,76
87	16/10/95	424,00	423,81	422,89	419,27	415,42	412,32	410,12
91	19/10/95	444,10	443,85	442,58	437,63	432,08	428,67	425,91
93	27/09/95	456,33	456,02	454,79	449,87	444,51	439,93	435,69
95	15/06/95	443,00	442,41	441,34	437,90	434,85	433,78	432,18
99	15/08/95	458,24	457,72	456,46	452,35	448,30	447,03	445,71
100	15/06/95	431,50	430,90	429,86	426,13	422,18	418,96	416,28
103	16/05/94	449,00	447,39	446,50	443,47	440,40	437,90	435,76
106	20/09/95	461,60	461,30	460,28	456,79	453,27	450,49	448,18
114	17/08/95	536,36	536,22	536,00	535,12	534,12	534,34	533,95
118	06/06/95	436,24	435,53	434,36	430,22	425,78	423,42	421,45
125	19/10/95	459,62	459,44	458,59	455,71	452,88	450,69	448,85
129	06/10/95	413,40	413,18	412,23	408,38	404,24	400,88	398,46
133	03/08/95	469,02	468,63	467,73	464,45	460,98	458,15	455,75
139	21/09/95	489,92	489,70	488,90	486,18	483,49	481,89	480,27
140	28/09/95	485,10	484,86	483,97	480,82	477,66	475,20	473,14
141	22/09/95	453,20	452,90	451,85	448,29	444,71	441,82	439,37
142	28/12/94	434,98	433,84	432,91	430,07	427,57	426,87	425,44
145	26/10/95	466,75	466,61	465,89	463,48	461,12	459,86	458,25
147	08/12/95	440,00	439,92	438,80	435,49	432,39	430,25	428,50
151	04/09/95	462,72	462,32	461,37	458,59	456,19	455,48	454,20
152	04/04/95	477,95	476,79	475,72	472,53	469,50	467,64	465,61
157	03/10/95	400,69	400,36	399,20	395,80	392,68	390,49	388,65
B3	26/10/95	508,88	508,82	508,55	507,79	507,08	507,51	507,36

Gráfico 5.33 – Superfícies piezométricas

Gráfico 5.34 – Perfil para X = 209000 m

5.1.3 – Comentários

Este caso reuniu, ao todo, seis simulações, completando um horizonte de 20 anos. De uma maneira geral, pela análise dos gráficos, notou-se um desconfinamento da região. Esse efeito foi maior na região central e isto é perfeitamente justificado pela maior concentração de poços nesse setor. A região oeste, por sua vez, perdeu suas características de confinamento de uma forma mais lenta, devido à menor concentração de poços. Assim, como um bom exemplo, citam-se os rebaixamentos totais calculados nos poços 145 (a norte) e 129 (central). O poço 145 apresentou rebaixamento total de 8,36 m no período de 1996 a 2016. Enquanto isto, o poço 129 apresentou um rebaixamento total de 14,72 m no período de 1996 a 2016. Este dado elucida que o declínio da superfície piezométrica na região central foi bem mais acelerado que nas outras regiões, e isto ocorreu devido à maior quantidade de poços nesse setor, acarretando elevados efeitos de interferências.

Fato oposto ocorreu com os poços mais isolados, como, por exemplo, os poços B3 (ao sul) e 114 (a leste). Nestes, os efeitos das interferências foram pequenos, chegando, em muitos casos, a serem sobrepujados pela recarga devido à precipitação. Este fato foi revelado nas simulações para 2011 e 2016, onde os rebaixamentos calculados, para esses poços, indicaram tendência de recuperação do nível dinâmico, o qual só declinou devido ao efeito do rebaixamento distribuído.

Uma observação de grande interesse refere-se à pequena evolução dos rebaixamentos com o tempo. Este fato justifica-se pela idade avançada da maioria dos poços, acarretando declínios da superfície piezométrica cada vez menores (ver item 4.4). Como consequência disto, os gráficos que representam os níveis piezométricos praticamente variam de maneira uniforme com o tempo, não apresentando deformações significativas que ocorreriam, por exemplo, se houvesse adição de poços novos na região.

Durante os vinte anos de simulação, houve desligamento de apenas dois poços: o 37, em 01/01/2006; e o 28, em 01/01/2011. Este raciocínio foi adotado quando da verificação de rebaixamentos, nesses poços, maiores que a penetração

dos filtros, para a data tomada como referência. Na prática, o desligamento ocorre bem antes, quando se verifica cavitação da bomba pelas baixas alturas de sucção. De qualquer forma, isto revela que o programa apresenta boa aplicabilidade na estimativa da vida útil de um poço diante dos rebaixamentos que ele próprio ou poços vizinhos podem causar.

Outra questão de grande relevo refere-se ao tempo de execução do programa. Já foi comentado no item 4.6.2.6 que a execução dos cálculos de interferências é limitada pela construção das planilhas W e W2. Atuam diretamente sobre esse tempo fatores como a quantidade e os modelos dos poços tomados na análise. Neste exemplo, os tempos de execução de cada uma dessas planilhas variou de 100 a 120 minutos, à medida em que apareciam modelos não confinados e poços desligados. Diante disto, a adoção de grandes quantidades de poços nas simulações, principalmente quando estes encerram modelos não confinados, tem, como penalidades, dispêndios crescentes de tempo de execução.

No estudo de sistemas regionais, a hipótese de extensão infinita do aquífero é geralmente contrariada, uma vez que as espessuras e as regiões de confinamento variam no espaço. Como os modelos descritos no item 4.2 baseiam-se nesta hipótese, pode-se concluir que o programa conduz a soluções mais verdadeiras quando aplicado a sistemas menores, como baterias de poços, onde o tipo de aquífero, as propriedades e as espessuras praticamente não variam no espaço.

5.2 – Simulações em uma Bateria de Poços

5.2.1 – Dados e Considerações

O objetivo das simulações seguintes foi verificar os efeitos de interferência num sistema de dimensões reduzidas, portanto, com maior uniformidade do aquífero em termos de profundidade e características hidráulicas.

