

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISA HIDRÁULICAS

## **MODELO DE GESTÃO PARA A ÁGUA SUBTERRÂNEA**

Cleuda Custódio Freire

Tese submetida ao Programa de Pós - Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre, novembro de 2002

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz e Judith, que me ensinaram os verdadeiros valores da vida e às minhas filhas, Luana e Renata, a quem eu espero saber transmiti-los. Dedico-o também aos meus irmãos Lúcia, Lourdes, Luiz Jr., Jadir, Fatima, Ely, Antônio, Jovina e Clilton e respectivos esposos(as) e filhos(as) pelo apoio e paciência inesgotáveis.

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) sob a orientação do Prof. Antônio Eduardo Lanna e co-orientação do Prof. Nelson Caicedo

Para a realização do trabalho contou-se com apoio financeiro permanente da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), instituição de origem da autora, e pela CAPES, através de bolsa de estudo do programa PICDT. O IPH/UFRGS prestou apoio parcial em vários eventos científicos.

Segundo Carlos Galvão aos amigos e parentes não se agradece, mesmo assim decidi registrar para lembrar de todos que participaram, de alguma forma, desta etapa da minha vida.

Inicialmente, gostaria de agradecer ao Prof. Antônio Eduardo Lanna pela orientação paciência e estímulo ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Nelson Caicedo, que tanto se empenhou para que este trabalho fosse concretizado, minha sincera gratidão.

Não poderia deixar de lembrar do Prof. Roberaldo Souza, que me encaminhou inicialmente para a pesquisa e que continua até hoje irradiando brilhantemente os seus ensinamentos.

A todos os que fazem o Instituto de Pesquisas Hidráulicas, que torna-se para nós extensão de nossas casas e de nossas famílias, recebendo-nos com carinho e compreensão. Em especial a incansável Nadir que primeiro me recebeu e me fez sentir “em casa”.

Aos adorados amigos Márcia Ribeiro e Carlos Galvão que acreditaram e me incentivaram a sair de Maceió para o doutorado.

Muitos amigos foram feitos durante esta longa jornada no IPH, de provas, de conversas... Alex Gama, Binha, Marcus Cruz, Francis, Jorge Pilar, Ricardo Marquezan, Daniela, André, Célia, Flávio, Roberval, Viegas, Hansen, Jussara, Geraldo, Jean, Walter Viana, Cris, Elisa, Vladimir, Fernanda, Omar, Anísio, Rita, Beatriz, Walter Collischon, Vivi, Roberto Kirchheim, Valmir, Angélica, Mário Mendiando, Jaime, Renato, Adolfo, Ruth, Daniel, Sidney, Karina, Luiz Gustavo, Marllus, Manuela, Eraly, Jorge, Victor, Juliano, Paulo Araújo, Paulo (ex-cabeludo), Pedro, Ane, Alexandra, Marcos, Joana, Conceição, Luciene, Max, Fábio Arnéz, Juliano, Eduardo Bueno... Enfim a todos os amigos (irmãos), citados ou não, que comigo conviveram e ajudaram a transformar o IPH em “nossa casa”.

Outros, externos ao IPH, que tornaram as nossas permanências (das minhas filhas e minha) em POA mais agradável: Tio Edson, Tia Zélia e toda a sua família, Sílvio, Rosane e família, Fernando, Zenaide e família e a todos os amigos da Sociedade Espírita Augusto da Paz, encarnados e desencarnados.

Para Sr. Carlinhos e família, especialmente para D. Célia que não mediu esforços para participar desta luta junto conosco, com a sua presença, incentivo e carinho, o nosso muito obrigada.

Ao Carlos Góes, que esteve presente durante esta etapa de nossas vidas em nossos pensamentos, por incentivar o nosso “crescimento”, apesar da distância e da saudade das filhas, o nosso agradecimento.

Aos Professores, alunos e funcionários do Centro de Tecnologia da UFAL, principalmente os que compõem o Departamento de Águas e Energia, em especial ao Prof. e amigo Gustavo Carvalho.

Para Jaildo, a minha admiração pela sua presteza, solidariedade, amizade, competência. Muito grata.

Minha querida sobrinha Jenynha, estivemos muito juntas nesta etapa e você foi muito importante...Admiro a sua coragem e determinação.

Christopher, querido aluno e sobrinho, que dedicadamente me auxiliou na fase conclusiva deste trabalho.

Stelinha, minha querida amiga-irmã, não tenho dúvidas que estamos nos reencontrando nesta passagem pela vida. Obrigada pelo apoio, incentivo, confiança, orientação, etc., sem a sua participação tudo seria muito mais difícil, meu mais sincero e eterno agradecimento.

Deus, além de agradecer-Lhe por esta conquista profissional, quero agradecer, principalmente, por todos os momentos e por todas as pessoas que tive oportunidade de conviver. Sei que sem a Sua ajuda isto não seria possível. OBRIGADA!

# Resumo

## MODELO DE GESTÃO PARA A ÁGUA SUBTERRÂNEA

A Política Nacional de Recursos Hídricos e as legislações estaduais têm como principal objetivo racionalizar o uso da água devido à sua escassez. Para isto, instituem cinco instrumentos para a gestão dos recursos hídricos no Brasil e dentre eles estão a outorga e a cobrança pelo uso da água. A água subterrânea vem sendo cada vez mais utilizada em todo o mundo devido, principalmente, ao seu baixo custo e boa qualidade. Ferramentas que auxiliem aos órgãos gestores na aplicação destes instrumentos são, portanto, de extrema necessidade.

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de metodologias para gestão de águas subterrâneas, a partir de sugestões de critérios de outorga e cobrança, no intuito de preencher uma lacuna metodológica existente nas práticas brasileiras de gestão de recursos hídricos subterrâneos. O modelo de simulação/otimização proposto visa auxiliar aos órgãos gestores dos recursos hídricos em suas “tomadas de decisão”, quando estas se referirem à gestão da água subterrânea.

O modelo foi aplicado no Aquífero dos Ingleses, localizado no litoral de Santa Catarina/Brasil, e os resultados obtidos demonstraram a grande utilidade desta ferramenta como base para a emissão de outorgas e referência para a cobrança de águas subterrâneas.

# **Abstract**

## MANAGEMENT MODEL OF GROUND WATER

National waters' politics and state legislations have as main goal to rationalize the use of the water due to its shortage. Therefore, they institute five administration instruments of water resources in Brazil, being granting and charging of water utilization placed among them. Ground water is being used more and more all over the world due, mainly, to its low cost and good quality. Tools that aid the organs' managers in the application of these instruments are, hence, fundamentally needed.

This work has as general objective the development of management methodologies of ground waters, by suggesting approaches of granting and collecting, aiming the fulfillment of an existent methodological blank in Brazilian's practical administration of ground water resources. The proposed simulation/optimization model seeks helpers to the water resources' managers in its "decision taking process", whenever these refer to the ground water administration.

The model was applied on English Aquifer, Santa Catarina (Brasil's coast), and the results obtained demonstrated the great usefulness of this tool as base of ground water granting and charging reference.

## SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FOTOS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 – APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 – OBJETIVOS.....	4
1.2.1- OBJETIVO GERAL.....	4
1.2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.2.3- OBJETIVOS CORRELATOS.....	4
1.3- ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO.....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1-MODELOS DE GESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	6
2.1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	6
2.1.2 – APLICAÇÕES DE MODELOS DE GESTÃO.....	9
2.1.3 – COMENTÁRIOS.....	15
2.2- ASPECTOS LEGAIS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	15
2.2.1-HISTÓRICO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NAS LEGISLAÇÕES BRASILEIRAS.....	15
2.2.2–LEGISLAÇÕES ESPECÍFICAS PARA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO BRASIL.....	22

2.2.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ASPECTOS LEGAIS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO BRASIL.....	28
2.3-OUTORGA E COBRANÇA: INSTRUMENTOS DE GESTÃO APLICADOS À ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	29
2.3.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
2.3.2 - OUTORGA.....	30
2.3.2.1- PROCEDIMENTO GERAL PARA SOLICITAÇÃO DA OUTORGA.....	30
2.3.2.2- CADASTRO DOS USUÁRIOS.....	31
2.3.2.3- FISCALIZAÇÃO.....	32
2.3.3- COBRANÇA.....	33
2.3.4- OUTORGA E COBRANÇA EM ALGUNS PAÍSES.....	35
2.4-CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>50</b>
3.1-INTRODUÇÃO.....	50
3.2-MODELO DE SIMULAÇÃO.....	50
3.3-MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	55
3.3.1-PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	56
3.3.2-PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR.....	57
3.4-EQUAÇÕES BÁSICAS.....	58
3.4.1-EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO SUBTERRÂNEO.....	58
3.4.2-MODELO HORIZONTAL OU MODELO REGIONAL.....	58
3.4.2.1-AQUÍFEROS CONFINADOS.....	58
3.4.2.2-AQUÍFEROS LIVRES OU NÃO CONFINADOS.....	59
3.5-PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO NOS AQUÍFEROS.....	61
3.6-MODELO DE GESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	62
3.6.1-SIMULAÇÃO.....	63
3.6.2-OTIMIZAÇÃO.....	65
3.6.2.1-MAXIMIZAÇÃO DAS RETIRADAS.....	66

3.6.2.2-MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS.....	69
3.7-CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO S/O.....	73
<b>4-CASO EM ESTUDO-AQÜÍFERO DOS INGLESES.....</b>	<b>74</b>
4.1-DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	74
4.1.1-CLIMA.....	76
4.1.2-PRECIPITAÇÃO.....	77
4.1.3-EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	77
4.1.4-USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	77
4.1.5-ESCOAMENTO SUPERFICIAL/INFILTRAÇÃO.....	78
4.1.6-RECARGA.....	79
4.1.7-GEOLOGIA.....	79
4.1.8-HIDROGEOLOGIA.....	80
4.1.9- TOPOGRAFIA DO TERRENO.....	80
4.2-USO DA ÁGUA NA REGIÃO.....	81
<b>5.APLICAÇÃO DO MODELO S/O: AQÜÍFERO DOS INGLESES.....</b>	<b>85</b>
5.1-DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO.....	85
5.2 - CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	85
5.3 – CALIBRAÇÃO .....	89
5.4 – SIMULAÇÃO.....	92
5.5 – CENÁRIOS DE OUTORGA CONSIDERADOS NO MODELO S/O.....	94
5.5.1 – CENÁRIO I .....	98
5.5.2 - CENÁRIO II.....	98
5.5.3 – CENÁRIO III.....	98
5.5.4 – CENÁRIO IV.....	99
5.5.5- CENÁRIO V.....	100
5.5.6- CENÁRIO VI.....	100

<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>101</b>
6.1 – LINEARIZAÇÃO.....	101
6.2 – OTIMIZAÇÃO.....	101
6.2.1- MAXIMIZAÇÃO DAS RETIRADAS.....	101
6.2.1.1 – CENÁRIOS I, II, III, IV.....	101
6.2.1.2 – CENÁRIO V.....	104
6.2.1.2.1 – CENÁRIO I.....	104
6.2.1.2.2 – CENÁRIO II.....	106
6.2.1.2.3 – CENÁRIO III.....	110
6.2.1.2.4 – CENÁRIO IV.....	117
6.2.1.3 – CENÁRIO VI.....	117
6.2.2 – MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS.....	123
6.3- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
<b>7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>130</b>
7.1 – CONCLUSÕES.....	130
7.2 – RECOMENDAÇÕES.....	133
<b>9-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>134</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Valores cobrados pela retirada de água bruta em Baden-Wurttemberg - Alemanha (adaptado de Smith, 1995).....	36
Tabela 2.2- Valores cobrados por captação de água bruta em bacias francesas (Alvarez, 1997 citado por Ribeiro e Lanna 1997).....	40
Tabela 2.3 - Nível de cobrança de água subterrânea em diferentes países (fonte: adaptado de Schiffler, 1998).....	49
Tabela 4.1 – Divisão da bacia hidrográfica em zonas de acordo com o uso e a ocupação do solo (Fonte:CASAN,2000).....	77
Tabela 4.2 – Balanço hídrico nas regiões (Fonte:CASAN,2000).....	78
Tabela 4.3- Informações Cadastrais dos Poços do Sistema Costa Norte (Fonte: CASAN,2000).....	84
Tabela 4.4- Informações Adicionais dos Poços do Sistema Costa Norte (Fonte: CASAN,2000).....	84
Tabela 5.1- Valores das condutividades hidráulicas.....	90
Tabela 5.2 – Valores das propriedades hidrodinâmicas após calibração.....	91
Tabela 5.3 – Faixa de domínio das variáveis $X_i$ e $T_i$ para os cenários III e IV.....	99
Tabela 6.1 – Extrações ótimas resultantes do modelo S/O.....	103
Tabela 6.2 – Retiradas “ótimas” obtidas para o cenário V aplicado ao Cenário I.....	105
Tabela 6.3 - Folgas existentes nas restrições de rebaixamento para o Cenário I.....	106
Tabela 6.4 – Extrações “ótimas” obtidas com a redução do rebaixamento para o Cenário II.....	107
Tabela 6.5 – Retiradas “ótimas” obtidas para o cenário II com diferentes valores de $X_i$ .....	108
Tabela 6.6 – Limites inferiores diferenciados adotados para a captação no Cenário II.....	109
Tabela 6.7- Extrações (em m <sup>3</sup> /dia) fixas em alguns poços do Cenário III.....	110

Tabela 6.8 - Extrações “ótimas” obtidas com a redução do rebaixamento para o Cenário III.....	110
Tabela 6.9 – Vazões “ótimas” para as alternativas consideradas no cenário III.....	113
Tabela 6.10 - Extrações (em m <sup>3</sup> /dia) fixas em alguns poços do cenário III- 2 <sup>a</sup> alternativa.....	113
Tabela 6.11 - Extrações (em m <sup>3</sup> /dia) estabelecidas na 3 <sup>a</sup> alternativa do cenário III.....	116
Tabela 6.12 - Extrações (em m <sup>3</sup> /dia) estabelecidas na 4 <sup>a</sup> alternativa do cenário III.....	116
Tabela 6.13 – Resultados da simulação de otimização para as situações testadas de bombeamento e localização.....	118
Tabela 6.14 – Análise comparativa da inclusão de poços de bombeamento no aquífero...	121
Tabela 6.15 – Distribuição das captações nos poços considerando a minimização dos custos.....	124
Tabela 6.16- Situações de variação do bombeamento em P6 para análise do custo Mínimo.....	128

## **LISTA DE FOTOS**

Foto 01 – Vista do Costão do Santinho para a Praia dos Ingleses.....	79
Foto 02 – Vista lateral do poço tubular da CASAN –CIRO.....	81
Foto 03 –Vista frontal do poço tubular da CASAN –AREIAL.....	83
Foto 04 –Típico poço do tipo ponteira amplamente difundido na região dos Ingleses.....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cadastro específico de usuários do DAEE/SP.....	47
Figura 3.1- Malha do aquífero hipotético.....	64
Figura 3.2- Representação das cargas hidráulicas e rebaixamentos em um poço $P$ com uma taxa de bombeamento $Q$ .....	66
Figura 3.3 - Fluxograma do modelo s/o.....	67
Figura 3.4 – Reservatório submetido à retirada de água por bombeamento (fonte: Gonzalez, 989b).....	72
Figura 4.1- Localização da Praia dos Ingleses, na Ilha de Santa Catarina, e uma janela de entrada do <i>visual MoDFLOW</i> com a região utilizada para o estudo de caso.....	75
Figura 4.2 - Visualização em escala de cores da topografia do terreno.....	82
Figura 5.1 – Domínio e malha empregados no modelo s/o.....	86
Figura 5.2 – Apresentação da condição de contorno de carga hidráulica especificada no aquífero dos Ingleses.....	87
Figura 5.3 - Modelo conceitual implementado para a área.....	88
Figura 5.4 – Corte leste-oeste do domínio, a 4900 m do limite sul (linha 23).....	89
Figura 5.5 – Resultados gráficos da calibração do modelo. Os pontos representam os poços de observação utilizados e, as linhas pontilhadas, o intervalo de confiança com 95% de probabilidade.....	91
Figura 5.6 – Equipotenciais calculadas através do modelo calibrado para a área. As setas verdes indicam a direção dos vetores velocidade.....	93
Figura 5.7 – Equipotenciais calculadas através do modelo calibrado para a área. Corte leste-oeste, a 1760 m do limite sul (linha 47). Exagero vertical de 5 vezes.....	94
Figura 5.8 – Localização dos poços virtuais inseridos para execução do modelo s/o.....	95
Figura 5.9 – Bombeamento no poço 1 e respectivo cone de rebaixamento.....	96
Figura 5.10 – Bombeamento no poço 30 e respectivo cone de rebaixamento.....	97
Figura 6.1 – Curvas apresentando os rebaixamentos obtidos através da simulação do bombeamento nos poços (Dmod) e aquelas obtidas a partir da	

superposição de efeitos (Dt).....	102
Figura 6.2 – Configuração dos poços em operação e com instalações previstas .....	112
Figura 6.3 - Poços, em vermelho, localizados na região de maior conflito observado.....	114
Figura 6.4 – Regiões estabelecidas para o aquífero através das simulações.....	115
Figura 6.5- Localização de um poço de extração bem próximo aos outros poços supostamente já existentes.....	119
Figura 6.6- Localização de um poço de extração um pouco mais distanciado dos demais poços supostamente já existentes.....	120

# 1- INTRODUÇÃO

## 1.1 – Apresentação

O subsolo estoca cerca de 10,5 milhões de km<sup>3</sup> de água subterrânea doce. Isto representa cerca de 97% dos volumes de água doce líquida existente nos continentes, passíveis de acesso através de meios tecnológicos e econômicos. Estas águas podem ser utilizadas para abastecimento das populações, indústrias e atividades agro-pecuárias devendo-se, para isto, empregar a forma correta de captação (Rebouças, 1999).

Apesar da grande disponibilidade, as reservas de água subterrânea não são, normalmente, a primeira fonte de captação procurada pelos usuários para abstração por razões econômicas. A primeira busca se faz à água superficial quando a mesma acha-se disponível. Isto ocorre, principalmente, graças às facilidades que se tem de acesso e visualização, que permitem a sua retirada direta, inclusive para análise de qualidade da água, já que a coleta de uma amostra é feita quase sem nenhum investimento antecedente. Diferente do que acontece com a água subterrânea, que tem um alto custo de extração comparado ao que se tem com a água superficial. Isto se verifica até mesmo para retirada de uma amostra para avaliação de sua qualidade. No caso da água subterrânea, são necessários grandes investimentos prévios que, muitas vezes, podem, após análise, revelar qualidade insatisfatória para o uso ao qual se deseja, implicando ainda em outros gastos para o tamponamento adequado da perfuração realizada. Muitas águas subterrâneas estão armazenadas em grandes profundidades, os custos de bombeamento são usualmente altos, excedendo, em muitos casos, o benefício esperado do seu uso. Muito aquíferos são considerados fora do alcance humano. Há ainda situações em que os aquíferos não estão localizados onde são necessários. O custo de transporte da água é muito grande comparado ao valor da própria água, fazendo assim com que a transferência de longa distância, aliada ao custo da extração, seja impraticável. Finalmente, a qualidade da água subterrânea, que vem sendo a cada dia mais degradada, não tem sua extensão exatamente conhecida. Normalmente os aquíferos rasos (mais acessíveis) e aqueles localizados em áreas urbanas e

intensamente cultivadas são mais afetados, enquanto muitos outros aquíferos ainda contêm água de boa qualidade, porém, com acesso mais restrito.