Este exemplo baseou-se no sistema de poços da bateria do Bairro Independência, na cidade de Araguari, estado de Minas Gerais. A maioria das

características hidráulicas utilizadas representam valores médios do aquífero Bauru. Foram utilizados os seguintes valores:

- $k_r = 0,0126 \text{ m/h}$ (DELLA TOGNA, 1973);
- $k_v = 0,1 \cdot k_r = 0,00126 \text{ m/h}$ (adotado);
- $S = 0,0001$ (adotado);
- $S_y = 0,1$ (DAEE, 1977);
- $m = 150 \text{ m}$ (DAEE, 1977);

A figura 5.2, representa o perfil inicial dos poços na bateria analisada.

Figura 5.2 - Perfil inicial dos poços

O critério da variação da espessura seguiu o mesmo princípio das simulações do item 5.1, ou seja, essa variação só ocorreu quando o rebaixamento total no poço superou 5% do valor inicial da espessura.

As simulações contaram, em uma situação inicial, com 10 poços, todos inaugurados em um mesmo instante (01/01/2000). Depois de dois anos de bombeamento contínuo, ocorreu adição de um novo poço na vizinhança da bateria.

A recarga foi desprezada, assim as simulações abrangeram uma situação mais crítica e as análises seguiram a favor da segurança.

A tabela 5.15 resume os principais dados dos poços utilizados nas simulações.

Tabela 5.15 - Poços utilizados nas simulações de bateria

poço	coordenadas relativas		inauguração	Q (m ³ /h)
	X (m)	Y (m)		
1	38,00	75,75	01/01/00	6,39
2	102,00	59,50	01/01/00	20,00
3	116,00	130,50	01/01/00	20,00
4	25,00	150,00	01/01/00	16,96
5	25,00	232,50	01/01/00	18,77
6	121,75	191,00	01/01/00	16,95
7	222,25	144,75	01/01/00	50,48
8	181,00	59,50	01/01/00	30,33
9	271,00	54,25	01/01/00	11,13
10	353,00	58,25	01/01/00	16,33
11	300,00	400,00	01/01/02	4,00

5.2.2 – Resultados

Tabela 5.16 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/02/2000

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-47,93	867,07	7,50
2	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-62,31	852,69	7,50
3	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-68,16	846,84	7,50
4	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-53,80	861,20	7,50
5	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-48,61	866,39	7,50
6	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-60,84	854,16	7,50
7	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-82,03	832,97	7,50
8	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-70,95	844,05	7,50
9	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-51,54	863,46	7,50
10	01/01/00	915,00	100,00	150,00	150,00	-42,87	872,13	7,50

Tabela 5.17 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/03/2000

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/02/00	867,07	52,07	102,07	102,07	-1,92	865,15	5,10
2	01/02/00	852,69	37,69	87,69	87,69	-2,18	850,51	4,38
3	01/02/00	846,84	31,84	81,84	81,84	-2,36	844,48	4,09
4	01/02/00	861,20	46,20	96,20	96,20	-1,91	859,29	4,81
5	01/02/00	866,39	51,39	101,39	101,39	-1,75	864,64	5,07
6	01/02/00	854,16	39,16	89,16	89,16	-2,20	851,96	4,46
7	01/02/00	832,97	17,97	67,97	67,97	-2,68	830,29	3,40
8	01/02/00	844,05	29,05	79,05	79,05	-2,39	841,66	3,95
9	01/02/00	863,46	48,46	98,46	98,46	-2,06	861,40	4,92
10	01/02/00	872,13	57,13	107,13	107,13	-1,75	870,38	5,36

Tabela 5.18 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/06/2000

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/02/00	867,07	52,07	102,07	102,07	-8,19	858,88	5,10
2	01/02/00	852,69	37,69	87,69	87,69	-9,08	843,61	4,38
3	01/02/00	846,84	31,84	81,84	81,84	-9,71	837,13	4,09
4	01/02/00	861,20	46,20	96,20	96,20	-8,16	853,04	4,81
5	01/02/00	866,39	51,39	101,39	101,39	-7,58	858,81	5,07
6	01/02/00	854,16	39,16	89,16	89,16	-9,16	845,00	4,46
7	01/02/00	832,97	17,97	67,97	67,97	-10,76	822,21	3,40
8	01/02/00	844,05	29,05	79,05	79,05	-9,81	834,24	3,95
9	01/02/00	863,46	48,46	98,46	98,46	-8,65	854,81	4,92
10	01/02/00	872,13	57,13	107,13	107,13	-7,56	864,57	5,36

Tabela 5.19 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2001

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/06/00	858,88	43,88	93,88	93,88	-8,08	850,80	4,69
2	01/06/00	843,61	28,61	78,61	78,61	-8,72	834,89	3,93
3	01/06/00	837,13	22,13	72,13	72,13	-9,16	827,97	3,61
4	01/06/00	853,04	38,04	88,04	88,04	-8,05	844,99	4,40
5	01/06/00	858,81	43,81	93,81	93,81	-7,61	851,20	4,69
6	01/06/00	845,00	30,00	80,00	80,00	-8,77	836,23	4,00
7	01/06/00	822,21	7,21	57,21	57,21	-9,93	812,28	2,86
8	01/06/00	834,24	19,24	69,24	69,24	-9,24	825,00	3,46
9	01/06/00	854,81	39,81	89,81	89,81	-8,41	846,40	4,49
10	01/06/00	864,57	49,57	99,57	99,57	-7,64	856,93	4,98

Tabela 5.20 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2002

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/01/01	850,80	35,80	85,80	85,80	-11,73	839,07	4,29
2	01/01/01	834,89	19,89	69,89	69,89	-12,31	822,58	3,49
3	01/01/01	827,97	12,97	62,97	62,97	-12,72	815,25	3,15
4	01/01/01	844,99	29,99	79,99	79,99	-11,68	833,31	4,00
5	01/01/01	851,20	36,20	86,20	86,20	-11,29	839,91	4,31
6	01/01/01	836,23	21,23	71,23	71,23	-12,36	823,87	3,56
7	01/01/01	812,28	-2,72	47,28	47,28	-13,35	798,93	2,36
8	01/01/01	825,00	10,00	60,00	60,00	-12,80	812,20	3,00
9	01/01/01	846,40	31,40	81,40	81,40	-12,02	834,38	4,07
10	01/01/01	856,93	41,93	91,93	91,93	-11,30	845,63	4,60

A partir de 01/01/2002 ocorreram duas alterações no sistema: a adição do poço número 11, nas proximidades da bateria, e o desligamento do poço 7, devido à verificação de rebaixamentos excessivos causados por este.

Após os dois anos de bombeamento contínuo (2000 a 2002), o nível dinâmico na coordenada (300,400) representou a condição inicial para o poço 11. Este dado foi retirado do gráfico 5.41 que ilustra a situação da superfície piezométrica em 01/01/2002.

A vazão extraída do novo poço que visa ao abastecimento de um conjunto residencial com 50 casas, foi estimada tomando por base um consumo médio per capita de 300 L/ hab.dia e considerando 5 hab/ casa.

A figura 5.3 representa a situação inicial para o poço 11.

Figura 5.3 - Situação inicial do poço 11

Tabela 5.21 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2003

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/01/02	839,07	24,07	74,07	74,07	-0,44	838,63	3,70
2	01/01/02	822,58	7,58	57,58	57,58	3,95	826,53	2,88
3	01/01/02	815,25	0,25	50,25	50,25	9,77	825,02	2,51
4	01/01/02	833,31	18,31	68,31	68,31	-1,00	832,31	3,42
5	01/01/02	839,91	24,91	74,91	74,91	-6,31	833,60	3,75
6	01/01/02	823,87	8,87	58,87	58,87	9,47	833,34	2,94
7*	01/01/02	798,93	0,00	33,93	33,93	97,01	895,94	1,70
8	01/01/02	812,20	0,00	47,20	47,20	12,08	824,28	2,36
9	01/01/02	834,38	19,38	69,38	69,38	10,92	845,30	3,47
10	01/01/02	845,63	30,63	80,63	80,63	3,66	849,29	4,03
11	01/01/02	826,73	41,73	61,73	61,73	-12,09	814,64	3,09

* poço desligado em 01/01/2002

Tabela 5.22 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2004

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/01/02	839,07	24,07	74,07	74,07	-4,54	834,53	3,70
2	01/01/03	826,53	11,53	61,53	61,53	-3,57	822,96	3,08
3	01/01/03	825,02	10,02	60,02	60,02	-3,60	821,42	3,00
4	01/01/02	833,31	18,31	68,31	68,31	-4,97	828,34	3,42
5	01/01/03	833,60	18,60	68,60	68,60	-3,55	830,05	3,43
6	01/01/03	833,34	18,34	68,34	68,34	-3,60	829,74	3,42
7*	01/01/03	895,94	80,94	130,94	130,94	-3,87	892,07	6,55
8	01/01/03	824,28	9,29	59,29	59,29	-3,56	820,72	2,96
9	01/01/03	845,30	30,30	80,30	80,30	-3,51	841,79	4,02
10	01/01/02	845,63	30,63	80,63	80,63	-2,71	842,92	4,03
11	01/01/03	814,64	29,64	49,64	49,64	-3,32	811,32	2,48

* poço desligado em 01/01/2002

Tabela 5.23 - Rebaixamentos calculados – referência: 01/01/2005

poço	medição	NDmedido (m)	d (m)	l (m)	m (m)	rebaixamento total (m)	NDcalculado (m)	5% de m (m)
1	01/01/04	834,53	19,53	69,53	69,53	-9,17	825,36	3,48
2	01/01/04	822,96	7,96	57,96	57,96	-9,49	813,47	2,90
3	01/01/04	821,42	6,42	56,42	56,42	-10,09	811,33	2,82
4	01/01/04	828,34	13,34	63,34	63,34	-8,85	819,49	3,17
5	01/01/04	830,05	15,05	65,05	65,05	-8,56	821,49	3,25
6	01/01/04	829,74	14,74	64,74	64,74	-10,74	819,00	3,24
7*	01/01/04	892,07	77,07	127,07	127,07	-55,56	836,51	6,35
8	01/01/04	820,72	5,73	55,73	55,73	-10,20	810,52	2,79
9	01/01/03	845,30	30,30	80,30	80,30	-17,07	828,23	4,02
10	01/01/02	845,63	30,63	80,63	80,63	-20,93	824,70	4,03
11	01/01/04	811,32	26,32	46,32	46,32	-7,41	803,91	2,32

* poço religado em 01/01/2004

Os resultados gráficos, como nas simulações do item 5.1, foram construídos pelo programa SURFER e representam a situação da superfície piezométrica para cada data de referência. Os gráficos a seguir ilustram a situação da bateria para as diversas datas tomadas na análise.

**Gráfico 5.35 - Superfície piezométrica – referência: 01/02/2000
tempo de simulação: 1 mês**

Gráfico 5.36 - Níveis dinâmicos em 01/02/2000

Gráfico 5.37- Níveis dinâmicos em 01/03/2000

Gráfico 5.38- Níveis dinâmicos em 01/06/2000

Gráfico 5.39- Níveis dinâmicos em 01/01/2001

Gráfico 5.40 - Superfície piezométrica – referência: 01/01/2002
tempo de simulação: 2 anos

Gráfico 5.41- Níveis dinâmicos em 01/01/2002

**Gráfico 5.42 - Superfície piezométrica – referência: 01/01/2003
tempo de simulação: 3 anos**

Gráfico 5.43 - Níveis dinâmicos em 01/01/2003

Gráfico 5.44 - Superfície piezométrica – referência 01/01/2004
tempo de simulação: 4 anos

Gráfico 5.45 - Níveis dinâmicos em 01/01/2004

Gráfico 5.46 - Superfície piezométrica – referência: 01/01/2005
tempo de simulação: 5 anos

Gráfico 5.47 - Níveis dinâmicos em 01/01/2005

5.2.3 – Comentários

A comparação entre as análises feitas para o aquífero Botucatu-Pirambóia (item 5.1) e as análises feitas para o aquífero Bauru (item 5.2), permitiram deduzir a inadequação deste último, como manancial, para grandes demandas de abastecimento. As baixas condutividades do sistema Bauru acarretam elevados rebaixamentos que podem esgotar o manancial rapidamente, caso sejam elevadas as vazões de descarga dos poços.