Entretanto, apesar disto, a utilização da água subterrânea para abastecimento doméstico, agrícola e industrial vem crescendo intensamente em todo o mundo. Nos últimos 25 anos foram perfurados, anualmente, aproximadamente 12 milhões de poços no mundo. Nos Estados Unidos perfura-se entre 800 e 900 mil poços/ano, tendo sido triplicado o uso para irrigação, chegando a atender 45% do total de terras irrigadas. Na Índia são irrigados cerca de 31 milhões de hectares. Em alguns países mais da metade do total de terras irrigadas são abastecidas com água de origem subterrânea, como o Irã, com 58%, e Argélia, com 67%. A Líbia depende exclusivamente desta fonte hídrica para irrigação (ABAS, 2001).

Para o abastecimento público também tem-se recorrido às fontes subterrâneas. Países como a Arábia Saudita, Dinamarca e Malta são abastecidos exclusivamente por água subterrânea. Em outros, como a Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Holanda, Marrocos, Rússia e Suíça, estima-se que atende-se mais de 70% da demanda é atendida. Atualmente, segundo Montaigne (2002), metade da Índia enfrenta graves problemas do excesso de bombeamento, com muitos lavradores sendo obrigados a abandonar seus poços, ou perfurar cada vez mais fundo, elevando assim os custos e tornando a agricultura inviável para muitos. Isto ocorre porque os agricultores retiram água mais rapidamente do que a natureza é capaz de repor. Em certas partes do Gujarat o lençol freático vem afundando até 6 metros por ano. O excesso de exploração dos lençóis subterrâneos vem ocorrendo em todo o mundo, para usos agrícolas, urbanos ou industriais. No aquífero Ogallala, imenso reservatório subterrâneo que fica sob as Grandes Planícies, retiradas a um ritmo insustentável vêm sendo executadas pelos fazendeiros americanos. No Texas, uma terça parte dessa reserva já está praticamente esgotada. No norte da China, o lençol freático sob a planície na região agrícola daquele país está baixando sem cessar e o contínuo esgotamento das águas subterrâneas pode reduzir a produção de cereais da China e da Índia de 10 a 20% nas próximas décadas.

No Brasil, são perfurados entre 8.000 e 10.000 poços por ano, sendo a grande maioria para o abastecimento de indústrias. Nas últimas décadas a procura para o abastecimento público no país tem aumentado, sendo o Estado de São Paulo o seu maior usuário, tendo cerca de 65% dos seus núcleos urbanos e 90% das suas indústrias abastecidas total ou parcialmente por poços. A cidade de Ribeirão Preto/SP é totalmente abastecida por água subterrânea e, como ela, também a cidade de São Sebastião no Distrito Federal, com 60.000 habitantes, através de poços profundos. No Vale do Gurugúia/PI e em Mossoró/RN existem importantes plantações irrigadas com água de poços profundos nas culturas de uva e cítricos que são exportados para diversos países da Europa (ABAS, 2001). Maceió, capital do Estado de Alagoas, com uma população de aproximadamente 800.000 habitantes, tem 81% do abastecimento proveniente de fonte subterrânea (Nobre e Nobre, 2000).

Este crescente aumento da procura é estimulado por vários fatores, sendo os principais: 1) a forte degradação verificada nas águas superficiais, especialmente aquelas que estão localizadas próximas a centros urbanos e zonas agrícolas; 2) progressos tecnológicos que viabilizam o acesso a aquíferos profundos e bombas cada vez mais potentes, retirando vazões cada vez maiores; 3) crescimento populacional nos centros urbanos; 4) a água subterrânea, por razões naturais, possui normalmente boa qualidade e; 5) por ser viável economicamente (desde que possua um bom projeto de engenharia, a vida útil de um poço é de vinte a trinta anos, com amortização de investimentos realizados em apenas um terço deste período, fonte: ABAS, 2001).

Com a constatação deste aumento na procura pelo uso da água subterrânea, muitas vezes de forma indiscriminada, o disciplinamento do uso se faz cada vez mais urgente e necessário. A gestão do recurso hídrico subterrâneo baseada nas legislações vigentes e nas condições hidrogeológicas dos aquíferos torna-se imprescindível para a sua preservação, especialmente nas regiões aonde já se verificam sobreexplorações. Nas regiões costeiras a gestão é ainda mais emergencial devido aos riscos da ocorrência de intrusão salina em decorrência da sobreexploração.

## **1.2 – Objetivos**

### **1.2.1 - Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de metodologias para gestão de águas subterrâneas, baseado nas exigências legais que atualmente vigoram no Brasil, através de conhecimentos hidrogeológicos e da aplicação de modelos matemáticos.

### **1.2.2 - Objetivos Específicos**

- Desenvolver e testar critérios de gestão de águas subterrâneas, através do fornecimento de base para a emissão de outorga da água subterrânea empregando modelos simulação/otimização
- Propor dois modelos de simulação/otimização considerando os aspectos hidrogeológicos do aquífero e a manutenção da sua sustentabilidade. Para o desenvolvimento dos mesmos serão utilizados na simulação do fluxo subterrâneo o MODFLOW, e para os processos de otimização foram empregados o *software* LINDO - Linear, Interactive, and Discrete Optimization (Gama, 1998) e o ambiente MATLAB.

### **1.2.3 - Objetivos Correlatos**

- Auxiliar aos órgãos gestores dos recursos hídricos em suas “tomadas de decisão”, quando estas se referirem à gestão da água subterrânea.
- Preencher uma lacuna metodológica existente nas práticas brasileiras de gestão de recursos hídricos.

### **1.3 – Estruturação do Texto**

O tema abordado por este trabalho envolve uma gama de assuntos e, portanto, requer uma ampla base de conhecimentos para o seu desenvolvimento. Assim sendo, o capítulo 2 concentra uma revisão de literatura envolvendo vários aspectos discutidos ao longo do trabalho e direcionados às águas subterrâneas tais como: o estado da arte dos modelos de gestão, os aspectos legais e os instrumentos de outorga e cobrança.

O capítulo 3 aprofunda os conhecimentos básicos em relação aos modelos de simulação e otimização, posto que este é o principal objeto para o entendimento e desenvolvimento do modelo proposto, e apresenta também a metodologia empregada para a concepção do modelo. O capítulo 4 apresenta a região utilizada como estudo de caso e a aplicação do modelo à região encontra-se no capítulo 5. Os resultados e as discussões, bem como as conclusões e recomendações acham-se respectivamente nos capítulos 6 e 7. O capítulo 8 foi dedicado às referências bibliográficas.

## **2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - Modelos de Gestão de Água Subterrânea**

#### **2.1.1- Considerações Gerais**

Os modelos, na ótica da água subterrânea, são ferramentas de avaliação do impacto a longo prazo de retiradas sustentáveis de água, da interação água superficial – subterrânea e da migração de contaminantes químicos. A simulação é vista como um método para explorar problemas hidrogeológicos e uma ferramenta para prever impactos sobre sistemas de água subterrânea, sendo essencial para hidrólogos e gestores de água. As técnicas de simulação são defendidas por pesquisadores quando utilizadas em conjunto com a otimização sendo, inclusive, considerado improvável que alternativas de gestão ótima sejam descobertas usando apenas técnicas de simulação, é necessário que não se use a simulação apenas mas, um modelo combinado de simulação e otimização. Um modelo combinado considera o comportamento particular de um dado sistema aquífero e determina a melhor política de operação sobre os objetivos e restrições ditados pelo gestor da água (Gorelick, 1983).

Uma classificação de modelos de gestão de água subterrânea que os divide em duas categorias, é apresentada por Gorelick (1983): 1) Categoria que distingue entre modelos em que a decisão do gestor é voltada prioritariamente à hidráulica da água subterrânea e aqueles modelos cujas decisões buscam inspecionar políticas de avaliação como também políticas de distribuição de água. Na primeira classe desta categoria, modelos são levados a gerir o estímulo da água subterrânea como o bombeamento e a recarga. Esses modelos tratam os estímulos e a carga hidráulica diretamente como variáveis de decisão. É importante notar que as variáveis de decisão físicas, tais como taxas de bombeamento, podem ser interpretadas como substitutas das variáveis econômicas, visto que aquelas variáveis podem refletir o comportamento destas variáveis sendo, neste caso, tratadas como considerações econômicas implícitas. Alguns modelos podem igualmente conter fatores econômicos explícitos como custos dos poços e bombeamentos. Os modelos que estão

preocupados principalmente com a gestão da hidráulica do aquífero são muitas vezes chamados de “modelos de gestão da hidráulica da água subterrânea”. 2) A segunda categoria envolve modelos que podem ser usados para inspecionar interações econômicas complexas tais como a influência de instituições no comportamento de uma economia agrícola ou problemas complexos de distribuição de água superficial e subterrânea. Estes modelos são geralmente caracterizados por otimizações múltiplas, uma para cada sub-área em uma região, e têm um forte componente econômico de gestão. Além disso, as séries de otimizações podem ser seguidas por checagens externas, simulações e/ou otimizações adicionais. Em ambas as categorias os modelos empregam técnicas de otimização linear ou quadrática. Tais técnicas visam otimizar um objetivo, tal como minimização de custos ou maximização de produção de poços, e são sujeitos a uma série de restrições lineares algébricas as quais limitam ou especificam valores de variáveis de decisão como rebaixamentos, gradientes hidráulicos, ou taxas de bombeamento. Em ambas as categorias o modelo de simulação que compõe o modelo de gestão é baseado na equação de fluxo de água subterrânea em meio saturado (Cooper, 1966; Pinder and Bredehoeft, 1968; Remson et al., 1971 – apud Gorelick, 1983).

Os denominados “modelos de gestão da hidráulica da água subterrânea” incorporam modelos de simulação de um sistema particular como restrição no modelo de gestão. Decisões de gestão tanto quanto de simulação do comportamento da água subterrânea são acompanhados simultaneamente. Duas técnicas de acompanhamento têm sido utilizadas: a primeira é o “método de encaixe”, em que aproximações de diferenças finitas ou elementos finitos da equação de fluxo governante da água subterrânea são tratadas como parte do grupo de restrições de um modelo de programação linear. As variáveis de decisão podem ser as cargas hidráulicas em cada nó ou ainda o estímulo local, tal como taxa de bombeamento e condições de contorno. A segunda técnica é o “método da matriz resposta” em que um modelo de simulação externo é usado para desenvolver respostas unitárias. Cada resposta descreve a influência de um pulso unitário (como bombeamento para um breve período) nas alturas piezométricas em pontos de interesse ao longo de um sistema. Um grupo de respostas unitárias, uma matriz resposta, é incluída no modelo de gestão. As variáveis de decisão na programação linear, que podem ser inteiro ou

quadrática, incluem o estímulo local como taxas de bombeamento ou injeção e podem ser incluídas as cargas hidráulicas na discretização do modelo.

Modelos de políticas de avaliação e distribuição de água subterrânea são valiosos para problemas complexos onde a gestão hidráulica não é a única preocupação do planejador. Estes modelos têm sido aplicados em problemas transientes de larga escala que estudam a conduta de uma economia agrícola em resposta à política institucional e a otimização do uso conjunto de água superficial e subterrânea. Três tipos de modelos encontram-se nesta categoria: 1) modelos de resposta hidráulica – econômica, que são uma extensão direta da aproximação da matriz resposta para problemas em que a distribuição econômica de água e/ou superfície agrícola têm um papel chave. 2) modelos conjuntos de simulação e otimização, que usam o resultado da simulação externa de um aquífero como entrada para uma série de modelos de otimização econômica. Informações e resultados de cada período de planejamento são utilizados para a gestão durante o próximo período. Devido à gestão econômica e à simulação os modelos são tratados separadamente. Complexidade social, política e influências econômicas podem ser também consideradas. 3) modelos hierárquicos, que usam a decomposição em subáreas e a aproximação matriz-resposta. Sistemas grandes e complexos podem ser tratados como uma série de subsistemas independentes, e objetivos múltiplos podem ser considerados. Eles são particularmente valiosos para otimização em larga escala onde a gestão hidráulica detalhada é necessária no contexto de um problema de alocação de água complexo (Gorelick, 1983).

A combinação de modelos de simulação e otimização (modelos simulação/otimização s/o) é largamente utilizada para a gestão da água subterrânea. Dentro destes modelos, a resposta da carga hidráulica para bombeamento e estímulo tem sido geralmente representada usando os métodos *encaixado* ou *matriz resposta* (RM) (Gharbi e Peralta, 1994 ; Gorelick, 1983), Para o caso da aproximação *encaixada*, as aproximações numéricas das equações de fluxo são diretamente incluídas como restrição (Aguado e Remson, 1974; Cirilo, 1997). Estes modelos têm sido usados com sucesso em problemas transientes. Entretanto, eles podem ser desnecessariamente utilizados em algumas situações porque

devem conter uma equação de fluxo para cada célula e para cada período de estímulo. O método de aproximação RM envolve mais estágios. Primeiro, a simulação é usada para calcular o sistema de resposta para uma taxa unitária de bombeamento (respostas de sistemas lineares para estas taxas têm sido designados como coeficientes de influência, núcleos discretos, funções tecnológicas algébricas, e outras variantes). Segundo, os modelos simulação/otimização (s/o) são usados para calcular estratégias ótimas de bombeamento. Estes modelos (s/o) usam coeficientes de influência e superposição para descrever sistemas de respostas em localidades específicas devido a bombeamentos. Sendo assim, têm sido comumente aplicados para otimizar fluxo dentro de aquíferos lineares (confinados) ou aqueles que podem ser considerados lineares (têm espessura saturada suficiente de forma que mudanças nele não vão afetar significativamente a carga calculada). Quando aplicados em sistemas não lineares, muitos modelos s/o tem assumido que existem, no mínimo, alguns aspectos não lineares que podem ser tratados linearmente.

### **2.1.2 – Aplicações de Modelos de Gestão**

A preocupação com a gestão adequada da água subterrânea vem crescendo impulsionada, principalmente, pelo acelerado aumento da demanda. Os modelos de gestão são cada vez mais aprimorados e utilizados nas diversas situações de interesse. As técnicas de *encaixe* bem como as técnicas de *matriz resposta* estão sendo aplicadas em vários problemas e cenários através dos modelos de simulação e otimização.

Gharbi e Peralta (1994) utilizaram modelo integrado de otimização *encaixado* para a região do aquífero Salt Lake, neste sistema muitas células contêm bombeamentos não permanentes como variáveis de decisão ou cargas como variável de estado limite. Este tipo de modelo foi adaptado para auxiliar a gestão quantitativa e qualitativa de aquíferos não lineares complexos. A aproximação mostrou ser proveitosa para integrar gestão de abastecimento subterrâneo e poluição de origem difusa. A função objetivo teve ambos os objetivos: maximizar o bombeamento da água subterrânea e atingir uma meta qualitativa. Foram utilizados pesos na função objetivo permitindo ao planejador favorecer um objetivo

sobre o outro. Isto facilita a troca entre os objetivos prioritários (quantitativo ou qualitativo).

Tung e Koltermann (1985) desenvolveram um modelo de gestão de água subterrânea de parâmetro distribuído usando aproximações de diferenças finitas da equação diferencial parcial governante do fluxo de água subterrânea em um aquífero confinado. O sistema resultante de equações simultâneas foi inserido em um modelo de otimização que utiliza as cargas hidráulicas como variáveis de estado desconhecidas e os bombeamentos como variáveis de decisão. A técnica de *encaixe* provou ser aplicável para pequenos problemas de gestão, mas tem dificuldades numéricas em problemas grandes de natureza real e com heterogeneidade considerável. Segundo os mesmos autores o uso de modelos combinados simulação/otimização para gestão hidráulica do aquífero tem sido aplicada apenas dentro dos últimos dez anos. O modelo combinado possibilita a condução do aquífero para prognosticar enquanto, ao mesmo tempo, escolhe o melhor grupo de decisões de gestão de acordo com os objetivos e restrições colocadas no desenvolvimento do sistema. O conceito de incorporar um modelo de simulação em um modelo de otimização para problemas de gestão de água subterrânea é desejável porque as restrições físicas e de gestão são consideradas simultaneamente no sistema.

A minimização dos custos de abastecimento de água para satisfazer a demanda e o controle da intrusão salina são os objetivos de Nishikawa (1998), que utilizou modelos de simulação/ otimização para a gestão dos recursos hídricos disponíveis na cidade de Santa Bárbara, Califórnia. Baseado nos critérios de abastecimento da cidade, o modelo identificou o menor custo de alternativa de abastecimento que satisfaz as restrições físicas e institucionais específicas. O modelo de simulação numérica MODFLOW foi empregado. Neste estudo, o autor chama a atenção de que o modelo simula apenas o fluxo de água subterrânea, e não pode simular transporte de soluto de densidade dependente, tal como intrusão salina. As variáveis de decisão são as quantidades mensais de água distribuídas (superficial e subterrânea, incluindo a água desalinizada) e as de estado são as cargas hidráulicas. O método de coeficiente resposta (Gorelick et al. 1993) foi usado para estimar as cargas resultantes de um padrão de bombeamento particular. Por usar o coeficiente -

resposta, ele implicitamente assume que o sistema de água subterrânea responde linearmente aos estímulos de bombeamento e recarga. O modelo de otimização foi resolvido através do LINDO.

Mckinney et al (1995) aplicaram um modelo para analisar o Plano Emergencial de Redução das Retiradas (EWRP) no Aquífero Edwards. Este aquífero possui um sistema hidrológico complexo os quais servem às comunidades de Medina e Uvalde, através do rio San Antonio e, New Braunfels e San Marcos através dos rios Comal e San Marcos. O EWRP é o capítulo mais recente em uma prolongada batalha legal sobre direitos de água que tem sido encabeçada pelos usuários de água do aquífero Edwards. Esta luta teve início com a percepção clara de que o aumento das demandas para o aquífero causaria, inevitavelmente, uma redução nos fluxos dos rios San Marcos e Comal e, possivelmente, afetariam espécies em perigo que dependem dos rios. O modelo de simulação de água subterrânea, GWSIM-IV (modelo de gestão de água subterrânea de parâmetro distribuído), foi utilizado com o objetivo de avaliar o impacto causado pelas reduções de bombeamento definidas pelo plano sobre as condições hidrológicas experimentadas durante o regime de seca e as perdas totais de água bombeada do aquífero. Neste estudo concluiu-se que a implementação do plano falharia em reunir exigências regulatórias para fluxo mínimo nos rios analisados, San Marcos e Comal, durante o período de seca mas, a implementação poderia prevenir a interrupção do fluxo em ambos os rios.