Dentre as oito análises realizadas para a bateria de poços, verificou-se que os maiores rebaixamentos ocorreram para 1 mês de simulação, havendo diluição dos mesmos com o aumento do tempo de exploração. Isto vem confirmar que os primeiros instantes de bombeamento refletem as condições mais críticas de funcionamento de um poço, no que se refere aos rebaixamentos causados por ele na sua vizinhança. Assim, a avaliação dos efeitos de um poço, num determinado

sistema, deve fixar maiores atenções nos primeiros instantes de funcionamento da bomba, pois nestes intervalos é que ocorrem grandes rebaixamentos a curto prazo.

Pôde-se concluir que dois fatores responderam pelos elevados rebaixamentos da superfície piezométrica: a baixa condutividade do aquífero Bauru e a idade incipiente dos poços analisados. O crescimento dos rebaixamentos levou a reduções de espessura e, conseqüentemente, a diminuições na transmissividade do aquífero. A verificação de rebaixamentos elevados (da ordem de 12 m) após dois anos de bombeamento contínuo, tem fundamento nessas reduções de transmissividade, agravando os efeitos da exploração sobre a superfície piezométrica (ver tabela 5.20).

Nos dois primeiros anos de bombeamento, o sistema não sofreu nenhuma perturbação, seja pelo desligamento de alguns poços, seja pela adição de novos poços vizinhos. Isto permitiu que o declínio da superfície piezométrica se desse de maneira mais ou menos uniforme (ver gráficos 5.35 e 5.40). A partir de 01/01/2002, o sistema foi perturbado pelo desligamento do poço 7 e pelo acréscimo do poço 11 na vizinhança da bateria, causando deformações visíveis na superfície piezométrica (ver gráfico 5.42).

Assim como os rebaixamentos iniciais foram grandes, o desligamento do poço 7 levou a uma elevada recuperação dos níveis dinâmicos (ver gráficos 5.42 e 5.43). Os efeitos da adição do poço 11, por sua vez, não foram tão apreciáveis, devido à sua pequena taxa de descarga em relação aos demais. Após considerável recuperação no período de 01/01/2002 a 01/01/2003, a superfície piezométrica voltou a declinar até o final das simulações, revelando que os efeitos dos outros poços superou o efeito do desligamento do poço 7.

A última simulação (01/01/2004 a 01/01/2005) apresentou a religação do poço 7. Este efeito não foi, contudo, resultado da abstração de diferentes intervalos de bombeamento/não bombeamento, uma vez que a estrutura do cálculo de interferências não leva em conta a religação de bombas. Nesta análise, o poço 7 foi novamente acolhido ao sistema como se iniciasse seu funcionamento em 01/01/2004. Esta consideração não é das mais corretas, uma vez que não há superposição dos rebaixamentos nos intervalos em que a bomba do poço está ligada ou desligada. Porém, para efeitos de estudo da tendência do sistema, este

raciocínio constituiu uma boa alternativa. O gráfico 5.48 compara os rebaixamentos no poço 7, causados pela sua própria ação, considerando a superposição dos tempos (maneira mais correta) e desconsiderando este efeito (maneira adotada nesta simulação).

Gráfico 5.48 - Rebaixamentos no poço 7

Pelo gráfico 5.48, percebe-se que há diferenças nos rebaixamentos para os instantes após a religação da bomba. Com o aumento do tempo de bombeamento, os rebaixamentos arrançados (sem superposição) tendem a ser maiores que os teóricos (com superposição). Isto ocorre porque os rebaixamentos são tomados a partir do nível no instante de religação do poço que, salvo eventuais interferências externas, é sempre menor que o nível inicial (início geral do bombeamento). Daí pode-se concluir que os erros desta consideração são diluídos quanto mais tempo o poço ficar desligado, uma vez que os rebaixamentos residuais gerados tendem ao valor inicial, ou seja, a alcançar o nível estático.

5.3 – Simulações em Aquíferos não Infinitos

A superposição de efeitos também pode ser aplicada para analisar o escoamento em aquíferos não infinitos. Assim, a introdução de poços imaginários

na análise de rebaixamentos pode transformar um sistema aquífero de extensão finita num sistema de extensão infinita, permitindo a aplicação das funções de poço descritas no item 4.2. Simulações para aquíferos infinitos com diferentes condições de contorno são apresentadas nos itens seguintes. Tais análises utilizaram a opção do programa de cálculo dos rebaixamentos em seções.

5.3.1 – Recarga por Corpo D'água

Figura 5.4 - Artificio utilizado para simular a recarga do aquífero por um canal

A figura 5.4 mostra um canal que forma um contorno responsável pela recarga do aquífero. Este sistema real foi substituído por um sistema equivalente imaginário de extensão infinita. Nesta nova circunstância, foram considerados dois poços: o poço real, à direita, e o poço imagem, à esquerda. Percebe-se que o poço imagem recarrega o aquífero numa taxa constante (Q) igual à taxa de descarga do poço real. Ambos os poços foram locados numa linha normal ao contorno (canal), sendo equidistantes do mesmo. Os rebaixamentos no sistema real foram obtidos pela soma dos cones produzidos pelos dois poços.

Esta simulação abrangeu o primeiro ano de funcionamento de um poço, utilizando como aquífero o sistema Bauru. Foram, pois, utilizados os mesmos dados característicos das simulações do item 5.2. Os valores de entrada foram os seguintes:

- $k_r = 0,0126 \text{ m/h}$;
- $k_v = 0,1$. $k_r = 0,00126 \text{ m/h}$;
- $m = 100 \text{ m}$;
- $S = 0,0001$;
- $S_y = 0,1$;
- tempo = 1 ano = 8760 h;
- $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$;
- distância do poço ao canal = 30 m;
- modelo utilizado: 5 (ver item 4.2.5).

A tabela 5.24 resume os rebaixamentos calculados para cada coordenada relativa.

Tabela 5.24 - Rebaixamentos (m) calculados no sistema equivalente

x	0	10	20	30	40	50	60
y							
-30	0,00	-4,10	-8,55	-11,12	-12,16	-11,48	-11,04
-20	0,00	-6,50	-12,06	-15,35	-16,13	-14,96	-12,59
-10	0,00	-8,46	-17,48	-26,33	-21,96	-17,56	-14,43
0	0,00	-9,32	-23,50	-38,37	-28,13	-18,65	-15,21
10	0,00	-8,46	-17,48	-26,33	-21,96	-17,56	-14,43
20	0,00	-6,50	-12,06	-15,35	-16,13	-14,96	-12,59
30	0,00	-4,10	-8,55	-11,12	-12,16	-11,48	-11,04

A situação do sistema é ilustrada pelo gráfico 5.49, enquanto que o gráfico 5.50 representa como seria a distribuição dos rebaixamentos caso não houvesse o canal. O gráfico 5.51 fornece um perfil dessas duas situações.

Gráfico 5.49 - Rebaixamentos no aquífero finito

Gráfico 5.50 - Rebaixamentos no aquífero infinito

Gráfico 5.51 - Perfil na direção radial ao poço

O efeito da recarga pelo canal propiciou rebaixamentos menores do que aqueles que ocorreriam caso esse contorno não existisse. Esse efeito foi tão mais evidente quanto menores as distâncias ao contorno.

5.3.2 – Barreira Impermeável

Figura 5.5 - Artificio utilizado para simular a presença de contornos impermeáveis no aquífero

A figura 5.5 mostra um sistema aquífero delimitado por uma barreira impermeável. O efeito desse tipo de contorno diverge daquele apresentado no item anterior, uma vez que rebaixamentos adicionais são verificados no aquífero. A superposição de efeitos foi também aplicada neste tipo de análise e o sistema real foi substituído por um sistema equivalente imaginário e infinito. Esse novo sistema apresenta um poço imagem, equidistante do contorno (barreira) em relação ao poço real, que extrai água do aquífero a uma taxa constante (Q). O cone de depressão resultante foi obtido pela soma dos cones dos poços real e imagem.

Esta análise considerou o sistema aquífero Bauru, utilizando os mesmos dados característicos da simulação do item 5.3.1. Os valores de entrada foram os seguintes:

- $k_r = 0,0126 \text{ m/h}$;
- $k_v = 0,1 \cdot k_r = 0,00126 \text{ m/h}$;
- $m = 100 \text{ m}$;
- $S = 0,0001$;
- $S_y = 0,1$;
- $\text{tempo} = 1 \text{ ano} = 8760 \text{ h}$;
- $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$;
- distância do poço à barreira = 30 m ;
- modelo utilizado: 5 (ver item 4.2.5).

A tabela 5.25 resume os rebaixamentos calculados para cada coordenada.

Tabela 5.25 - Rebaixamentos (m) calculados no sistema equivalente

$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}$	0	10	20	30	40	50	60
-30	-71,75	-71,63	-71,43	-70,61	-67,82	-64,25	-60,70
-20	-75,73	-77,07	-77,23	-76,32	-73,16	-68,61	-63,14
-10	-79,98	-80,83	-84,39	-88,19	-79,91	-71,74	-65,55
0	-81,73	-82,36	-91,02	-100,55	-86,39	-73,02	-66,52
10	-79,98	-80,83	-84,39	-88,19	-79,91	-71,74	-65,55
20	-75,73	-77,07	-77,23	-76,32	-73,16	-68,61	-63,14
30	-71,75	-71,63	-71,43	-70,61	-67,82	-64,25	-60,70

A situação do sistema é ilustrada pelo gráfico 5.52, enquanto que o gráfico 5.53 representa como seria a distribuição dos rebaixamentos caso não houvesse a barreira e o aquífero fosse considerado infinito. O gráfico 5.54 fornece um perfil dessas duas situações.

Gráfico 5.52 - Rebaixamentos no aquífero finito

Gráfico 5.53 - Rebaixamentos no aquífero infinito

Gráfico 5.54 - Perfil na direção radial ao poço

O efeito da barreira impermeável limitante do aquífero propiciou rebaixamentos maiores do que aqueles que ocorreriam caso este contorno não existisse. Este efeito foi tão mais evidente quanto menores as distâncias à barreira.

5.3.3 – Aquíferos Diferentes e Vizinhos

Figura 5.6 - Artificio utilizado no cálculo de rebaixamentos em aquíferos diferentes

No caso em que o contorno separa dois meios de condutividades hidráulicas diferentes, o método dos poços-imagem também pode ser utilizado no cálculo dos rebaixamentos. Segundo VERRUIJT (1970), o rebaixamento em cada ponto pode ser calculado por:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T'} \cdot W(\text{poço}) + \frac{CQ}{4\pi T'} \cdot W(\text{imagem}), \quad \text{para } x > 0 \quad (5.3)$$

$$s'' = \frac{BQ}{4\pi T'} \cdot W(\text{poço}) \quad \text{para } x < 0 \quad (5.4)$$

onde: Q = vazão do poço;

$$T' = k' \cdot m$$

$$C = (1-N)/(1+N) \quad (5.5)$$

$$B = 2/(N+1) \quad (5.6)$$

$$N = (k'' \cdot m)/(k' \cdot m) \quad (5.7)$$

Esta análise considerou um sistema aquífero semelhante ao Botucatu-Pirambóia, utilizando os mesmos dados característicos da simulação do item 5.1. Os valores de entrada foram os seguintes:

- $k' = 0,1 \text{ m/h}$;
- $k'' = 0,01 \text{ m/h}$ (arbitrado);
- $m = 100 \text{ m}$;
- $S = 0,0001$;
- $S_y = 0,25$;
- tempo = 1 ano = 8760 h;
- $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$;
- distância do poço ao contorno = 30 m;

- modelo utilizado: 1 (ver item 4.2.5).