Deininger (1970) discutiu o uso de análise de sistemas e técnicas de pesquisa de operação para o planejamento, projeto, e operação de partes específicas de um sistema de abastecimento. Duas áreas de interesse são enfatizadas, o primeiro tópico refere-se ao projeto ótimo de desenvolvimento de origem subterrânea, particularmente a operação de poços. O segundo tópico trata do desenvolvimento regional de fontes de abastecimento futuras. A questão de quais abastecimentos seriam desenvolvidos, em que tempo, em qual grau, e em quais linhas de transmissão seriam construídas para minimizar os custos de abastecimento regional de água são formulados matematicamente. A maximização da produção máxima de um aquífero contendo  $n$  poços, que é operado por uma autoridade, está sujeita às seguintes condições: 1) que o rebaixamento do nível hidrostático em cada

poço é limitado ao nível predeterminado para cada poço; 2) que cada bomba e poço tem limite de sucção e capacidade específica para cada caso; 3) que o rebaixamento nas bordas do aquífero é limitado para uma quantidade predeterminada. Considerações das limitações físicas do aquífero tais como profundidade, espessura, carga piezométrica, profundidade dos poços existentes, etc., são consideradas limitações do rebaixamento em cada poço. Para a determinação do custo mínimo de produção de água, são consideradas as mesmas restrições da produção.

Em 1986 foi criada em Massachusetts uma lei cujo objetivo é preservar os recursos hídricos do Estado (Massachusetts Water Management Act). A sustentabilidade do desenvolvimento econômico acompanhada da proteção do ambiente natural através da minimização das reduções dos escoamentos é o ponto principal da lei, que resultou na criação da necessidade de permissões por parte de novos e antigos usuários para retirada de água de mais de 0,1 milhões de galões por dia ( $0,00438 \text{ m}^3 / \text{s}$ ). As permissões especificam o grau para os quais os usuários podem retirar água e se reserva o direito de retirar a permissão durante épocas de baixos fluxos. Mueller e Male (1993) apresentam um modelo de programação linear capaz de assistir as agências regulatórias especificando detalhes de permissões de uso de água subterrânea. O modelo relaciona as retiradas superficiais e subterrâneas, considerando o uso consuntivo e transferência entre bacias. A otimização minimiza a depleção de fluxo abaixo de um tempo padrão que honra a distribuição estatística de retiradas permitidas a cada candidato. O resultado especifica a quantidade e tempo de permissões de retiradas ao longo do ano.

Um modelo preliminar de fluxo de água subterrânea foi desenvolvido para a região de Taiwan por Ting et al. (1998), com o objetivo de criar um recurso para a sua gestão e, principalmente, auxiliar na solução de problemas de disputas de direito de água e proteção ambiental. Na região aproximadamente 75% do abastecimento doméstico e agrícola é de origem subterrânea. Os principais objetivos do modelo são resumidos como: 1) avaliar a ocorrência de água subterrânea, características do aquífero, recarga e exploração de água subterrânea; 2) preparar um inventário da situação da água subterrânea na área de estudo com a finalidade de identificar os problemas devido às atividades humanas; 3) Estabelecer

um modelo conceitual de comportamento da água subterrânea; 4) desenvolver um modelo numérico transiente; 5) prover os “tomadores de decisão” de uma ferramenta para avaliar e prever a influência de vários cenários de uso no ambiente. A modelagem numérica do fluxo foi executada a partir do MODFLOW, exigindo esforços para a sua calibração chegar a parâmetros hidrogeológicos e excitações realísticas. Os resultados iniciais foram encorajadores, entretanto, confirmaram a necessidade urgente da gestão integrada de água superficial e subterrânea. A análise de sensibilidade mostrou claramente que a recarga por infiltração é um componente dominante sendo um assunto muito importante para o Pingtung Plain (aquífero localizado no sudoeste de Taiwan).

Reichard (1987) descreveu um modelo para calcular a alocação temporal e espacial de bombeamentos de água subterrânea para a irrigação. O modelo é usado para simular e analisar políticas de uso os quais são relevantes para bacias agrícolas onde o uso conjunto de água superficial e subterrânea é significativo.

A aproximação simulação-otimização é usada por Barlow et al.(1996) para identificar estratégias para controle da inundação no oeste do Vale San Joaquin, Califórnia, onde a região de pântano oriundo da água subterrânea ameaça a produtividade agrícola continuada. A aproximação combina uso de simulação de fluxo de água subterrânea com técnicas de otimização para construir e refinar estratégias de bombeamento identificadas em pesquisas anteriores que usaram apenas simulação do fluxo. Uso do modelo combinado de simulação e otimização apresentou uma redução de 20% na área sujeita a inundação sobre o uso identificado pela aplicação do modelo de simulação apenas. O modelo combinado de simulação e otimização identificou um aumento mais efetivo de estratégias de bombeamento para o controle do lençol freático na complexidade do aumento do problema; isto é, como o número de sub-áreas para as quais o bombeamento a ser gerido aumenta, o modelo de simulação-otimização é mais disponível para discriminar sub-áreas para determinar as locações ótimas de bombeamentos. A aproximação de simulação e otimização provê um entendimento de controle do sistema de fluxo de água subterrânea e alternativas de gestão que podem ser implementadas no vale. Em particular, resultados do modelo de simulação-otimização indicam que as estratégias de bombeamentos ótimos são

restritas pela distribuição existente de poços entre as zonas semi confinadas e confinadas do aquífero, pelo tipo de distribuição dos sedimentos (a condutividade hidráulica associada) no oeste do vale, e a distribuição histórica de bombeamento no vale.

Lall e Santini (1989) utilizaram uma formulação matriz-resposta para gestão ótima de água subterrânea onde o sistema aquífero é não confinado e estratificado (muitas camadas). Devido às dificuldades apresentadas pelas formulações (equação diferencial parcial não linear) que governam o fluxo, o Potencial Girinski (Halek e Svec, 1979) foi aplicado com o objetivo de transpor o problema permitindo uma aproximação linear para uma equação de fluxo em um sistema aquífero não confinado e estratificado. A função matriz resposta foi usada para o modelo de otimização formulado. O princípio da superposição usado com o Potencial Girinski no caso transiente foi válido para a combinação de condutividade hidráulica, carga e espessura da camada do aquífero usada no modelo. A formulação matriz resposta para gestão de abastecimento de água no regime permanente, e para certas condições físicas para alguns casos no regime transiente mostrou ser viável.

### ***Funções Objetivo***

A adoção de modelos de otimização na gestão dos recursos hídricos exige a determinação de função objetivo própria. Segundo Heidare (apud Tung e Koltermann, 1985) existem dois tipos básicos de planos de gestão: um para o qual a função objetivo é baseada em medidas econômicas tais como custo, retorno total, ou ainda retorno líquido, e um outro em que a função objetivo está baseada na capacidade física do sistema.

Para a gestão de água subterrânea baseada na capacidade física do sistema pode-se adotar como função objetivo a maximização da carga hidráulica ( $h$ ) ou ainda a maximização das retiradas ( $Q$ ), ambas sujeitas às restrições referentes à capacidade física do sistema. Quando a equação para a maximização de  $Q$  é empregada, o modelo tende a usar mais água que a permitida, em outras palavras, o modelo poderia determinar o

bombeamento o qual arrasta a superfície piezométrica abaixo do limite na carga ou poderia bombear no limite superior do bombeamento, qualquer que seja o fator limitante no espaço possível. Entretanto, a medida de conservação pode ser incluída implicitamente especificando cuidadosamente o limite inferior da carga em várias localidades do aquífero em diferentes tempos. A função objetivo de maximizar a carga é usada quando o principal objetivo é obter a água desejada enquanto minimiza a retirada no aquífero. O problema neste tipo de função objetivo é que o modelo tende a fixar poços bombeando tão obstruídos quanto possível para área de recarga e para uso apenas em poucos poços, criando nas imediações levantamentos de bombeamentos excessivos em algumas localidades. O problema pode ser evitado através do próprio assentamento abaixo do limite no bombeamento, o qual força o modelo a usar mais poços (Tung e Koltermann, 1985).

### **2.1.3 – Comentários**

Os modelos de simulação/otimização são amplamente empregados às águas subterrâneas em várias situações e para objetivos distintos que vão desde a busca da sustentabilidade do aquífero até a minimização de custos de extração. A sua grande aplicabilidade é fruto, principalmente, da necessidade de gestão devido ao acelerado aumento da demanda em todo o mundo. A técnica (s/o) leva em consideração os aspectos físicos envolvidos e ainda permite estimar quais as soluções “ótimas” previstas para um determinado objetivo, atendendo às restrições impostas pelo sistema em análise. Cuidados, porém, são necessários para a determinação da Função Objetivo e das restrições para garantir que a sustentabilidade do aquífero será preservada, ou seja, garantir que os limites físicos do aquífero sejam observados e preservados.

## **2.2 - Aspectos Legais da Água Subterrânea**

### **2.2.1 - Histórico das Águas Subterrâneas nas Legislações Brasileiras**

### ***Código de Águas (1934)***

- A água subterrânea é considerada bem imóvel, associado à propriedade da terra;
- Limita o direito de exploração sempre que houver interferência às águas superficiais que, desde então, eram de domínio público.

A água subterrânea encontra-se referenciada restritamente no Título IV. Eram consideradas como pertencentes ao solo e, em consequência disto, os proprietários das terras eram também proprietários da água subjacentes ao mesmo. A concessão administrativa era necessária apenas quando se tratava de terrenos de domínio público. As restrições existentes eram relacionadas apenas à poluição e às interferências com outros poços (como distanciamento mínimo entre poços ou diminuição de vazão dos poços vizinhos).

### ***Código de Águas Minerais ( Lei 7.841/1945)***

Este Código estabelece normas para o aproveitamento das águas caracterizadas como minerais. De acordo com Molinas e Vieira (1997), este Código é extremamente confuso quanto à definição de águas minerais e, segundo o citado autor, foi criado com o propósito de regular toda e qualquer exploração de águas subterrâneas que eram objeto de grande interesse comercial à época. São incluídas no Código as águas minerais ( aquelas que possuem características físicas ou químicas distintas das águas comuns e que possuem uma possível ação medicamentosa), as termais ( quaisquer temperaturas que ocorram na fonte), as gasosas ( quaisquer níveis de gases dissolvidos na fonte), as potáveis de mesa ( de acordo com as características de potabilidade na fonte) e as que são destinadas para fins balneários. Há, portanto, nesta lei regulamentação para as águas subterrâneas mesmo sendo estas, de acordo com o Código de Águas, de domínio privado quando se encontrem em terrenos particulares.

***Código de Mineração (Decreto –Lei 227/67; Regulamentado por Decreto 62.934/68)***

Em relação às águas subterrâneas e/ou minerais o Código institui (Molinas e Vieira, 1997):

- estabelece a competência da União na administração dos recursos minerais e a sistemática do regime de aproveitamento dos recursos minerais (Art. 1º e 2º);
- trata da abrangência do referido Código aos diversos aspectos da exploração mineral (Art. 3º);
- define jazida como sendo “*toda massa individualizada de substância mineral ou fóssil, aflorando à superfície ou existente no interior da terra, e que tenha valor econômico; e mina, a jazida em lavra, ainda que suspensa*” (Art. 4º);
- inclui as águas minerais e subterrâneas de forma diferenciada na classificação de jazida (Art. 5º);
- estabelece que as jazidas de águas subterrâneas e minerais serão regidas por lei especial (Art. 10º);
- dispõe sobre medidas reguladoras tendentes à preservação das águas subterrâneas, sendo exigida a apresentação do plano de aproveitamento para jazidas de águas minerais e a conservação e proteção das fontes de águas minerais (Art. 39º e 47º).

Molinas e Vieira (1997) consideram ainda que o avanço dado por este Código é efetivamente muito pequeno em matéria de normas estruturais e reguladoras das águas subterrâneas. De fato, o que ocorre é uma persistência na intenção de regulamentar em separado a exploração das chamadas “águas minerais” das águas subterrâneas. Esta tendência também prevalece na regulamentação do Código, no qual, estranhamente, as águas subterrâneas são excluídas da categoria de jazidas (Art. 7º), reaparecendo como susceptível de ser considerada jazida mais adiante no artigo 15º. Estes vários enfoques dados para a água subterrânea pelo Código de Águas Minerais e pelo Código de Mineração podem ter contribuído para a desconexão entre as águas superficiais e subterrâneas, pelo menos na perspectiva do tratamento jurídico-institucional.

### ***Constituição Federal (1988)***

A Constituição trouxe definições em relação às águas subterrâneas. Passaram a ser um bem público, de propriedade dos Estados e do Distrito Federal. Estas definições consolidaram um novo regime jurídico para todas as águas subterrâneas (incluindo as minerais), pois o texto distingue claramente as águas subterrâneas de recursos minerais do subsolo, sendo estes considerados bens da União.

O Artigo 20 da Constituição de 1988 diz que são bens da União: "Os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros Países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais."

No trabalho "Direito das Águas no Brasil - Atualização" Pompeu (2000) tratando do citado artigo coloca que: "essa redação, na primeira parte, ressaltado o acréscimo do vocábulo "rios", é semelhante às constantes das Constituições anteriores, em especial a de 1967 (Emenda nº1/69). A inclusão do vocábulo "rios" originou-se de duas Emendas apresentadas à Constituinte, com o objetivo de melhor clarear o texto, o que, *data venia*, não ocorreu".

Pompeu (2000) afirma ainda que são Emendas idênticas, com uma justificativa quanto ao seguinte fato: "No inciso II é recomendável, por prudência, fazer-se menção expressa aos rios, em que pese a referência genérica e abrangente 'quaisquer correntes de água'. Trata-se de conceito popularmente consagrado, e de todo conhecido, o que esparcaria qualquer dúvida ou interpretação restritiva. A referência a "quaisquer correntes de água" aplicar-se-ia a outros acidentes geográficos, naturais ou artificiais, tais como, ribeirões, riachos, igarapés, etc."(as aspas são dos autores)".

### ***Lei 9.433(1997)***

O objetivo maior desta Lei é assegurar que as águas superficiais e subterrâneas possam ser controladas e utilizadas de forma racional e dentro de parâmetros de qualidade desejáveis. Para isto, as águas passaram a ser, a partir de então, um bem público dotado de valor econômico, ou seja, um recurso hídrico. A Lei 9.433/97 incorpora em vários aspectos as águas subterrâneas porém, ainda existem pontos polêmicos ou, pelo menos, obscuros que merecem uma cuidadosa atenção para futuros esclarecimentos.

Há ainda alguns outros pontos que precisam ser melhor esclarecidos dentro do processo legal da água subterrânea, como por exemplo: 1) a existência de águas subterrâneas de domínio federal, como citados em alguns trabalhos (Estágio, 1997; Barth, 1999): *"No caso das águas subterrâneas, os aquíferos, entendidos como estruturas que retêm águas infiltradas, podem ter prolongamentos além das fronteiras estaduais, passando portanto, a ser de domínio público federal. Essas águas, assim podem ser federais ou estaduais, diferente do que se popularizou como titularidade dos Estados. A caracterização vai depender das direções dos fluxos subterrâneos e das áreas de recarga (alimentação) e se as obras para sua captação foram contratadas pelo poder público federal"*. O texto complementa esta afirmação com a caracterização dos tipos de recarga, como segue: *"Se for um aquífero livre a alimentação ocorre em toda a sua área de exposição. Caso seja confinado, há áreas restritas de alimentação que devem ser avaliadas para caracterização de seu domínio"*. Cid Tomanik Pompeu, citado por Barth (1999) enfatiza que esta interpretação é, no mínimo, polêmica pois, uma emenda proposta pelas associações técnicas especializadas em recursos hídricos, com o propósito de incluir entre os bens da União, as águas subterrâneas cujos depósitos estão subjacentes a mais de um Estado foi rejeitada pelo Relator da Constituição em 1988. 2) a gestão integrada dos recursos hídricos, em que o destaque é dado às águas superficiais, ou seja, deve-se associar a bacia hidrogeológica à bacia hidrográfica (adotada pela lei 9.433/97 como unidade de planejamento): *"Há duas posições diferenciadas de abordagem. Uma, de não haver inter relação entre as bacias; outra, da coincidência das bacias hidrográficas com os altos das*

*bacias hidrogeológicas. Os dois conceitos merecem cuidados nas generalizações que a lei das Águas Subterrâneas terá que aclarar" (Barth, 1999).*

Ressalta-se, porém, que apesar de efetivamente não haver uma rigorosa coincidência entre divisores de água superficial e subterrânea, o sistema de fluxos tende a configurar a compartimentação que é imposta pelo sistema de drenagem superficial (Rebouças, 1999).

### ***Projeto de Lei 1.616 (1999)***

Está em tramitação o Projeto de Lei (PL) que dispõe sobre a gestão administrativa e a organização institucional do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, previsto no inciso XIX do artigo 21 da Constituição e criado pela Lei 9.433. Em seu artigo quinto o PL estabelece que a outorga do direito de uso de águas subterrâneas, subjacentes a mais de um Estado, será disciplinada pelos Estados após avaliação das respectivas reservas exploráveis devendo os mesmos conceder outorgas dentro de limites por eles convencionados. Assim sendo, o fato de não haver águas subterrâneas de domínio federal, como colocado anteriormente, implicará no gerenciamento dos aquíferos por mais de um Estado, que deverão entrar em entendimento para implementação da outorga. Estudos técnicos - científicos serão imprescindíveis para viabilizar esta implementação pois, eles irão ser o sustentáculo do processo de gestão. Nas fronteiras com outros países, este entendimento torna-se ainda mais complexo e, deverão ser ainda mais complexos os processos de gestão deste aquíferos.

### ***Emenda Constitucional Nº 43 (2000)***

Existe uma proposta de Emenda Constitucional em tramitação no Senado Federal, de autoria do Senador Júlio Eduardo, na Comissão de Constituição, Justiça e Cidadania que modifica a redação dos artigos 20, III e 26, I, da Constituição Federal, com o objetivo de definir a titularidade das águas subterrâneas. A emenda propõe a seguinte redação para os citados artigos:

“Artigo 20. São bens da União:

inciso III – os lagos, rios e quaisquer correntes de águas, superficiais ou subterrâneas, inclusive os aquíferos, em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais;”

“Artigo 26. incluem-se entre os bens dos estados:

inciso I – as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, circunscrita em seu território, ressalvadas neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União.”

A justificativa apresentada pelo autor da Emenda referem-se às dúvidas remanescentes quanto à titularidade das águas subterrâneas em face do texto constitucional. A Constituição Federal de 1988 considera bens da União (Artigo 20) “*os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais*”. O autor da Emenda entende que, embora este artigo trate com bastante clareza a dominialidade das águas superficiais, não o fez da mesma forma em relação às águas subterrâneas. Com a alteração proposta para a redação pretende-se levar segurança jurídica e impor responsabilidade administrativa adequada ao gerenciamento dos recursos hídricos e à outorga de direitos relativos às águas subterrâneas.

Análises à redação original, e em vigor, da Constituição de 1998 foram realizadas por Pimenta e Reis (2001) e estão colocadas a seguir:

- 1) “a dominialidade sobre as águas é definida tendo como base o terreno em que estas estiverem localizadas. Concluindo-se, portanto, que as águas que se encontrem em

terrenos de domínio da União são, conseqüentemente, bens do seu domínio, independentemente de estarem no subsolo ou na superfície” (Art. 20).

- 2) “O critério adotado pelo constituinte para a definição dos bens dos Estados é o do inclusão e da exclusão, tanto no que se refere ao caput quanto aos incisos (Artigo 26) como pode ser notado na transcrição: Incluem-se entre os bens dos Estados: I- as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes ou emergentes e em depósito, ressalvadas neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União; II – as áreas, nas ilhas oceânicas e costeiras, que estiverem no seu domínio, excluídas aquelas sob domínio da União, (...); III- as ilhas fluviais e lacustres não pertencentes à União; IV- as terras devolutas não compreendidas entre as da União.”
- 3) Há, no caso do Artigo 26 (Bens dos Estados), o emprego dos termos águas superficiais e subterrâneas, que não é feito no Artigo 20 (Bens da União). “Porém, se o fato de não se encontrar a expressão *águas subterrâneas* no texto do Artigo 20 for suficiente para indicar a exclusão do domínio da União sobre essas águas, terá que se admitir, forçosamente, que a União também não tem domínio sobre as *águas superficiais*, uma vez que essa expressão não foi utilizada no citado artigo.”
- 4) “ A suposta exclusão do domínio da União sobre as águas subterrâneas carece de consistência lógica, técnica e, principalmente, de fundamento constitucional e legal, pois não está prevista nos dispositivos que tratam da matéria, nem tampouco no artigo 26. Ao contrário, o mandamento constitucional é estabelecido no sentido de que os recursos do subsolo, onde se encontram as águas subterrâneas, são bens da União (inc. IX do art. 20)”
- 5) “Sob hipótese alguma pode-se afirmar que as águas subterrâneas existentes no subsolo dos terrenos ou das áreas de domínio da União a esta não lhes pertençam, porque tal afirmação contraria frontalmente o disposto no art. 20 da Constituição de 1998.”

Com isto pode-se concluir que, apesar da água subterrânea não estar explicitamente citada no artigo 20, a mesma encontra-se inserida no contexto uma vez que se estenda, por analogia, a afirmação de que existe água subterrânea de domínio federal.

## **2.2.2 - Legislações Específicas para Água Subterrânea no Brasil**

As Legislações Específicas são os princípios normatizadores da gestão dos recursos hídricos subterrâneos. No Brasil o marco legal inicial da gestão das águas se deu no ano de 1934 com o Código de Águas, em que as águas superficiais e subterrâneas encontram-se amparadas pela mesma regulamentação e cujo teor, nos pontos que não são conflitantes com as atuais legislações, ainda vigora.

### ***Legislação Federal***

No ano de 1980 foi sugerida uma proposta de criação de uma Lei Federal de Águas Subterrâneas, que nesta época tinham domínio indefinido e sua gestão ficava entre o Código de Águas e o Código de Mineração. Esta proposta foi originada por um Grupo de Trabalho paulista, tendo como ponto de partida o Relatório da Comissão criada pela Portaria Interministerial 195, de 26/5/77, com a função de estudar e sugerir normas disciplinadoras para a perfuração de poços profundos e utilização de águas subterrâneas. O Projeto de Lei 7.127 foi criado e encaminhado ao poder executivo no ano de 1986. Após tramitar por mais de dez anos foi arquivado sob a argumentação de estar superado, em face do tempo decorrido de sua elaboração (Barth, 1998; Molinas e Vieira, 1997).

Com a promulgação da Constituição Federal em 1988, dando a dominialidade das águas subterrâneas aos Estados, existem opiniões conflitantes, no âmbito dos pesquisadores, a respeito da necessidade ou não da criação de uma lei nacional, ou até mesmo estadual, específica para água subterrânea principalmente após a criação da Lei 9.433/97. Essas opiniões baseiam-se especialmente em dois argumentos: 1) possibilidade de não prevalecer a gestão integrada dos recursos hídricos (já que a água superficial estaria “separada” da subterrânea, neste ponto de vista); 2) por considerar que a Lei 9.433/97 já contempla também as águas subterrâneas.

O artigo 22 da Constituição Federal de 1988 dá competência privada à União para legislar em alguns temas, entre os quais, estão inseridas as águas. Isto vem colocando em

dúvida a constitucionalidade das legislações estaduais específicas, já que não existe uma lei federal específica sobre o assunto. De acordo com Magalhães (1992) o fato de que “a União tem competência privativa de legislar sobre os recursos hídricos”, não implica em exclusividade: os Estados – Membros estão autorizados a legislar sobre questões específicas das matérias relacionadas no artigo 22 se uma Lei Complementar autorizar a delegação de competência da União para o estado, e desde que verse sobre regulação parcial, ou questões específicas das matérias referidas nos incisos.

O grande problema da Lei Complementar é que para a sua aprovação necessita-se de muito tempo pois, a maioria absoluta dos membros de cada uma das Casas do Congresso Nacional precisa ser favorável, ou seja, não é uma tarefa fácil. Portanto, aprovando-se uma Lei Complementar passando aos Estados a competência de legislar sobre as águas subterrâneas, cujo domínio já lhes pertencem (Constituição Federal, 1988), as leis estaduais específicas de água subterrânea tornam-se constitucionais.

De acordo com Barth (1999), fica evidenciado no Relatório da Comissão Interministerial de 1977, que falta no Código de Águas um título com orientações a respeito do estudo, avaliação, proteção e exploração das águas subterrâneas, dando as diretrizes aos Estados para a sua gestão. O autor propõe, portanto, uma Lei Federal Substantiva, não de gerenciamento deste recurso, que já foi contemplado na Lei 9.433/97 e pelas leis estaduais correspondentes a esta mas, com normas gerais sobre o aproveitamento, avaliações, controle, utilização racional, proteção e direitos e obrigações dos usuários. Estas normas podem também vir a ser estabelecidas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Para Rebouças (1998) o princípio usuário–pagador e a outorga já vem sendo implementado em alguns Estados da Federação, o que falta é proceder um amplo levantamento, sistematização e a disponibilização dos conhecimentos sobre as águas subterrâneas no âmbito dos usuários, administradores e dos “tomadores de decisão”.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos, através da Resolução nº 15 de 11 de janeiro de 2001, estabeleceu diretrizes para gestão das águas subterrâneas, considerando os

vários agentes (prefeituras, secretarias estaduais de recursos hídricos, etc.) que detêm competências que interferem na quantidade e qualidade da água subterrânea. Nesta resolução alguns aspectos foram abordados buscando-se preencher lacunas deixadas nas legislações anteriores. A seguir estão apresentadas as diretrizes para a implementação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos:

I- Nos Planos de Recursos Hídricos deverão constar, no mínimo, os dados e informações necessários ao gerenciamento integrado das águas, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 9.433/97.

II - O enquadramento dos corpos de água subterrânea em classes dar-se-á segundo as características hidrogeológicas dos aquíferos e os seus respectivos usos preponderantes, a serem especificamente definidos.

III - Nas outorgas de direito de uso de águas subterrâneas deverão ser considerados critérios que assegurem a gestão integrada das águas, visando evitar o comprometimento qualitativo e quantitativo dos aquíferos e dos corpos hídricos superficiais a eles interligados.

IV - A cobrança pelo uso dos recursos hídricos subterrâneos deverá obedecer a critérios estabelecidos em legislação específica.

V - Os Sistemas de Informações de Recursos Hídricos no âmbito federal, estadual e do Distrito Federal deverão conter, organizar e disponibilizar os dados e informações necessários ao gerenciamento integrado das águas.

No caso de aquíferos subjacentes a duas ou mais bacias hidrográficas, o SINGREH e os Sistemas de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos Estados ou do Distrito Federal deverão promover a uniformização de diretrizes e critérios para coleta dos dados e elaboração dos estudos hidrogeológicos necessários à identificação e caracterização da bacia hidrogeológica, conforme o artigo 4º da referida resolução, e os Comitês de Bacias

Hidrográficas envolvidos deverão buscar o intercâmbio e a sistematização dos dados gerados para a perfeita caracterização da bacia hidrogeológica.

Para os aquíferos transfronteiriços ou subjacentes a duas ou mais Unidades da Federação, cabe ao SINGREH promover a integração dos diversos órgãos dos governos federal, estaduais e do Distrito Federal, que têm competências no gerenciamento de águas subterrâneas. Em caso de conflitos, os mesmos serão resolvidos em primeira instância entre os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal e, em última instância, pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Nos aquíferos transfronteiriços a aplicação dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos dar-se-á em conformidade com as disposições constantes nos acordos celebrados entre a União e os países vizinhos.

Deverão ser propostos mecanismos de estímulo aos Municípios para a proteção das áreas de recarga dos aquíferos e a adoção de práticas de reuso e de recarga artificial com vistas ao aumento das disponibilidades hídricas e da qualidade da água. Cabe, portanto, ao SINGREH e aos Sistemas Estaduais de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal fomentar estudos para o desenvolvimento dos usos racionais e práticas de conservação dos recursos hídricos subterrâneos, assim como a proposição de normas para a fiscalização e controle das mesmas.

A Resolução N° 22 de 24 de maio de 2002, também do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, estabelece diretrizes complementares para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos de bacias hidrográficas, considerando que as informações e os dados básicos necessários à gestão sistêmica, integrada e participativa dos recursos hídricos são fornecidos pelos mesmos e elaborados por bacia, por Estado e para o País. Os aspectos da citada resolução que tangem a água subterrânea estão destacados a seguir:

- Visando a promoção do desenvolvimento sustentável, deve-se considerar os usos múltiplos das águas subterrâneas, peculiaridades da função do aquífero e os aspectos quantitativos e qualitativos relacionados ao mesmo;
- A preocupação com a gestão sistêmica, integrada e participativa das águas levou o CNRH a aprovar que deve constar nos planos a caracterização dos aquíferos e as inter-relações com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente; Tratando-se de aquíferos subjacentes a grupos de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas, cabe aos comitês estabelecer os critérios de elaboração, sistematização e aprovação dos respectivos planos, de forma articulada.
- As informações hidrogeológicas e os dados sobre as águas subterrâneas devem constar nos planos e incluir, no mínimo, por aquífero:

I – caracterização espacial;

II- cômputo das águas subterrâneas no balanço hídrico;

III- estimativas das recargas e descargas, tanto naturais quanto artificiais;

IV- estimativa das reservas permanentes.

### ***Legislações Estaduais***

Em 1988, mesmo ano em que foi promulgada a atual Constituição Federal porém alguns meses antes, o Estado de São Paulo sancionou a Lei 6.134/88 que dispõe sobre a conservação e a preservação dos recursos hídricos subterrâneos. Esta iniciativa se deu, principalmente, porque o Projeto de Lei 7.127/86 que tramitava há alguns anos pelo Congresso Nacional, continuava causando polêmicas onde se discutia se a água subterrânea era um recurso hídrico ou mineral. Seguindo a linha de pensamento de pesquisadores que acreditam não ser necessário a criação de leis específicas para a água subterrânea, há suposições de que a lei paulista específica, só foi criada por ser anterior à concepção da lei 9.433/97. O Estado de Pernambuco sancionou uma lei específica de água subterrânea em

17 de janeiro de 1997, apesar da situação continuar indefinida, por entender que sendo a água subterrânea um bem estadual cabe ao Estado dispor sobre a sua conservação e proteção. A lei paulista, que poderia ter sido reformulada e reforçada, apenas em sua regulamentação considerou a nova disposição constitucional.

As leis específicas criadas para água subterrânea pelos Estados de São Paulo e Pernambuco, (6.134/88 e 11.427/97, respectivamente) foram impulsionadas pelas peculiaridades que diferem a água subterrânea da água superficial. Seus principais objetivos foram administrar o uso e prevenir situações como a depleção, superexploração e conflitos entre usuários. Deve-se ressaltar a importância desta iniciativa pois, devido às condições naturais de localização deste recurso hídrico, as dificuldades encontradas para recuperar um aquífero em termos de qualidade e de quantidade de água é muito grande e em alguns casos torna-se impraticável.

De acordo com o Plano Nacional as leis estaduais específicas também adotaram os instrumentos de outorga e cobrança para gerir o uso das águas subterrâneas. Segundo Serôa da Motta (1998) a unicidade da outorga permite uma melhor definição e garantia de direitos de uso da água e a cobrança almeja a racionalização do uso.

Há também uma Minuta de Anteprojeto de Lei de Águas Subterrâneas sugerida pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS datada de setembro de 1997 e oferecida aos Estados e ao Distrito Federal, contendo disposições que poderiam constar em suas leis sobre administração, proteção e conservação das respectivas águas subterrâneas, respeitadas as peculiaridades de cada um, sua localização geográfica e eventuais normas em vigor.

### **2.2.3 – Considerações Sobre os Aspectos Legais da Água Subterrânea no Brasil**

Com base na análise da legislação vigente, considera-se que uma lei nacional específica para a água subterrânea seria recomendável especialmente com a finalidade de

facilitar os trâmites necessários para tornar constitucional as leis estaduais específicas. O teor desta lei seria voltado para os aspectos ainda não abordados, ou pouco aprofundados, nas legislações atuais em vigor sobre o assunto.

Em relação à dominialidade da água subterrânea, pode-se perceber a discordância de opiniões dos juristas sobre o assunto. Por um lado, conforme mencionado anteriormente, pode-se dizer que a afirmação da existência de água subterrânea de domínio federal “é uma interpretação, no mínimo, polêmica pois, uma emenda proposta pelas associações técnicas especializadas em recursos hídricos, com o propósito de incluir entre os bens da União, as águas subterrâneas cujos depósitos estão subjacentes a mais de um Estado foi rejeitada pelo Relator da Constituição em 1988”. Por outro, afirma-se, contundentemente, que “sob hipótese alguma pode-se afirmar que as águas subterrâneas existentes no subsolo dos terrenos ou das áreas de domínio da União a esta não lhes pertençam, porque tal afirmação contraria frontalmente o disposto no art. 20 da Constituição de 1998.”

Ressalta-se, então, a importância de uma Emenda Constitucional que venha a esclarecer definitivamente esta questão, no intuito de proporcionar uma tramitação fluente dos processos decisórios baseados nas legislações vigentes, visto que os instrumentos de gestão tais como outorga e cobrança começam a ser implementados em todo o país.

## **2.3 - Outorga e Cobrança: Instrumentos de Gestão Aplicados à Água Subterrânea**

### **2.3.1 - Considerações iniciais**

Os instrumentos de outorga e cobrança são ferramentas instituídas nas políticas de recursos hídricos, nacional e estaduais, cujos propósitos principais são a racionalização e a multiplicidade de usos da água. A aplicação destas ferramentas em algumas localidades, do Brasil e do mundo, na ótica da água subterrânea são apresentados e indicam que a carência de estudos hidrogeológicos que auxiliem a implementação destas ferramentas aliada à

dificuldade de fiscalização, são os maiores obstáculos enfrentados atualmente pelos órgãos gestores no Brasil.

### **2.3.2 - Outorga**

As atividades dos órgãos gestores são muitas e de suma importância, como administrar os múltiplos agentes utilizadores da água, conhecer a dinâmica muito distinta dos aquíferos, posicionar-se em relação aos conflitos existentes entre usuários e com a proteção ambiental e, principalmente, programar investimentos a médio e longo prazo para disponibilizar os recursos necessários de forma sustentada.

O órgão gestor dos recursos hídricos necessita ter um conhecimento a respeito do comportamento hidrogeológico dos aquíferos e um banco de dados, com o cadastro de todos os poços existentes, abandonados ou em funcionamento, para viabilizar a outorga. Um suporte administrativo também é de fundamental importância devido ao caráter fiscalizador que o órgão também irá assumir.

#### **2.3.2.1 - Procedimento Geral para Solicitação da Outorga**

O usuário que pretende solicitar a outorga para a construção de um poço, deverá fornecer todos os dados referentes ao mesmo, como localização, aquífero explorado, profundidade, vazão, análise físico-química e bacteriológica, possíveis interferências com poços vizinhos, empresa perfuradora, etc. Estas informações são necessárias para análise do pedido pelo órgão gestor, ao qual caberá deferir ou não, após averiguar as condições da solicitação no âmbito da qualidade e da quantidade da água solicitada. O órgão gestor poderá solicitar alguma outra informação que julgar necessária para o encaminhamento da análise do pleito. Em alguns casos, já está previsto o período de tempo em que o Órgão deverá responder à solicitação, sendo dado um prazo médio de sessenta dias contados a

partir do pedido ou do fornecimento da última informação que eventualmente tenha sido pedida.

Para o Estado de Pernambuco está previsto um tipo de outorga denominada Outorga Prévia (Silva e Monteiro, 1998), através da qual é possível assegurar uma reserva de direito de uso ao potencial usuário sem, no entanto, conferir-lhe o direito de uso. O objetivo desta outorga é garantir ao pretense usuário uma outorga futura para que o mesmo possa realizar planejamentos como estruturação, projeto e implantação de empreendimento que utilize recursos hídricos.

### **2.3.2.2- Cadastro dos Usuários**

O cadastro é, normalmente, obrigatório para todas as captações. As captações antigas terão um prazo para realizarem o seu cadastro que em alguns estados fica em torno de 180 dias contados a partir da regulamentação da lei que institui o planejamento de uso dos recursos hídricos e, as novas deverão ser cadastradas dentro de um prazo médio de trinta dias.

De acordo com a Lei de Pernambuco os usuários isentos também deverão se cadastrar junto ao Órgão Gestor pois, estão sujeitos à fiscalização inclusive para mediação de conflitos. Segundo Silva e Monteiro (1998) a outorga no Estado é considerada recente e, sendo assim, a maioria dos usuários de recursos hídricos ainda não estão cadastrados nem possuem outorga de direito de uso da água. Existe ainda uma expectativa de que as solicitações de outorga de águas subterrâneas, principalmente na Região Metropolitana do Recife - RMR, sejam intensificadas superando inclusive as outorgas pelos recursos superficiais. Esta afirmação está embasada no atuante sistema de fiscalização que vem sendo adotada em colaboração com a Companhia Pernambucana de Meio Ambiente - CPRH na Região. Como a RMR apresenta problemas de rebaixamento de aquífero o instrumento de outorga é de extrema importância para o gerenciamento.