Os rebaixamentos devem ser calculados separadamente para cada setor, segundo as equações (5.3) e (5.4). Assim, as tabelas 5.26 e 5.27 resumem os valores calculados pelo programa para cada coordenada.

Tabela 5.26 - Rebaixamentos (m) calculados para o setor 1

x	0	10	20	30	40	50
y						
-50	-19,22	-19,22	-19,18	-19,08	-18,92	-18,72
-40	-19,66	-19,68	-19,65	-19,54	-19,35	-19,08
-30	-20,14	-20,18	-20,19	-20,09	-19,84	-19,48
-20	-20,61	-20,71	-20,85	-20,81	-20,45	-19,92
-10	-20,99	-21,19	-21,65	-21,97	-21,22	-20,32
0	-21,14	-21,41	-22,22	-31,98	-21,78	-20,51
10	-20,99	-21,19	-21,65	-21,97	-21,22	-20,32
20	-20,61	-20,71	-20,85	-20,81	-20,45	-19,92
30	-20,14	-20,18	-20,19	-20,09	-19,84	-19,48
40	-19,66	-19,68	-19,65	-19,54	-19,35	-19,08
50	-19,22	-19,22	-19,18	-19,08	-18,92	-18,72

Tabela 5.27 - Rebaixamentos (m) calculados para o setor 2

x	0	-10	-20	-30	-40	-50
y						
-50	-19,22	-18,95	-18,66	-18,37	-18,09	-17,82
-40	-19,66	-19,30	-18,95	-18,60	-18,28	-17,98
-30	-20,14	-19,66	-19,22	-18,81	-18,44	-18,11
-20	-20,61	-19,99	-19,45	-18,98	-18,57	-18,21
-10	-20,99	-20,22	-19,61	-19,09	-18,66	-18,28
0	-21,14	-20,31	-19,66	-19,13	-18,69	-18,30
10	-20,99	-20,22	-19,61	-19,09	-18,66	-18,28
20	-20,61	-19,99	-19,45	-18,98	-18,57	-18,21
30	-20,14	-19,66	-19,22	-18,81	-18,44	-18,11
40	-19,66	-19,30	-18,95	-18,60	-18,28	-17,98
50	-19,22	-18,95	-18,66	-18,37	-18,09	-17,82

A reunião dos rebaixamentos calculados para os dois setores propiciou a construção do gráfico 5.55 que ilustra o comportamento da superfície piezométrica diante da situação de contorno existente. O gráfico 5.56 ilustra o mesmo sistema sem o contorno que restringe o aquífero. O gráfico 5.57 representa um perfil na direção radial ao poço e permite a comparação dessas duas situações.

Gráfico 5.55 - Rebaixamentos num sistema com dois aquíferos diferentes e vizinhos

Gráfico 5.56 - Rebaixamentos no aquífero infinito

Gráfico 5.57 - Perfil na direção radial ao poço

Pelos gráficos 5.55, 5.56 e 5.57, percebe-se que a presença de um meio de características hidráulicas diferentes nas proximidades do poço alterou o cone de depressão em relação àquele que sucederia caso o aquífero fosse infinito. Neste caso os rebaixamentos no setor 2 (menor transmissividade) foram mais pronunciados que no setor 1 (maior transmissividade) e isto ficou evidente pelo achatamento sofrido pelas linhas de contorno que representam a superfície piezométrica. Situação diversa ocorreria caso o poço estivesse situado no setor 2. Nessas circunstâncias, as linhas de contorno sofreriam alargamento quando da transição para o setor 1, uma vez que os rebaixamentos na região de maior transmissividade seriam menos pronunciados que naquelas de menor transmissividade.

5.4 – Comparação com o Método das Diferenças Finitas

Este item resume os resultados de simulações realizadas pelo programa e de simulações numéricas, utilizando o Método das Diferenças Finitas. Essas avaliações foram aplicadas para um aquífero freático.

5.4.1 – Equacionamento Numérico

A figura 5.7 ilustra o esquema de vazões que entram e que saem de uma célula hipotética (i, j) .

Figura 5.7 – Esquema de vazões para célula de diferenças finitas

As vazões que entram e que saem na célula (i, j) podem ser escritas como:

$$q_1 = k \cdot m \cdot \Delta y \cdot \frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{\Delta x} \quad (5.8)$$

$$q_2 = k \cdot m \cdot \Delta y \cdot \frac{H_{i,j} - H_{i+1,j}}{\Delta x} \quad (5.9)$$

$$q_3 = k \cdot m \cdot \Delta y \cdot \frac{H_{i,j-1} - H_{i,j}}{\Delta y} \quad (5.10)$$

$$q_4 = k \cdot m \cdot \Delta y \cdot \frac{H_{i,j} - H_{i,j+1}}{\Delta y} \quad (5.11)$$

A equação final pode ser escrita como:

$$H_{i,j}^{k+1} = H_{i,j}^k + \frac{\Delta t \cdot (q_1 - q_2 + q_3 - q_4)}{S \cdot \Delta x \cdot \Delta y} - \frac{Q_p \cdot \Delta t}{S \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \quad (5.12)$$

onde :

- k = condutividade hidráulica do aquífero [$L \ T^{-1}$];

- m = espessura do aquífero [L];
- H = carga hidráulica sobre o topo do aquífero [L];
- Δt = incremento de tempo [T];
- k = instante presente [T];
- Q_p = vazão do poço [$L^3 T^{-1}$];
- S = armazenabilidade do aquífero.

5.4.2 – Simulações

Figura 5.8 – Esquema dos poços da bateria

As simulações foram realizadas para um aquífero não confinado com as seguintes propriedades:

- $k_r = 0,1$ m/h;
- $k_v = 0,1$ m/h;
- $S = 0,25$;
- $m = 150$ m;
- $\Delta x = 20$ m;
- $\Delta y = 20$ m;
- $\Delta t = 1$ h;
- modelo 5 (item 4.2).