A participação dos usuários no processo de gestão dos recursos hídricos é fundamental para o seu bom encaminhamento. Um importante passo neste sentido foi colocar à disposição de toda a comunidade, através do órgão responsável, os dados das captações cadastradas e os estudos existentes, hidrogeológicos e hidrológicos. Um outro exemplo, que vem sendo adotado no Estado de São Paulo, é facilitar o cadastramento das captações feitas pelos usuários, permitindo que o cadastro também possa ser realizado na Diretoria da Bacia Hidrográfica em que a captação está localizada, podendo os mesmos optar por aquele órgão que lhe for mais conveniente.

### **2.3.2.3 - Fiscalização**

Uma das principais dificuldades atuais dos órgãos responsáveis pela outorga é a fiscalização, já que o número de pessoas que os compõem é em geral muito pequeno e a dificuldade orçamentária é muito grande. Em algumas situações, há disponibilidade de apenas um automóvel e não mais que cinco funcionários para executar a fiscalização em cidades com população superior aos 3 milhões de habitantes.

Com uma infra-estrutura tão deficiente, a fiscalização é, no mínimo, difícil de ser executada. O que vem sendo feito na prática, considerando esta situação, é uma busca aleatória pelas ruas, até encontrar um local onde esteja sendo perfurado um poço, o que não é muito difícil de observar, devido à altura dos equipamentos necessários para se realizar a perfuração. Neste caso, os fiscais vão verificar a legalidade daquela perfuração e caso não se disponha de licença para a execução, medidas cabíveis são tomadas, de acordo com o que preconiza a lei, iniciando assim um processo que acaba forçando as empresas perfuradoras a registrar não só aquele poço, mas também todos os demais para evitar reincidência e, conseqüentemente, maiores penalizações. Essa decisão da empresa perfuradora é para evitar constantes multas (no caso de perfurações atuais principalmente) e também visando um melhor desempenho daqueles poços sob sua responsabilidade e manutenção.

No caso de poços perfurados manualmente a dificuldade é ainda maior por não ser tão visível a execução da obra. Sendo assim, a denúncia por parte de pessoas conhecedoras do fato e que, de alguma forma, sintam-se ou temam ser prejudicadas, é praticamente a única maneira de detectar.

Quando se fala que apenas pessoas diretamente envolvidas com o problema vão se manifestar, quer se ressaltar mais um problema enfrentado pelos órgãos gestores, que é a falta de conhecimento da população dos problemas decorrentes do excesso ou do mau uso dos aquíferos. Problemas esses que estão muitas vezes em seu dia a dia mas, por desconhecimento, não conseguem perceber uma possível relação entre os fatos.

Apesar do trabalho estar sendo realizado, de maneira até criativa, pode-se perceber a precariedade e a dificuldade que os órgãos gestores passam atualmente para obter o mínimo de informações necessárias para a gestão e o planejamento dos aquíferos, que trata-se do cadastro dos poços com todas os seus componentes quantitativos e qualitativos, para que as políticas de gestão dos recursos hídricos possam ser implementadas com eficiência.

### **2.3.3 - Cobrança**

A cobrança pelo uso da água, segundo a Lei 9.433/97 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, tem como objetivos: a) reconhecer a água como bem econômico e dar ao usuário uma indicação do seu real valor; b) incentivar a racionalização do uso da água e; c) obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos.

Segundo Silva e Monteiro (1998) a cobrança pelo uso da água não é um imposto mas, uma compensação à sociedade pelo uso de um bem público sendo assim, os recursos gerados de sua cobrança devem ser empregados na própria bacia.

Estão previstas cobranças de uso da água através do princípio usuário - pagador para os casos de captação e lançamentos, uma vez que tanto a escassez quanto a poluição

umentam o custo da água consumida. A utilização dos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos, objeto de licenciamento ambiental e outorga pelo poder público, será cobrada segundo as peculiaridades das bacias hidrográficas levando-se em consideração, para a captação, a disponibilidade hídrica local, a vazão captada e seu regime de variação, o consumo efetivo e a finalidade a que se destina.

A cobrança pelo uso da água, prevista na legislação brasileira, ainda não está amplamente implementada no Brasil. Segundo Leal (1997) estudos estão sendo elaborados com o objetivo de estabelecer valores de taxas a serem cobradas em alguns estados, como Bahia e São Paulo. O Ceará iniciou a cobrança com muitos critérios e iniciativas estaduais e federais necessitando ainda ser discutido com o propósito de compatibilização de metas. Esta cobrança está sendo realizada pela COGERH (órgão responsável pela gestão dos recursos hídricos no estado) para usos industrial e urbano, com valores respectivos de R\$0,60 e R\$0,01 por m<sup>3</sup>, há ainda uma pretensão futura para iniciar a cobrança sobre irrigação com valores de 0,005 R\$/m<sup>3</sup>. Apesar de circularem algumas afirmações de que a cobrança no Estado do Ceará refere-se ao uso da água bruta isto não procede. Segundo Lanna (2000) esta cobrança refere-se a recuperação de custos investidos ou a geração de recursos para a manutenção e, talvez, novos investimentos públicos em infraestrutura hídrica, uma vez que toda a água produzida naquele Estado é decorrente de investimentos públicos em açudes.

Apesar do Brasil já ter iniciado estudos sobre a cobrança pelo uso da água em algumas das suas bacias, mesmo antes da aprovação da 9.433/97, estes estudos estão concentrados na cobrança da água superficial (Ribeiro e Lanna, 1997). A primeira bacia a implantar a cobrança pelo uso da água será a do rio Paraíba do Sul, que abrange os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. O novo sistema levará o setor privado e as prefeituras a pagar pela utilização de recursos naturais. A medida atingirá cerca de 7.000 indústrias em 180 cidades dos estados envolvidos. A taxa estipulada é de R\$0,02 por m<sup>3</sup> de água captada e devolvida suja, e de R\$0,008 por m<sup>3</sup> de água devolvida limpa. Os recursos arrecadados, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente, serão aplicados na recuperação da bacia, em programas de reflorestamento de matas ciliares, na proteção de

nascentes, na recuperação de áreas degradadas e no tratamento de esgoto e do lixo (fonte: Ministério do Meio Ambiente em 18 de março de 2002).

**2.3.4 - Outorga e Cobrança em Alguns Países** (Baseado em Barraqué, 1995 e Serôa da Motta, 1998).

### *Alemanha*

Os recursos hídricos são globalmente suficientes e as regiões em dificuldade são aquelas em que a água subterrânea é explorada em excesso. Em Berlim a recarga do lençol é a metade das captações realizadas no mesmo e, em Hessen o aquífero é historicamente sobreexplorado percebendo-se, durante a histórica seca entre os anos de 1971 e 1976, que as autorizações de captação chegaram a atingir 80 a 90% da capacidade de recarga.

As águas, inclusive a subterrânea, só são apropriáveis no limite de um uso que não lese os vizinhos ou os outros habitantes. Todos os usos da água necessitam de uma licença ou da aquisição de direito permanente que se tornaram os instrumentos mais importantes da gestão da água. A outorga de licenças ou de direitos é obrigatória e uma licença pode ser temporária ou permanente podendo ser retirada em qualquer altura, se a proteção dos recursos o justificar. Um direito adquirido não pode normalmente ser retirado e as autoridades competentes também devem ter em conta os direitos e interesses dos outros usuários do mesmo recurso e o interesse geral. A outorga de direito adquirido é limitada a usos cujo efeito sobre os recursos seja perfeitamente conhecido e que não seriam satisfeitos com uma simples licença.

Na maioria dos estados existe uma cobrança para retirada de água de corpos hídricos, além da taxa de esgoto. No Estado de Hessen, por exemplo, a cobrança pela retirada de água subterrânea para abastecimento público é de US\$ 0,30/m<sup>3</sup>, para abastecimento industrial US\$ 0,50/m<sup>3</sup> e para uso em refrigeração US\$ 0,70/m<sup>3</sup>. Essa taxa estadual é aplicada em projetos de conservação e recuperação de ecossistemas.

De acordo com Freire et al. (1999) “a experiência do Estado alemão de Baden-Wurttemberg é um dos exemplos de cobrança pelo uso da água subterrânea. Lá se cobra pela retirada da água das fontes superficial e subterrânea desde 1987 (Smith, 1995). A cobrança é baseada no volume retirado, no tipo de fonte e no uso final da água, de acordo com a Tabela 2.1. Nota-se o alto valor atribuído para o caso do manancial ser subterrâneo em comparação ao superficial”.

Tabela 2.1- Valores cobrados pela retirada de água bruta em Baden-Wurttemberg - Alemanha (adaptado de Smith, 1995).

<b>Manancial Hídrico</b>	<b>Usos</b>	<b>Preço (US\$/mil m<sup>3</sup>)</b>
<b>Água Subterrânea</b>	Todos	60
Água Superficial	Irrigação	6
	Abastecimento público	60
	Outros fins	24

### ***Bolívia***

De acordo com Bustamante (1999) a lei em vigor no país atualmente data de 1906 e já foi parcialmente modificada em vários aspectos causando muita confusão para a solução de conflitos pois, não está muito claro para os usuários e legisladores quais as disposições da antiga lei que ainda vigoram e quais sofreram modificações. Uma nova *Ley de Aguas* encontra-se em processo de formação neste país.

Segundo a Constituição Política do Estado - C. P. E. o solo e subsolo com todas as suas riquezas naturais, as águas lacustres, fluviais e medicinais, bem como os elementos e forças físicas susceptíveis do aproveitamento são de domínio originário do Estado (Art. 136 C.P.E.) A *Ley del Medio Ambiente* que igualmente a Constituição é marco para qualquer

legislação sobre as águas estabelece que as águas em todos os seus estados são de domínio originário do Estado (Art. 36 *Ley del Medio Ambiente*).

Existem disposições em diferentes leis para a concessão de outorga para consumo humano, para a geração de energia, para piscicultura e para irrigação, as prioridades de uso estão determinadas na *Ley de Aguas* de 1906 (Art. 204) de acordo com a seguinte ordem:

- Abastecimento de populações
- Abastecimento de ferrovias;
- Irrigação;
- Canais de navegação;
- Moinhos e outras fábricas, navegação;
- Reservatórios de água para viveiros e criadores de peixe.

Por ser muito antiga, a lei ainda considera como uso prioritário o abastecimento de ferrovias justificado apenas pelo uso de trem a vapor provavelmente utilizado na época.

### ***Chile***

O Código da Água chileno de 1951, permitia ao Estado outorgar concessões a particulares conforme prioridades de uso da água, podendo-se fazer transferências de usuários desde que o uso permanesse o mesmo. A água passou a ser propriedade do Estado no ano de 1969, durante a reforma agrária, e as comercializações das concessões foram proibidas. No ano de 1981 foi instituído o novo Código de Águas e os direitos permanentes sobre a água foi reintroduzido.

A Lei 1.122 de 1981, do Ministério da Justiça, abandonou os critérios técnicos do Código de Águas de 1969 e se fundamentou na teoria econômica do livre mercado, partindo da premissa de que a eficiência melhoraria se a água assumisse um valor real.

Em virtude deste direito, os particulares podem usar e dispor juridicamente das águas com total liberdade, podendo o titular usá-las para qualquer destino, sem precisar

justificar uso futuro ou mesmo manter o uso para o qual obteve o direito, possibilitando assim livres trocas do uso da água. A única limitação provém de que a quantidade de água extraída deve respeitar a condição do direito de uso.

Pela atual legislação chilena, nenhuma pessoa pode aproveitar águas sem que tenha solicitado previamente à autoridade competente uma concessão de direito de aproveitamento, e o direito é de domínio de seu titular. Também não há preferências de nenhum uso sobre outro.

### ***Colômbia***

A cobrança para qualquer tipo de uso da água é legalmente admitida na Colômbia desde 1942 embora, tenha sido implementada com muitas restrições e com valores bastante baixos a partir de 1974. As pouquíssimas cobranças aplicadas foram implementadas buscando cobrir os custos de operação dos sistemas de monitoramento. Nos poucos casos em que se conseguiu superar as dificuldades, relata-se que as aplicações bem sucedidas das cobranças induziram mudanças nos padrões de uso da água, com reduções no consumo e na poluição.

A experiência colombiana revela a dificuldade de operar um sistema de cobrança utilizando preços ótimos, principalmente num cenário de fragilidade institucional em que falta projeto adequado de instrumento, carência de informação sobre os impactos e incompatibilidade com o sistema de monitoramento disponível.

### ***Costa Rica***

Fernández (1999) baseado na *Ley de Aguas* de 1942 da Costa Rica afirma que as águas neste país são de domínio público, propriedade nacional, porém existem águas consideradas privadas que são as águas de chuva que caem em propriedade particular e que podem ser aproveitadas por meio de obras que as armazenem. As águas subterrâneas pertencem ao proprietário do terreno em que se encontra perfurado o poço.

Para o uso da água são exigidas concessões, excetuando-se as águas potáveis destinadas ao abastecimento de populações inclusive os proprietários de terras podem perfurar poços dentro da mesma para uso doméstico e necessidades ordinárias mesmo que cause interferência em poços vizinhos (deve-se apenas manter uma distância mínima entre poços de 2 metros, em zonas urbanas, e 15 metros, em zonas rurais). As águas subterrâneas com outras finalidades de uso necessitam de outorga.

O tempo máximo de concessão é de 30 anos podendo ser considerada caduca aquela concessão não utilizada por três anos consecutivos ou ainda que mantenha um uso diferente daquele para o qual houve concessão da outorga durante um período de três a cinco anos. O Estado, que concede outorga através do *Servicio Nacional de Eletricidad*, não assume responsabilidade pela falta ou diminuição da água objeto de concessão.

Os usos prioritários para a concessão de outorgas são (Art. 27):

- Aquedutos para populações com controle do *Ministerio de Salubridad Pública*;
- Abastecimento populacional, serviços domésticos, água para animais, leiterias e banhos;
- Ferrovias e meios de transporte ;
- Desenvolvimento de forças hidráulicas ou hidroelétricas para serviços públicos.

É provável que em 1942 quando foi aprovada a lei, pretendia-se priorizar o abastecimento das populações principais em que o *Ministerio de Salubridad Pública* era encarregado, no entanto, em muitas outras populações os governos locais ou as comunidades se organizavam para construir aquedutos e abastecer suas comunidades, sendo este o motivo da distinção nos dois primeiros itens. É interessante observar que a ferrovia encontra-se, como na Bolívia, prestigiada em termos de prioridade de uso estando inclusive anterior à geração de energia.

As tarifas diferem de acordo com o uso e com a origem do recurso, ou seja, se é captada superficialmente ou subterraneamente.

### ***Estados Unidos***

Existe, na experiência americana, uma política econômica bem estabelecida de precificação da água para a agricultura, comandada de forma centralizada pelo governo federal através do *Bureau of Reclamation (BOR)* o qual desenvolve projetos de provisão de água. O uso de água para irrigação é priorizado pelo BOR, mesmo quando se trata de projetos de múltiplos usos. A comercialização destes direitos de uso (outorga) é possível porém, limitado por inúmeras restrições, além do que os fazendeiros temem perder seus direitos e serem penalizados com uma redução da outorga no ano seguinte, por exemplo.

### ***França***

O sistema de cobrança, segundo Ribeiro e Lanna (1997), foi adotado na França em 1964 e o valor cobrado é estabelecido pelo Conselho de Administração da Agência de Água, baseando-se para isto, nos investimentos que estão previstos nos planos de bacia. A cobrança para os usuários domésticos e industriais considera três elementos básicos, seriam o *volume de água derivado* durante o período de estiagem, o *uso consuntivo* (o produto do valor anterior por um fator de consumo) e o *local da captação*. No caso do usuário agrícola, a cobrança tem como base o volume de água captado durante a estação de estiagem. Valores de cobrança para duas bacias francesas estão apresentadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2- Valores cobrados por captação de água bruta em bacias francesas (Alvarez, 1997 citado por Ribeiro e Lanna 1997)

Bacia/Manancial	Água Subterrânea		Água Superficial	
	Parcela 1 - Captação (US\$/mil m <sup>3</sup> )	Parcela 2 - uso consuntivo (US\$/mil m <sup>3</sup> )	Parcela 1 - Captação (US\$/mil m <sup>3</sup> )	Parcela 2 - uso consuntivo (US\$/mil m <sup>3</sup> )
Bacia Artois-Picardie	18	----	1,6	36
Bacia Seine-Normandie	16	26	0,5	26

A experiência da França demonstrou que, enquanto não obteve-se um consenso relativo, a instituição da cobrança não foi viável. Nas regiões em que a situação era considerada mais crítica, a cobrança foi aceita com naturalidade. As regiões que conseguiram recursos financeiros para tentar reverter a situação de escassez mais rapidamente, serviram de exemplo para as demais que procuraram também adotar a cobrança ( Thame, 2000).

#### **Holanda** (baseado em Mostert,1999)

A Holanda é um país muito industrializado, são indústrias químicas, petroquímicas e de alimentos. A agricultura é intensiva, sendo o país um dos maiores exportadores de alimentos do mundo. 27% das regiões encontram-se abaixo do nível do mar e são realizadas drenagens artificiais por meio de uma rede de canais e bombas. Os recursos hídricos são geralmente suficientes porém, em toda parte os níveis de água subterrânea vêm baixando devido às melhorias da drenagem local e ao aumento das abstrações subterrâneas.

O sistema de gestão da água no país pode ser resumido em três pontos básicos: 1) um grande número de organizações de gestão de água; 2) um relativamente alto nível de descentralização e; 3) preferência pelo uso de ferramentas comunicativas de consenso tais como consultas, recomendações, planejamentos e acordos voluntários. As províncias, em total de doze, são as responsáveis pela gestão operacional da quantidade e qualidade da água subterrânea. A estrutura legal para extração de água subterrânea, de água superficial e para abastecimento diferem completamente um lote.

O principal documento para a retirada de água subterrânea é o *Ground Water Act*. De forma geral, grandes abstrações requerem uma permissão, abstrações consideradas médias requerem registro, e pequenas abstrações não necessitam nem de registro nem de permissão. Permissões são emitidas pelas províncias, mas eles são inclinados a delegar esta tarefa para as *waterboards*, já que elas já são responsáveis pela gestão da água superficial

no aspecto quantitativo e em muitos aquíferos da Holanda o nível destes dependem diretamente do nível da água superficial. As províncias também determinam os valores limites entre as abstrações que necessitam de registro e as que necessitam de permissão. Consequentemente, valores limites diferem de província para província.

Captações de água subterrânea são, em algumas partes da Holanda, um assunto difícil, visto que provoca um efeito negativo na natureza (*desiccation*). Captações agrícolas são em muitos casos totalmente livres, devido ao seu pequeno tamanho, porém, juntos, eles constituem um grande volume. Além disso, captações agrícolas estão crescendo, devido ao aumento de custos do abastecimento de água pela companhia de abastecimento pública.

**Índia** (baseado em Kolvalli e Chicoine, 1989)

Vendas de água por fazendeiros proprietários de poços no país, podem vir ocorrendo desde o início da existência dos mesmos porém, os primeiros registros das vendas aparecem em estudos de irrigação datados de 1960.

O mercado de água subterrânea tem emergido onde os proprietários de poços tem excesso de água e existe uma alta demanda. Ele tem aumentado o retorno nos investimentos de água subterrânea e induzido os investimentos em mecanismos para reduzir as perdas com o transporte. As vendas de água privadas superam o problema da indivisibilidade dos investimentos em água subterrânea e têm provido os não proprietários de poços do acesso a mesma.

Este mercado de água na Índia é caracterizado por *Shah* (citado por Kolvalli e Chicoine, 1989) como sendo imperfeitamente competitivo, com preços determinados pelo custo marginal de extração e pela elasticidade da demanda. Os preços foram encontrados maiores onde o valor marginal da eletricidade fosse maior e as fontes alternativas de água fossem pouco desenvolvidas.

Embora os proprietários de poços estejam em uma posição de monopólio potencial, os preços são influenciados pelo fato de que a água tem sido vendida nas vizinhanças do poço. O valor da água é determinado pelos custos, localização do monopólio e tradição local. Preços para água de poços são maiores que o preço pago pelos irrigantes para receber água de origens alternativas, como sistemas de canais de irrigação, as quais são tipicamente subsidiadas. A disposição de comprar água por um maior preço, muitas vezes alternativas mais baratas estão disponíveis, pode ser atribuída, em parte, a maior confiança que o consumidor tem no abastecimento através de poços privados que através dos canais.

Uma opção de política de gerenciamento seria, segundo o autor, empréstimos para subsidiar pequenos fazendeiros. Em muitos casos, de acordo com as evidências, casos de investimentos privados em água subterrânea seriam competitivas apenas se alguma água é negociada em um mercado de água subterrânea.

### ***México***

Ao iniciar a cobrança pelo uso da água no México, metade dos recursos arrecadados eram provenientes da captação e a outra metade dos lançamentos (de quem polui a água). Com o passar dos anos a proporção foi mudando pois, os valores cobrados para captação diminuíram e os de quem poluía aumentaram. Atualmente quase 90% dos recursos arrecadados são originados de quem polui e 10% de quem capta (Thame, 2000).

### **Outorga e Cobrança em Alguns Estados Brasileiros**

No Brasil a implementação da cobrança pelo uso da água está dificultada pois o debate não tem sido participativo entre as partes envolvidas (Serôa da Motta et al, 1996). Segundo Ribeiro e Lanna (1997) existem alguns estudos sobre a cobrança concentrados na água superficial que apenas fornecem uma ordem de grandeza dos valores a serem adotados, estando estes na mesma ordem de grandeza dos atualmente praticados no exterior. A água subterrânea no exterior possui preços mais altos que as águas superficiais,

isto é explicado por se considerar que a mesma possui melhor qualidade e deve, portanto, ser reservada para usos mais nobres.

Quanto à outorga da água subterrânea, o processo está em andamento, em alguns Estados através de órgãos a eles vinculados, de forma ainda precária pelo caráter incipiente do processo.

### ***Bahia***

As informações aqui constantes foram fornecidas pelos responsáveis pela emissão de outorgas, da Superintendência dos Recursos Hídricos – SRH, órgão a quem compete a gestão dos recursos hídricos do Estado.

De acordo com o Decreto 6.296/97 serão dispensados de outorga no Estado, os usos que se destinarem às primeiras necessidades de vida ou, as derivações de águas que forem feitas de pequenos reservatórios, cisternas, poços rasos, cravados ou do tipo Amazonas, desde que tenha uma vazão máxima de 0,5 L/s. No aspecto prático, é exigido um teste de bombeamento mínimo de doze horas para os poços em rochas cristalinas, calcárias e sedimentares. Em rochas sedimentares, como na Formação Sebastião no Pólo Petroquímico Camaçari, onde existe uma bateria de poços (muitos deles em operação), utilizou-se como critério para a outorga o teste de vazão escalonado que fornece o ponto crítico do poço, sendo este o limite máximo outorgável.

Não existe nenhum estudo hidrogeológico que oriente as emissões de outorga, são utilizadas apenas medidas locais de vazão. Um estudo integrado das águas subterrâneas e superficiais na Bacia do Rio das Fêmeas – BA está previsto com o objetivo de identificar as características hidrogeológicas dos aquíferos da bacia, determinar os parâmetros hidrodinâmicos para a utilização de modelos de simulação, estudar a relação existente entre as águas superficiais e subterrâneas e definir critérios para outorga das águas subterrâneas

na bacia. No entanto, até que sejam realizados os estudos as outorgas vêm sendo emitidas de acordo com os critérios anteriormente citados.

O tempo de outorga é de quatro anos, prorrogáveis por mais dois períodos iguais, para o caso de autorização e, para a concessão, são trinta anos. A fiscalização é feita no primeiro ano após a outorga e, quando não é encontrado o sistema implantado, cancela-se a outorga. Os usuários antigos devem se cadastrar e aqueles que não o fazem, são notificados pelos fiscais que suspendem temporariamente o uso para que o proprietário solicite a outorga na SRH/BA.

### ***Pernambuco***

O Estado de Pernambuco, através da SECTMA, emitiu 134 pareceres de viabilidade de exploração, no período de julho a dezembro de 1998, dos quais foram posteriormente outorgados 98 poços novos para uso da água subterrânea, na maior parte concentrados na Região Metropolitana do Recife. Os usuários domésticos, rurais ou urbanos, são isentos de cobrança pelo uso da água subterrânea de acordo com a Lei Estadual No. 11427/97.

### ***Minas Gerais***

Em Minas Gerais, segundo Schwartzman (1999), a solicitação da outorga para exploração da água subterrânea é feita junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM e os procedimentos diferem para os casos de poço a ser perfurado e aquele poço que já se encontra perfurado. No primeiro caso, o requerente deverá solicitar a perfuração do poço informando os seus dados cadastrais, coordenadas geográficas do ponto de captação, bacias hidrográficas estadual e federal onde se localiza a captação e a vazão (em m<sup>3</sup>/h) a ser solicitada. O IGAM, através do seu Diretor Geral autoriza os trabalhos de perfuração considerando se a mesma está sendo realizada em área permitida ou não e, condiciona a concessão da outorga ao envio dos dados do poço perfurado (perfil geológico do terreno, níveis estáticos e dinâmicos, dados sobre a qualidade da água, revestimentos, filtros, etc)

para análise e, possivelmente, emissão da outorga. Este processo final com dados referentes ao poço é solicitado também para outorga dos poços já perfurados anteriormente.

O critério para emissão de outorgas vigente atualmente é a análise feita por consultores do IGAM, baseando-se nas informações prestadas pelos requerentes e na quantidade de outorgas concedidas que pode ser visualizada através do banco de dados georeferenciado. Existem alguns estudos hidrogeológicos dos aquíferos (por exemplo o da Hidrosistemas/COPASA em 1995) mas, estes não são utilizados para decisão na concessão das outorgas. Algumas áreas como a Bacia do Rio Verde Grande, a Bacia do Rio Uberabinha, e a Bacia do Riachão, as outorgas para exploração da água subterrânea estão provisoriamente suspensas devido à escassez de água. Eventuais áreas de conflito também surgiram e estão sendo analisadas separadamente.

A medida adotada para o cadastro dos poços já existentes é a chamada, através de correspondências, de usuários como Prefeituras e Serviços Autônomos de Águas (SAE, DAE, etc) para que regularizem as captações existentes já que não existe uma fiscalização sistemática nem para recursos superficiais nem subterrâneos, atuam a partir de denúncias realizadas pela população e para as quais o IGAM envia uma equipe para dirimir as questões.

### ***São Paulo***

O DAEE emite para o Estado de São Paulo as outorgas dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos para todas as finalidades de uso crescentes a cada ano. O Cadastro Específico do DAEE/SP confirma a grande procura por água subterrânea que existe naquele Estado, chegando a categoria poços a alcançar quase a metade do número de registros do cadastro específico (Fig. 2.1) (Fonte: DAEE, 1999).

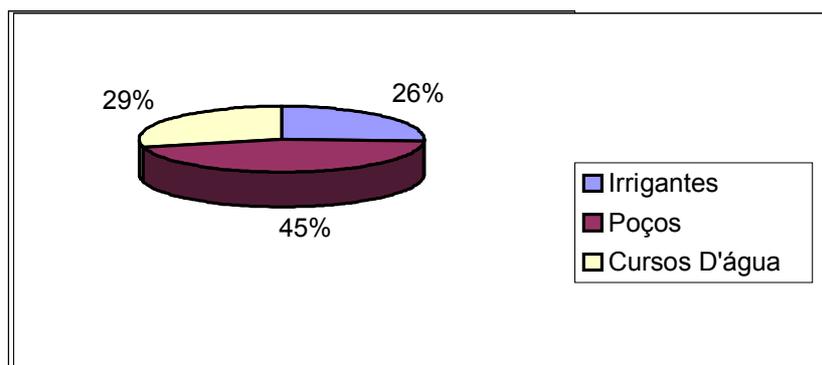


Figura 2.1 – Cadastro específico de usuários do DAEE/SP

## 2.4– Considerações Finais

Os primeiros centros a introduzir cobrança nos anos 60 foram França, Inglaterra e País de Gales. A Polônia seguiu nos anos 70 e os Países Baixos em 1983. Na Alemanha, o estado de Baden – Wuerttemberg introduziu uma cobrança de retirada de água subterrânea (conhecida como “Wasserpennig”) em 1988, e depois 11 dos 16 estados alemães seguiram por volta de 1993 ( Kraemer, 1999). Em muitos casos, essas cobranças foram motivadas pela necessidade de gerar renda, e não apenas por desejar reduzir a retirada da água subterrânea. A principal razão para a introdução da “Wasserpennig” em Baden-Wuerttemberg, por exemplo, foi para aumentar a renda para pagar fazendeiros para reduzir o uso de pesticidas e assim proteger a qualidade da água. Isto tem sido criticado como sendo inconsistente com o princípio poluidor pagador na política ambiental.

Cobranças por água subterrânea também existem em parte dos EUA. Enquanto em revisão da OECD em 1987 mencionou apenas um caso de cobrança de água subterrânea nos EUA, na Bacia de Delaware no nordeste úmido do país (OECD, 1987 apud Schiffler, 1998), eles também coletam em partes de Texas e do Arizona, embora elas sejam aparentemente fixas em um nível muito baixo (Cory et al. 1992; Al – Hmoud e Jonish, 1995 apud Schiffler, 1998).

Em 1977 na Índia foi introduzido o “*Water Cess Act*”, que criou uma cobrança para retirada de água conhecida como “*water cess*”. O nível da cobrança depende de como o

efluente está poluído, fazendo em parte uma cobrança de efluente. A cobrança para a qual a *Water Cess Act* origina é muito baixa, e a principal proposta da lei é criar renda para o *State Pollution Control Boards* (SPCBs) nos estados federais (GTZ 1995, apud Schiffler, 1998). Não está claro se a *water cess* é apenas para indústrias ou usos agrícolas e urbanos também.

Apenas mais um caso de cobrança por retirada de água subterrânea é conhecido, segundo Schiffler (1998). É outro país em desenvolvimento, Jordânia, limitada à indústria, usos agrícolas e domésticos são inicialmente isentos. Outros centros em desenvolvimento, tal como Namíbia, estão planejando introduzir uma cobrança por extração de água subterrânea.

Outros países além desses mencionados podem também cobrar água subterrânea mas, apenas estes referidos foram encontrados disponíveis nas revisões. Esta pequena evidência sugere, surpreendentemente, que cobranças por água subterrânea tem tendência a ser introduzida em países úmidos, por exemplo, Alemanha, Inglaterra e Polônia, onde a depleção de água é um fenômeno sazonal e local. A cobrança é paga principalmente por usuários urbanos e industriais, para os quais eles representam apenas uma pequena proporção do custo total. Isto parece ser introduzido não apenas para limite sazonal e depleção de água subterrânea local mas, também como desejo de gerar renda e responder à crescente pressão do público para proteger o ambiente. Embora a depleção seja mais séria em países onde a água é escassa, poucos deles parecem ter introduzido cobranças, e então a um baixo nível. Se tais cobranças fossem introduzidas em um nível significativo, eles representariam uma proporção substancial dos custos para o principal uso da água, agricultura irrigada, dando a comparativamente baixa produtividade na agricultura.

A tabela 2.3 mostra o nível de cobrança em diferentes países. Apesar da agricultura irrigada ser um dos principais consumidores de água, em muitos casos é isenta da cobrança (como na Jordânia) ou as cobranças são muito baixas (como no Arizona). As maiores cobranças são encontradas na Alemanha.

Tabela 2.3 - Nível de cobrança de água subterrânea em diferentes países (fonte: adaptado de Schiffler, 1998)

<b>País</b>	<b>Menor nível (US cents/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Maior nível (US cents/m<sup>3</sup>)</b>
Baden-Wuerttemberg (Alemanha)	0	6
Berlim	18	18
Hesse	0	60
Países Baixos	<1	3
Jordânia	0	15
Arizona (USA)	0.24	0.24

### **3 – METODOLOGIA**

*“Um modelo não é igual à realidade, mas suficientemente similar para que as conclusões obtidas através da sua análise e/ou operação, possam ser estendidas à realidade” (Goldbarg e Luna,2000) .*

#### **3.1 - Introdução**

Os modelos de simulação bem como a otimização vem sendo largamente utilizados, individualmente ou em conjunto, nas mais diversas situações e atividades. Os modelos de simulação permitem que se faça inferências sobre um sistema baseando-se nos resultados obtidos com sua aplicação e têm como principal vantagem a utilização de parâmetros físicos que caracterizam e interferem diretamente no processo. A otimização, por sua vez, permite a obtenção de valores “ótimos” de funções, que podem ser máximos ou mínimos, e que podem ter ou não restrições associadas a ela.

A associação da simulação com a otimização tem o propósito de se obter resultados “ótimos” sem deixar, no entanto, de considerar as características físicas do sistema a ser estudado. Os instrumentos matemáticos necessários para a aplicação do modelo simulação/otimização à água subterrânea, proposto neste trabalho, são apresentados a seguir.

#### **3.2 - Modelo de Simulação**

A necessidade de outorga da água subterrânea, devido ao alto grau de escassez, está pressionando os órgãos gestores dos recursos hídricos a ampliarem o conhecimento hidrogeológico dos aquíferos com vistas a sua melhor gestão. A procura de ferramentas que auxiliem este processo é grande, especialmente nas regiões em que já se verifica a sobre-exploração dos aquíferos e, quando estes estão localizados em regiões costeiras, quando há o risco de uma intrusão salina.

Um modelo de simulação de aquíferos é usado para determinar o comportamento atual ou o provável comportamento futuro do aquífero sobre determinadas condições. Eles facilitam o entendimento, considerando os aspectos históricos, e são usados para prever condições futuras. O impacto de planos alternativos de gestão pode ser testado através dos modelos de simulação, permitindo ao planejador escolher a opção que mais se aproxime do desejado ou ainda aquela que cause menos impactos negativos.

Um dos modelos de simulação mais utilizados atualmente para esta finalidade é o MODFLOW (A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, McDonald & Harbaugh, 1988).

O modelo MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) foi desenvolvido pela United States Geological Survey (U.S.G.S.) e trata-se de um aplicativo largamente usado pelos profissionais que atuam na modelagem do fluxo de água subterrânea. Simula o fluxo tridimensional em meios porosos por aproximação por diferenças finitas, atribuindo a variável no centro do bloco. O modelo pode considerar simulações em aquíferos confinados, não confinados, ou uma combinação de confinados e não confinados. O modelo simula o fluxo através da solução da equação diferencial parcial em condições estacionárias ou transientes em meio anisotrópico e heterogêneo.

O modelo consiste de um programa principal mais pacotes ou módulos. Os pacotes são grupos de subrotinas independentes que têm a função de tratar especificamente cada condição de contorno (rio, dreno, recarga, etc.), dando, portanto, grande flexibilidade ao aplicativo. Os algoritmos de simulação disponíveis incluem dois tipos de técnicas de iteração, o *Strongly Implicit Procedure (SIP)* e o método *Slice-Successive Overrelaxation (SSOR)*.

A estrutura modular permite uma base lógica para organizar o código atual com elementos de programas, ou funções similares, posteriormente necessários para melhorar a capacidade do aplicativo. Além disso, simplifica a entrada de dados para a simulação. Os dados são lidos por uma subrotina dentro dos pacotes, permitindo assim que, para

problemas simples, onde são usados apenas poucos pacotes, a entrada de dados torne-se mais simples (Domenico & Schwartz, 1997).

No MODFLOW a equação geral do fluxo subterrâneo é dada conforme apresentada abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

Onde:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  são valores de condutividade hidráulica nas coordenadas x, y e z ( $Lt^{-1}$ );

h é a carga potenciométrica (L);

W é o fluxo volumétrico ( $t^{-1}$ );

$S_s$  é o armazenamento específico do material poroso ( $L^{-1}$ );

t é o tempo (t).

Esta equação descreve o fluxo de água subterrânea sob condições de não equilíbrio, contanto que os eixos de condutividade hidráulica estejam alinhados com as direções das coordenadas.

A resolução da equação diferencial acima (equação 3.1) é feita pelo MODFLOW, através do método das diferenças finitas, que é um dos métodos numéricos mais conhecidos. Este método envolve o processo de discretização, que substitui o problema físico contínuo, com um número infinito de incógnitas, por um problema discreto com um número finito de incógnitas. A região estudada é aproximada por uma malha uniformemente espaçada de nós. Em cada nó, cada derivada da expressão matemática do problema é aproximada por uma expressão algébrica com relação aos nós adjacentes.

O desenvolvimento da equação do fluxo de diferenças finitas segue a aplicação da equação da continuidade: a soma de todos os fluxos que entram e saem da célula deve ser igual à taxa de armazenamento dentro da mesma. Assumindo que a densidade de água

subterrânea é constante, a equação da continuidade expressando o balanço de fluxo para uma célula é dada por:

$$\sum Q_i = SS(\Delta h/\Delta t) \Delta V \quad (3.2)$$

onde:

$Q_i$  é a taxa de fluxo dentro da célula;

SS foi introduzido como uma notação para indicar o armazenamento na formulação de diferenças finitas; sua definição é equivalente àquela de  $S_s$  na equação 1, i. e., o volume de água que pode ser injetado por unidade de volume do aquífero por unidade de mudança da carga ( $L^{-1}$ );

$\Delta V$  é o volume da célula ( $L^3$ );

$\Delta h$  é a mudança na carga sobre um intervalo de duração  $\Delta t$ .