Esta avaliação considerou ainda uma bateria de quatro poços operantes. A situação dos poços é representada pela figura 5.8. As vazões e coordenadas dos

poços são resumidas pela tabela 5.28. Os resultados para um dia de simulação, utilizando o procedimento numérico (diferenças finitas) e o procedimento analítico do programa (funções de poços), são mostrados na tabela 5.29.

Tabela 5.28 – Dados dos poços da bateria

poço	Q (m ³ /h)	coordenadas	
		X (m)	Y (m)
1	30	200	200
2	50	250	250
3	40	270	230
4	20	210	300

Tabela 5.29 – Resultados das simulações

poço	nível estático (m)	níveis dinâmicos (m)					
		diferenças finitas			funções de poços		
		10 h	20 h	24 h	10 h	20 h	24 h
1	200,00	199,26	199,02	198,94	197,81	197,76	197,74
2	200,00	198,66	198,29	198,18	196,57	196,49	196,46
3	200,00	198,86	198,52	198,42	196,97	196,89	196,87
4	200,00	199,52	199,40	199,35	198,27	198,22	198,20

Os gráficos 5.58 e 5.59 ilustram as curvas de contorno de rebaixamentos para os dois métodos utilizados nas simulações.

Pela análise dos resultados, nota-se claramente que os rebaixamentos avaliados pelo Método das Diferenças Finitas são menores que os valores calculados pelo programa (Método das Funções de Poços). Isso pode ser explicado pela diferença básica existente nos fundamentos dos dois métodos. Convém, pois, lembrar que os métodos numéricos discretizam, em malhas, o domínio de escoamento. Dessa maneira, no Método das Diferenças Finitas, o poço é representado por uma célula de dimensões Δx e Δy , neste caso $\Delta x = \Delta y = 20\text{m}$. Assim, considera-se que a vazão extraída pelo poço é retirada da área da célula. Este raciocínio difere consideravelmente daquele adotado pelo método analítico das Funções de Poços. Por este método, a água é retirada de um poço de diâmetro infinitesimal. Daí a explicação para os rebaixamentos maiores calculados pelo programa.

Uma conclusão importante é que o cálculo de rebaixamentos nos poços tende a ser mais preciso quando se utiliza o Método das Funções de Poços, uma vez que a consideração de área infinitesimal aproxima muito mais a realidade do que a área da célula numérica.

Gráfico 5.58 – Rebaixamentos por diferenças finitas
tempo de simulação: 24 h

Gráfico 5.59 – Rebaixamentos por funções de poços
tempo de simulação: 24 h

6 – CONCLUSÕES

As simulações desenvolvidas no Capítulo 5 elucidaram importantes características do programa.

A aplicação do programa em sistemas menores, como baterias de poços, pode levar a resultados mais precisos do que avaliações em sistemas regionais. Isto decorre dos fundamentos de simplificações envolvidas nos modelos analíticos. Assim, os tipos e propriedades dos aquíferos podem variar significativamente em grandes regiões, contrariando uma série de hipóteses do Método das Funções de Poços. Em sistemas menores, várias hipóteses podem condizer com situações reais, como homogeneidade do meio e superfícies de topo e base horizontais. Isto quase sempre não se verifica nos sistemas regionais. De toda forma, a aplicação do programa em grandes áreas fornece indicações válidas acerca da evolução dos rebaixamentos na região.

A vantagem do programa sobre os modelos numéricos é evidente na avaliação de rebaixamentos próximos aos poços. Esta afirmação decorre da hipótese de diâmetro infinitesimal do poço, discordante da representação do poço por um elemento da malha numérica. Como, em situações reais, a área do poço pode ser considerada desprezível em relação à área do setor analisado, a concepção de poço no Método das Funções de Poços aproxima muito mais a realidade que a concepção dos modelos numéricos. Além disso, os detalhamentos das penetrações e seções filtrantes são propriedades do programa desprezadas na maioria dos procedimentos numéricos.

A previsão de problemas de cavitação e conseqüente desativação do poço é uma alternativa interessante que pode ser avaliada pelo programa. Esta situação é comum em poços de penetração reduzida em aquíferos de baixa

transmissividade. Nesses casos os rebaixamentos são elevados e podem inutilizar o poço em prazos curtos. Este fato destaca a conveniência de se construir poços mais profundos que aproveitem melhor a espessura do aquífero.

A construção do programa dentro do EXCEL permite desenvolver as operações num ambiente familiar aos engenheiros. Os procedimentos de entrada de dados são feitos mediante preenchimento de formulários e caixas de diálogo devidamente apresentados de acordo com a opção selecionada. As planilhas e os cálculos são ativados por botões específicos. Fatos como estes dispensam o usuário do conhecimento de matemática computacional e, até mesmo, de conhecimentos avançados acerca do EXCEL. A natureza analítica do programa prescinde da necessidade de discretizar o domínio de escoamento, eliminando as subjetividades decorrentes desse procedimento.

O tempo de execução do programa é composto dos tempos individuais de construção de cada planilha. As planilhas de cálculo das funções de poços (W e $W2$) são as que demandam maior esforço computacional, limitando assim o tempo total de execução. De maneira evidente, quanto maior o número de poços do sistema analisado, maior será o tempo de construção das planilhas. Da mesma forma, o tempo de execução aumenta com poços enquadrados em situação de não confinamento. Isto decorre dos procedimentos de cálculo mais complexos desses modelos conceituais em relação aos modelos não confinados.

De uma maneira geral, o programa constitui uma interessante ferramenta no cálculo de rebaixamentos em sistemas de poços, fornecendo diretrizes para tomadas de decisão acerca da operação e ampliação desses sistemas.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKKER, M. An analytic, approximate method for modeling steady, three-dimensional flow to a partially penetrating wells, *Water Resources Research*, v.37, n.5, p. 1301–1308, 2001.

BARROS, R. T. de V. et alli Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios, v.2, *Escola de Engenharia da UFMG*, Belo Horizonte, 1995.

BOULTON, N.S.; STRELTSOVA, T.D. New equations for determinig the formation constants of na aquifer from pumping test data, *Water Resources Research*, v.11, n.1, p.148-153, 1975.