O modelo utiliza métodos iterativos para obter a solução para o sistema de equações em cada intervalo de tempo. Nesses métodos o cálculo do valor da carga para o fim de um dado intervalo de tempo é iniciado assumindo arbitrariamente um valor tentado, ou estimado, para uma carga de cada nó no fim daquele período. Um procedimento de cálculo é então iniciado o qual altera este valor estimado, produzindo um novo grupo de valores de carga os quais estão em acordo com o sistema de equações. Os novos valores de carga tomam então o lugar das cargas inicialmente assumidas, e o procedimento indicado é repetido, produzindo um terceiro grupo de valores. Esse procedimento é repetido sucessivamente, em cada estágio produzindo um novo grupo de valores de carga. Cada repetição deste cálculo é chamado de “iteração”. O ideal seria especificar em qual iteração parar quando o cálculo da carga se aproxime da solução exata. Entretanto, devido ao desconhecimento da solução, um método indireto é especificado como critério de parada. O método mais comumente empregado é especificar quais as alterações na carga calculada ocorridas de um nível de iteração para a próxima deve ser menor que uma certa quantidade, sendo este o critério de fechamento ou de convergência, o qual é especificado pelo usuário. Após cada iteração, valores absolutos de cargas calculados em cada iteração são examinados para todos os nós na malha. O maior destes valores de carga absoluta é

comparado com o critério de fechamento. Se o maior valor excede o critério de parada, a iteração continua, caso seja menor a iteração é salva e o processo termina para aquele período de tempo. Normalmente, este método de determinar quando a iteração para é adequado. Como indicação, é interessante usar um valor de critério de parada que tenha uma magnitude menor que aquele nível de precisão desejada na carga resultante.

O programa descreve também um número máximo permissível de iterações para cada período de tempo. Se o critério de parada não é atingido dentro do número máximo de iterações, o processo iterativo para e uma mensagem correspondente é apresentada.

No MODFLOW as células podem ser agrupadas em categorias de carga constante ou inativas. As células de carga constante são aquelas para as quais não há variação no valor da carga ao longo da simulação. As inativas ou de fluxo zero são aquelas para as quais dentro ou fora delas não é permitido fluxo, em nenhum período da simulação. As células restantes da malha, cargas variáveis, são caracterizadas por cargas que podem variar ao longo do período de simulação. As células de carga constante e de fluxo zero são utilizadas no modelo para a determinação das condições de contorno do problema.

Em relação ao gasto de memória computacional e ao tempo de execução, o programa é altamente eficiente graças a sua estrutura modular. Esta característica do programa viabiliza a inclusão de novos módulos sem causar conflito com as opções preexistentes. O esquema de discretização temporal é implícito, sendo que o tempo de simulação pode ser dividido em períodos de estímulos, nos quais as condições impostas são mantidas constantes (tal como uma determinada taxa de recarga ou de bombeamento). Cada período de estímulo pode ser também subdividido em intervalos menores, de acordo com as necessidades da simulação (Cota, 2000).

### 3.3 - Modelo de Otimização

O princípio da otimização é encontrar a melhor solução ( ou solução ótima) de um grupo de soluções. A chave da otimização é a formulação do problema que é descrito por variáveis de decisão, uma função objetivo e algumas funções de restrição.

As variáveis de decisão são usadas para representar resoluções que necessitam ser tomadas. A função objetivo descreve o objetivo, econômico ou outro qualquer, desejado para as variáveis de decisão e as funções de restrição descrevem as condições físicas ou lógicas que as variáveis de decisão devem obedecer. A estrutura destas variáveis e funções freqüentemente determinam a melhor aproximação para a resolução do problema. O tipo de otimização a ser empregada vai depender do tipo de problema que se tenha . Se todas as variáveis de decisão são reais e a função objetivo e restrições são lineares, a programação linear é, normalmente, a melhor solução (ILOG, 1997).

Em termos matemáticos, o objetivo da otimização é encontrar os valores de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , que satisfaçam a equação

$$\text{Min ou Max } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.3)$$

sujeita às restrições:

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \quad (3.4)$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_2 \quad (3.5)$$

.

.

.

$$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m \quad (3.6)$$

onde a função  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  é a função objetivo;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis de decisão e;

$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i$  são restrições .

As variáveis que serão utilizadas na representação e o nível apropriado de agregação destas variáveis devem ser determinados ainda na fase de formulação do modelo de otimização. As restrições do problema, quantitativas ou as de natureza lógica, também devem ser representadas nesta mesma fase. O modelo deverá ser adequado à natureza dos dados de entrada e de saída, bem como ser capaz de expressar as funções de desempenho (função objetivo) que possivelmente serão exigidas no processo de otimização (Goldbarg e Luna, 2000).

As funções objetivo estabelecem formas de valoração dos resultados do processo decisório representado. Sendo este, portanto, o motivo pelo qual elas encontram-se presentes na formulação do sistema unicamente quando decisões são incorporadas e avaliadas (Lanna, 1997).

Existem muitos métodos para resolver este problema. Quando se tratar de problemas simples, funções gráficas podem levar a soluções, ou métodos de cálculo como os multiplicadores de Lagrange podem ajudar. Entretanto, para problemas maiores, são necessárias técnicas de soluções diferentes, cada uma com estrutura especial de acordo com a função objetivo e com as restrições. A Programação Linear (PL) e a Programação Não Linear (PNL) são as ferramentas de otimização mais populares em planejamento de recursos hídricos, outras técnicas especiais (como *Branch - and - Bound*, por exemplo) são também usados em problemas de áreas específicas (Goodman, 1984; Cirilo, 1997).

### **3.3.1 - Programação Linear**

Os métodos de pesquisas mais utilizados em indústria e negócios são, provavelmente, a PL e suas ramificações. A sua aplicação é também ampla em certas áreas de planejamento de recursos hídricos (estudos agrícolas, por exemplo). Eles são satisfatórios para problemas em que se deseja alocar recursos escassos entre várias atividades de uma maneira ótima.

A PL é caracterizada pela linearidade de todas as suas funções, como mostrado a seguir, onde se deseja otimizar (minimizar ou maximizar) a função objetivo:

$$Z_x = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (3.7)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \text{ (ou } \geq b_1, \text{ ou } = b_1) \quad (3.8)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \text{ (ou } \geq b_2, \text{ ou } = b_2) \quad (3.9)$$

.

.

.

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \text{ (ou } \geq b_m, \text{ ou } = b_m) \quad (3.10)$$

### 3.3.2 - Programação Não Linear

A PNL é a técnica matemática que freqüentemente é utilizada para resolver uma seqüência de decisões interrelacionadas onde a não linearidade está presente na função objetivo ou nas restrições.

Um problema de PNL pode ser descrito em uma forma padrão como (Cirilo, 1997):

$$\text{Min ou Max } f(x) \quad (3.11)$$

Sujeito a

$$g_i(X) < 0; \quad i=1, 2, \dots, m_1 \quad (3.12)$$

$$h_k(X) = 0; \quad k=1, 2, \dots, m_2 \quad (3.13)$$

$$X^L \leq X \leq X^U \quad (3.14)$$

Onde:  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  é um vetor contendo  $n$  variáveis denominadas variáveis de decisão, cujos valores ótimos se busca determinar;  $f(X)$  é chamada de função objetivo, cujo valor pretende-se minimizar ou maximizar; e as expressões (3.12), (3.13) e (3.14) representam as limitações ao domínio do problema:  $g_i(X) < 0$  (ou  $> 0$ ),  $h_k(X) = 0$  são denominadas restrições de desigualdade e de igualdade, e  $X^L$  e  $X^U$  são também fronteiras do domínio para o problema. A região do espaço limitada pelas restrições é denominada região viável ou factível.

### 3.4 – Equações Básicas

#### 3.4.1 - Equação Geral do Fluxo Subterrâneo

A equação que representa o escoamento no aquífero pode ser escrita como (Cirilo e Cabral, 1989)

$$\text{div}(K \text{ grad } h) + R_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.15)$$

onde  $K$  é a condutividade hidráulica, normalmente expressa em m/s, cm/s e depende das características do meio poroso e das propriedades do fluido (Nutting, 1930 apud Cirilo e Cabral, 1989);  $R_v$  é a taxa de recarga por unidade de volume ( caso trate-se de extração, o valor numérico de  $R_v$  será negativo);  $h$  é a carga hidráulica;  $S_s$  é o armazenamento específico definido como o volume de água recebido pelo aquífero por unidade de volume e por unidade de aumento da carga hidráulica (Huyakorn, 1983 apud Cirilo e Cabral, 1989).

Admitindo-se que os eixos cartesianos utilizados em determinado problema coincidem com as direções principais do tensor da condutividade hidráulica, os elementos não pertencentes à diagonal principal serão nulos, ficando portanto:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.16)$$

Chama-se a atenção para o fato de que a unidade de armazenamento específico é o inverso da unidade de comprimento e a unidade de recarga  $R_v$  é o inverso do tempo.

O valor de  $R_v$  é positivo se a água é adicionada ao aquífero e negativo quando é retirada. Este termo também é usado para recarga distribuída ou concentrada. A recarga é função da localização (coordenadas espaciais) e do tempo.

### 3.4.2 – Modelo Horizontal ou Modelo Regional

#### 3.4.2.1- Aquíferos confinados

O aquífero confinado caracteriza-se por ter as suas camadas acima e abaixo impermeáveis, com condições de contorno nestas duas faces de fluxo nulo.

Considerando que os aquíferos são praticamente horizontais e as variações de espessura são desprezíveis a análise pode ser feita apenas no plano do aquífero (Cirilo e Cabral, 1989). Isto significa que a carga hidráulica é independente de  $z$ , ou seja,  $h=h(x,y,t)$ .

Chamando a espessura do aquífero de  $b$  e integrando a equação geral do fluxo ao longo do eixo vertical, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( bK_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( bK_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R_v b = S_s b \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.17)$$

Chamando  $R_v b$  de  $R$  (recarga no modelo bidimensional), aplicando as definições de transmissividade ( $T=Kb$ ) e armazenamento ( $S=S_s b$ ) e considerando a transmissividade constante, tem-se:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{R}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.18)$$

#### 3.4.2.2 – Aquífero Livre ou Não Confinado

O aquífero livre é caracterizado por não possuir camada limitante superior impermeável. Admite-se, para simplificação do cálculo, que existe uma interface de separação entre a zona saturada e uma região acima, considerada completamente seca. Aplicando-se a condição de Dupuit (Cabral,1997) considera-se a carga ao longo de uma linha vertical como constante e o fluxo horizontal.

Considerando que ao longo da superfície livre atua a pressão atmosférica,  $h$  pode ser admitido como a espessura do aquífero. Aplicando-se as mesmas considerações feitas para as equações anteriores teremos, portanto:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.19)$$

Neste caso a equação (3.19) é não linear. Adotando-se, porém, a condutividade hidráulica como constante, pode ser aplicada a seguinte relação:

$$h \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial (h^2)}{\partial x} \quad (3.20)$$

Substituindo a relação (3.20) na equação (3.19), obtém-se:

$$\frac{\partial (h^2)}{\partial x^2} + \frac{\partial (h^2)}{\partial y^2} + \frac{2R}{K} = \frac{2S}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.21)$$

Adotando-se uma nova variável,  $\nu = h^2$ , vem:

$$\frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \nu}{\partial y^2} + \frac{2R}{K} = \frac{S}{K\sqrt{\nu}} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.22)$$

A condição de linearidade pode ser aplicada aos aquíferos livres, caso assumam-se algumas condições tais como:

- a) Iterações sucessivas: muitas vezes, resolvendo-se o problema por iterações sucessivas, pode-se linearizar a equação utilizando o valor de  $\sqrt{v}$  da iteração anterior;
- b) Fluxo permanente: neste caso o termo do lado direito da igualdade na equação (3.21) não existe e a equação é linear em  $v$ .

### 3.5 - Princípio da Superposição nos Aquíferos

A rigor, o princípio da superposição é válido apenas para aquíferos confinados, em que o valor da transmissividade não muda com o rebaixamento. Em algum ponto de um aquífero confinado, o rebaixamento total é a soma dos rebaixamentos individuais para cada poço. Isto porque a equação de Laplace é linear, a superposição de efeitos de rebaixamento é determinada por simples adição (Fetter, 1980).

Em superfícies freáticas (*water table*), se o rebaixamento é significativo em relação à espessura saturada total, o uso de superposição linear resultaria em um prognóstico de rebaixamento composto que é menor que o rebaixamento composto real. Como um decréscimo em espessura saturada reduz a transmissividade, o sistema de múltiplos poços resultaria em um gradiente hidráulico composto maior que aquele de um sistema confinado equivalente em ordem para compensar um valor reduzido de transmissividade do aquífero (Fetter, 1980).

No entanto, a aproximação de aquíferos não confinados para aquíferos confinados, para efeito de superposição, de acordo com Jacob (1950) citado por Freeze e Cherry (1979), leva à previsão de rebaixamentos que são muito próximos do correto tanto quanto o rebaixamento é pequeno em comparação com a espessura saturada. O método em efeito baseia-se na condição de Dupuit (Cirilo e Cabral, 1989) e falha quando o gradiente hidráulico vertical é significativo.

### 3.6 – Modelo de Gestão de Água Subterrânea

Dois modelos de simulação/otimização são propostos neste trabalho considerando os princípios básicos fundamentais reputados neste capítulo. Para o seu desenvolvimento serão utilizados na simulação do fluxo subterrâneo o MODFLOW, conforme visto anteriormente, e para os processos de otimização foram empregados o *software* LINDO - Linear, Interactive, and Discrete Optimization (Gama, 1998) e o ambiente MATLAB.

A idealização de um sistema linear na otimização permitirá a adoção do princípio da superposição de efeitos na otimização, o qual viabilizará a composição do modelo simulação/otimização (s/o) proposto na metodologia, permitindo assim a obtenção de valores “ótimos” de extração de água para vários cenários de solicitação de outorga, bem como indicativos de referência para a aplicação da cobrança.

A metodologia proposta está fundamentada nos problemas de extração de água subterrânea em todo o mundo. A utilização de modelagem matemática para a determinação da extração “ótima” de água de um aquífero, levando em consideração a hidrogeologia local, através do uso do modelo de simulação do fluxo associado com a otimização, dá condições de que extrações sejam executadas sem, contudo, desconsiderar a sua sustentabilidade. Esta ferramenta permite a investigação das possíveis interferências causadas pela retirada de água no aquífero, além de restringir retiradas que coloquem em risco a sua sustentabilidade.

A elaboração de modelos acoplados de simulação e otimização, proposta neste trabalho, objetiva apresentar ferramentas que possibilitem a obtenção da melhor forma de utilização da água subterrânea por meio de bombeamento nos poços. Para isto leva-se em conta além dos aspectos físicos do sistema, as restrições que limitam extrapolações para campos indesejados que possam prejudicar o aquífero como, por exemplo, a superexploração.

Estas ferramentas poderão ser empregadas pelos gestores das águas subterrâneas quando da emissão de outorgas para o direito de uso, já que terão condições de avaliar as

solicitações de retirada destas águas sobre o aspecto de quais as localidades que permitem uma maior ou menor retirada ou ainda qual o menor custo de energia. A posição do órgão gestor deverá ser direcionada para que haja uma maior eficiência do uso da água no aquífero. O modelo que busca apenas a maximização das retiradas pode vir a ser utilizado a curto prazo quando o aquífero ainda não apresenta sérios problemas mas apenas cuidados iniciais de sustentabilidade enquanto o que busca a minimização dos custos seria empregado a médio ou longo prazo quando as preocupações com os custos venham a ser preponderantes.

O uso desregulado da água subterrânea pode implicar em vários problemas como a sua escassez e o influxo de água salina nos poços próximos ao litoral. Um outro problema, não menos importante, é o rebaixamento do lençol freático que obriga aos usuários uma maior perfuração aumentando cada vez mais os custos tanto para os usuários atuais quanto para os que ainda pretendem se instalar, uma vez que terão que bombear de profundidades cada vez maiores.

O desenvolvimento do modelo tem como base o princípio da superposição de efeitos, que terá como principal função a conexão entre os modelos de simulação e de otimização.

### **3.6.1- Simulação**

Uma área pré-definida a ser modelada (ou o aquífero a ser estudado) é subdividida em células, para que seja empregado o método das diferenças finitas que é o mesmo utilizado pelo MODFLOW, modelo de simulação aplicado neste trabalho. Os poços de bombeamento são inseridos, e um valor de bombeamento é adotado (um único valor para todas as células com poços), sendo este denominado de valor unitário de bombeamento. Este valor unitário de bombeamento deverá ser de uma ordem de grandeza tal que seja capaz de refletir o rebaixamento causado em cada célula, devido aos estímulos provocados pelos bombeamentos nos poços. É importante ressaltar este fato já que os valores dos rebaixamentos são, de forma geral, muito pequenos. Os rebaixamentos unitários são,

portanto, obtidos pela divisão entre o rebaixamento total e a taxa de bombeamento utilizada.

Estes bombeamentos unitários irão provocar rebaixamentos nas células que serão denominados de rebaixamentos unitários. A figura 3.1 apresenta uma pequena área que pode ser interpretada como um aquífero hipotético dividido em células, contendo um poço em cada uma delas, para efeito de exemplificação da metodologia empregada.

<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>
<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
...	...	<b>PN</b>

Figura 3.1- Malha do aquífero hipotético

Onde  $P1, P2, \dots, PN$  representam os poços em cada célula da malha do aquífero. Provocando um estímulo,  $Q1$ , no poço  $P1$ , tem-se, em consequência disto, reflexos deste estímulo (ou bombeamento) no próprio poço e nos outros poços da malha, que serão verificados em magnitudes que irão depender da magnitude do estímulo e da distância em que se está observando o reflexo.

Estes reflexos, chamados de rebaixamentos unitários por serem provenientes dos bombeamentos unitários, serão representados por  $\delta_{ij}$  (figura 3.2) onde o índice  $i$  representa o poço em que está se observando o reflexo (ou rebaixamento) e  $j$  representa o poço que está sendo bombeado e que, por consequência disto, está provocando o rebaixamento no poço  $i$  (Rodriguez-Castro, 1995; Caicedo, 1999). Os rebaixamentos unitários para cada célula, relativos aos bombeamentos unitários de todos os poços, aplicados uma a cada vez, serão obtidos através do modelo MODFLOW.

Assim, considerando regime permanente e linear, para a otimização, temos que o rebaixamento total em um determinado poço  $i$  pode ser calculado por:

$$RT_i = Q1*\delta_{i,1} + Q2*\delta_{i,2} + Q3*\delta_{i,3} + \dots + QN*\delta_{i,n} \quad (3.23)$$

Onde  $RT_i$  é o rebaixamento total no poço  $i$ , que será obtido pelo somatório do produto dos bombeamentos nos poços  $(1, 2, \dots, N)$  pelos seus respectivos rebaixamentos unitários provocados no poço  $i$ .

A partir do resultado da simulação executada em uma área definida, os rebaixamentos unitários causados pelos bombeamentos provocados nas células, tidos como bombeamentos unitários, serão inseridos nas restrições do modelo de otimização de forma que o mesmo seja um fator limitante para a obtenção do bombeamento ótimo no aquífero.