BOUWER, H. *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Book, New York, 1978.

CONTIN NETO, D. Relatório Técnico do Projeto de Gestão da Quantidade de Águas Subterrâneas – Resultados. *FIPAI*, São Carlos, 1996.

CROWE, A .S.; S.G. SHIKAZE; F.W. SCHWARTZ A grid generating algorithm for simulating a fluctuating water table boundary in heterogeneous unconfined aquifers, *Advances in Water Resources*, v.22, n.6, p. 567-575, 1999.

DAEE, Estudo das Águas Subterrâneas – Região Administrativa 6, Ribeirão Preto, 1977.

DAWSON, K.J.; J. D. ISTOK Aquifer Testing – Design and Analysis of Pumping and Slug Tests, *Lewis Publishers*, Chelsea, 1991.

DELLA TOGNA, R. J. B. Estudo das águas subterrâneas no estado de São Paulo, *Água Subterrânea*, v.1, n.3, 1973.

GOMES, C. C.; M. A. H. de CASTRO Método de elementos analíticos para modelagem de fluxo de água subterrânea, *XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, Aracaju, Nov. 2001.

HAITJEMA, H. M. Analytic Element Modeling of Groundwater Flow, *Academic Press*, San Diego, 1995.

HAITJEMA, H.M. Modeling three-dimensional flow in confined aquifers by superposition of both two and three-dimensional analytic functions, *Water Resources Research*, v.21, n.10, p. 1557-1556, 1985.

HANTUSH, M. S. Hydraulics of Weels. In Chow, V. T. Ed., *Advances in Hydroscience*, v.1, p. 281-442, 1964.

HANTUSH, M. S.; JACOB, C. E. Non-steady Radial flow in an Infinite Leaky Aquifer. Transactions, American Geophysical Union, v.36, n.1, p. 95-100, 1955.

HANTUSH, M.S. Flow of groundwater in relatively thick leaky aquifers, *Water Resources Research*, v.3, n.2, p. 583-590, 1967.

HUNT, B. E. Mathematical Analysis of Groundwater Resources, *Butterworth and Co*, 1983.

JANKOVIC, I. SPLIT Manual – Version 2.3, *Department of Civil, Structural and Environmental Engineering*, University of Buffalo, 2001.

KRUSEMAN, G.P.; N. A. de RIDDER *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 1990.

LUTHER, K.; H. M. HAITJEMA An analytic element solution to unconfined flow near partially penetrating wells, *Journal of Hydrology*, v.226, p. 197–203, 1999.

LUTHER, K.H.; HAITJEMA, H.M. Approximate analytic solutions to 3D unconfined groundwater flow within regional 2D models, *Journal of Hydrology* v.229, p. 101- 117, 2000 .

MARSILY, G. de *Quantitative Hydrogeology – Groundwater Hydrology for Engineers*, Academic Press, San Diego, 1986.

MOENCH, A .F.; PRICKETT, T.A. Radial Flow in na Infinite Aquifer Undergoing Conversion from Artesian to Water Table Conditions, *Water Resources Research* ,v.8, n.2, p. 494-499, 1972.

NEUMAN, S. P. Supplementary Comments on Theory of flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of Water Table, *Water Resources Research*, v. 9, n.4, p. 1102-1103, 1973.

NEUMAN, S.P. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resources Research*, v.10, n.2, p. 303-312, 1974.

NEUMAN, S.P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table, *Water Resources Research*, v.8, n.4, p. 1031-1045, 1972.

OSNES, H.; H. P. LANGTANGEN An efficient probabilistic finite element method for stochastic groundwater flow, *Advances in Water Resources*, v.22, n.2, p. 185-195, 1998.

SALEEM, Z. A.; JACOB, C. E. Drawdown distribution due to well fields in coupled leaky aquifers 2. Finite aquifer system, *Water Resources Research*, v.10, n.2, p. 336-342, 1974.

SHAN, C. An analytical solution for the capture zone of two arbitrarily located wells, *Journal of Hydrology*, v.222, p. 123–128, 1999.

STEGUN, I. A.; ZUCKER, R. Automatic computing methods for special functions, Part II, the exponential integral, *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, v.78B, p. 199-216, 1974.

STRACK, O. D. L. Groundwater Mechanics, *Prentice-Hall*, New Jersey, 1989.

SZÉKELY, F.; Y. SENAY; M. AL-RASHED; A. AL-SUMAIT; E. AL-AWADI, Computer simulation of the hydraulic impact of water well fields in Kuwait, *Journal of Hydrology*, v.235, p. 205 – 220, 2000.

THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Trans. Amer. Geophys. Union*, v.16, p. 519 – 524, 1935.

TRESCOTT, P.C.; PINDER, G. F.; CARSON, S. P. Finite difference model for aquifer simulations in two dimensions with results of numerical experiments, *Technique of Water Resources Investigations of the USGS*, US Geol. Survey, Washington, 1976.

TSENG, P.H.; LEE, T.C. Numerical evaluation of exponential integral: Theis well function approximation, *Journal of Hydrology*, v.205, p. 38-51, 1998.

UPADHYAYA, A.; H.S. CHAUHAN Water table fluctuations due to canal seepage and time varying recharge, *Journal of Hydrology*, v.244, p.1-8, 2001.

VERRUIJT, A. Theory of Groundwater Flow, *Macmillan Civil Engineering Hydraulic Series*, University of Salford, 1970.

ANEXO – REGRAS E FUNÇÕES ESPECIAIS

---

1 – Regra de Newton – Raphson (Zeros de Funções)

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

2 – Regra de Simpson (1/3) (Quadratura Numérica)

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{h}{3} \cdot [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n],$$

onde:

$$h = \frac{b-a}{n.divisões};$$

$$y_n = f(x_n);$$

3 – Função de Bessel de Primeira Espécie e Ordem Zero ($J_0(x)$)

$$J_0(x) = \sum (-1)^n \cdot \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{2n}}{n!}$$

4 – Funções Hiperbólicas

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$