Para efeito de sustentabilidade e operacionalidade do poço, o valor de  $RT$  para cada poço não deverá ultrapassar uma altura que poderá ser limitada por diversos fatores como, por exemplo, reserva de água para conservação da bomba (Rodríguez, 1995). Neste trabalho, optou-se por se conservar, inicialmente, 20% da carga hidráulica inicial ( $h_0$ ) para esta finalidade. Posteriormente outros testes foram feitos conservando-se 40% e 60% da carga inicial do poço. Para um dado poço  $i$  devemos ter, portanto:

$$RT \leq h_f \quad (3.24)$$

Onde  $h_f$  é denominada de altura fixa e é igual a  $0,8 h_0$  (inicialmente).

Entre os outros fatores limitantes estão a recarga do aquífero, as demandas já existentes, que devem ser atendidas preferencialmente, e a quantidade de água solicitada por usuários futuros. O fluxograma do modelo s/o é apresentado na figura 3.3.

### **3.6.2 – Otimização**

Dois problemas de otimização foram simulados. O primeiro baseia-se na maximização das retiradas de água do aquífero e o segundo na minimização da energia total gasta para extração da água.

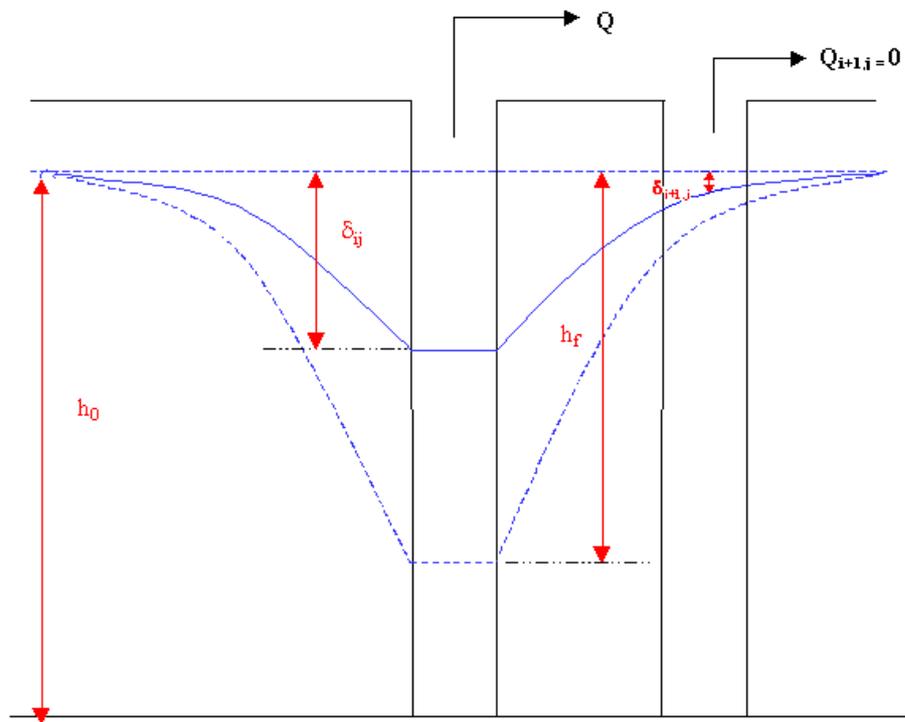


Figura 3.2- Representação das cargas hidráulicas e rebaixamentos em um poço  $P_i$  com uma taxa de bombeamento  $Q_i$  e o reflexo deste bombeamento em um poço vizinho ( $P_{i+1}$ ).

### 3.6.2.1- Maximização das Retiradas

O primeiro problema de otimização formulado pode ser aplicado pelo órgão gestor a curto prazo o seu objetivo é maximizar as retiradas do aquífero e, para isto, a maximização das retiradas totais é colocada como a função objetivo:

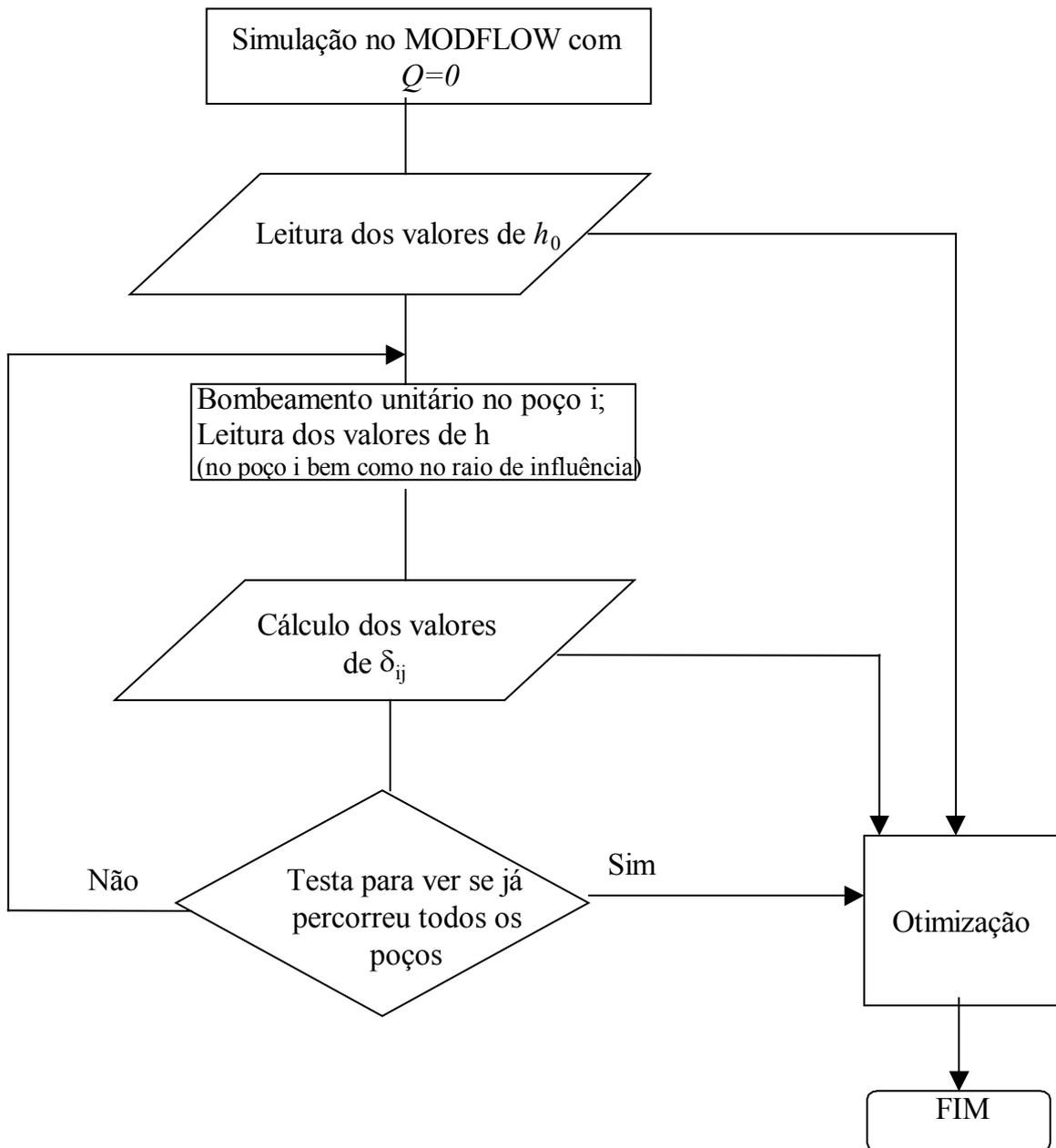


Figura 3.3- Fluxograma do modelo s/o

$$Z = \text{Max} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (3.25)$$

Além da restrição da não-negatividade dos bombeamentos, quatro restrições foram elaboradas considerando os fatores limitantes das retiradas de água do aquífero. A primeira restrição considera as demandas solicitadas, pelo usuário, ao órgão gestor (aplicada para os casos de usuários futuros). Esta restrição tem a finalidade de não dar a outorga com uma vazão superior àquela desejada pelo usuário (limite superior).

$$Q_i \leq T_i \quad (3.26)$$

Onde:  $Q_i$  é a vazão a ser otimizada no poço  $i$ ;

$T_i$  é a demanda solicitada pelo usuário.

A segunda restrição considera as demandas já existentes. Esta restrição tem o objetivo de não diminuir as outorgas que já foram concedidas na região. Neste caso pode-se também expressar em termos de igualdade, ao invés de menor ou igual. Assim, estaríamos deixando as retiradas já existentes com um valor fixo (igual àquele já existente). Trata-se, portanto, de um limite inferior.

$$Q_i \geq X_i \quad (3.27)$$

Onde:  $X_i$  é a outorga atual no poço  $i$ .

As retiradas totais na região não devem exceder a recarga no aquífero. A terceira restrição considera esta limitação devido à alimentação do aquífero, preservando assim a sua sustentabilidade.

$$\sum Q_i \leq R \quad (3.28)$$

onde:  $R$  é a recarga na região em que o poço está localizado.

A quarta e última restrição leva em conta os rebaixamentos nos poços provocados pelas retiradas que serão efetuadas. Deste modo, uma altura potenciométrica mínima deve ser preservada para garantir a sua operacionalidade e economias de energia. Sendo  $h_f$  a carga fixa que não deve ser ultrapassada no poço, adotada primeiramente como 80% da altura potenciométrica inicial ( $h_0$ ), garantindo também a altura em que fica localizada a bomba, as retiradas totais (devido aos bombeamentos em todos os poços da região) não devem ultrapassar o valor de  $h_f$  (figura 3.2) adotado como limite máximo de rebaixamento.

$$RT_i \leq h_{f,i} \quad (3.29)$$

### 3.6.2.2- Minimização dos Custos

O Segundo modelo de otimização poderá ser aplicado a médio ou longo prazo quando a preocupação com os custos energéticos já se tornam necessários e, conseqüentemente, a busca pela minimização dos custos de energia. Estes custos estão relacionados com a profundidade de perfuração do poço para a captação, visto que quanto maior for a profundidade para a retirada da água maior será o investimento para execução da captação.

A composição dos custos, segundo Gonzalez (1989a), é feita a partir das variáveis que determinam a função dos custos de água subterrânea usando uma aproximação analítica que permite retirar conclusões gerais a serem aplicadas à situações gerais. Para um poço genérico a unidade de análise supõe que o processo de produção conclui quando a água é trazida à superfície. O período de tempo adotado para o cálculo de custos é de um ano.

#### 1) Custos Fixos ( $C_F$ ):

Os seguintes custos podem ser tomados independentes da quantidade de água extraída:

- a) depreciação de investimentos ( $A_i$ ): bomba e tubulações, máquina, linha elétrica de alta tensão se necessário, transformador, painel de controle elétrico e casa de proteção. O custo destas instalações dependem de fatores naturais como o tipo de formação geológica, profundidade e produtividade do estrato, nível estático e de fatores de projeto que seriam basicamente a descarga requerida e o tipo de origem da energia.
- b) despesa com pessoal ( $L$ ): Em instalações modernas, a automação reduz a necessidade de pessoal fixo para simples visitas periódicas de inspeção por um empregado.
- c) Custos de manutenção ( $M$ ): Para cobrir necessidades de inspeção, manutenção e pequenos reparos. Esses custos são usualmente estimados como um percentagem do valor total do investimento (2% é normalmente aceitável).

## 2) Custos Variáveis ( $C_V$ ):

Correspondem a energia usada no bombeamento. Muitas tarifas elétricas têm uma estrutura dual, com uma dependendo da energia consumida, e a segunda baseada na força contratada sendo esta incluída nos custos fixos.

Se  $Q$  é a descarga de bombeamento,  $h$  a profundidade do nível dinâmico,  $t$  o número de horas de bombeamento por ano,  $e$  o custo unitário de energia, e  $R$  a eficiência total da força, o custo de energia anual é obtido conforme a equação 3.30:

$$C_V = e.Q.h.t/R = KQht \quad (3.30)$$

## 3) Custos de Unidades

O custo total anual ( $C_t$ ) é dado por:

$$C_t = C_F + C_V = \sum A_i + L + M + KQht \quad (3.31)$$

O menor custo total para extração de água em um poço será obtido com a redução dos custos fixos e variáveis. Busca-se, portanto, qual a melhor distribuição de vazões no aquífero que apresente o menor custo variável, conseqüentemente menor custo total, atendendo à demanda da sociedade.

A equação 3.32 apresenta a função objetivo aplicada nesta otimização. Esta função objetivo busca minimizar o produto de  $\mathbf{Q}^*\mathbf{h}$  em todos os poços do aquífero, uma vez que a composição dos custos depende diretamente desta relação.

A altura de carga,  $\mathbf{h}$ , pode ser estimada como sendo a profundidade total do rebaixamento permitido no poço devido aos bombeamentos,  $\mathbf{RT}_i$ , conforme a equação 3.23. Substituindo na equação 3.30 obtém-se, portanto, uma equação não linear (equação 3.33) cuja otimização foi executada através de um programa desenvolvido em ambiente MATLAB.

$$\mathbf{Z} = \mathit{Min} \sum_{i=1}^N \mathbf{Q}_i \mathbf{h}_i \quad (3.32)$$

$$\mathbf{Z} = \mathit{Min} \sum_{i=1}^N \mathbf{Q}_i \mathbf{Q}_i \delta_{ij} \quad (3.33)$$

Um exemplo apresentado por Gonzalez (1989b) é aqui reproduzido para ilustrar o tema em questão. Supondo que exista um grande reservatório com uma seção transversal horizontal uniforme  $\mathbf{A}$  em que a água entra a uma taxa constante  $\mathbf{R}$  e onde a saída de fluxo natural ocorre na altura  $\mathbf{h}_N$  sobre um *datum* (Fig. 3.4).

Uma bomba de capacidade ilimitada é instalada em  $\mathbf{h}_0$  para extrair água que pode ser vendida a um preço  $\mathbf{p}$ , sendo  $\mathbf{k}$  o custo da unidade de energia por metro cúbico de elevação.

Se não há nenhum tipo de interesse no sistema econômico para o qual esta atividade produtiva pertence, o valor monetário é independente do tempo e a política de

operação ótima é dada por  $Q(t) = R$  e  $h(t) = h_N$ , contanto que  $p > k (h_0 - h_N)$ . Se o custo de elevar água do nível  $h_N$  for maior que o preço da água, não haverá retiradas. Caso ocorra uma igualdade, não haverá vantagem econômica em se realizar bombeamento.

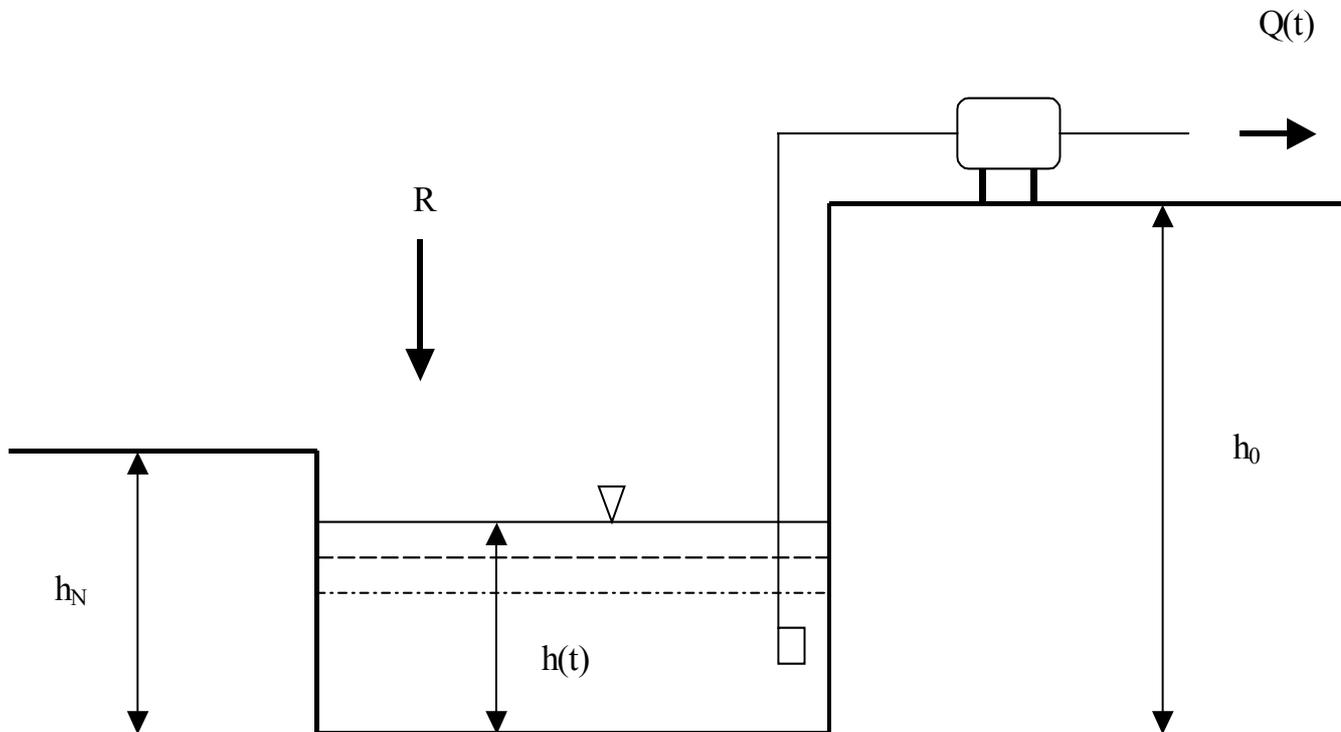


Figura 3.4 – Reservatório submetido à retirada de água por bombeamento (fonte: Gonzalez, 1989b)

As restrições utilizadas neste modelo são as mesmas adotadas na primeira otimização exceto para a que relaciona as retiradas com a recarga do aquífero (equação 3.28). Com o objetivo de encontrar a distribuição de água no aquífero que produz o menor custo de energia utilizando a totalidade da água disponível, a restrição passa a ser, nesta otimização, empregada da seguinte forma:

$$\sum Q_i = R \quad (3.34)$$

### **3.7 – Considerações Sobre os Modelos s/o**

Os modelos s/o propostos têm como objetivo dar um suporte técnico aos órgãos gestores, baseado nas características hidrogeológicas do aquífero, quando da emissão de outorga em um corpo hídrico subterrâneo.

Enquanto o modelo de simulação leva em consideração todas as características físicas do sistema, os modelos de otimização vislumbram fornecer o valor ótimo de bombeamento nos poços e a minimização do custo de energia tendo como dados de entrada os resultados da simulação.

Para a implementação dos modelos s/o algumas considerações foram feitas sendo a principal delas a adoção do princípio da superposição, que para o caso de um aquífero confinado, pela linearidade da equação neste caso, é perfeitamente aplicado. No caso de um aquífero livre, como a equação é não linear, exige-se um pouco mais de cautela devendo-se avaliar a possibilidade de linearização do sistema para aplicação.

## **4 - CASO EM ESTUDO – AQÜÍFERO DOS INGLESES**

A utilização da água subterrânea como fonte de abastecimento das populações vem crescendo substancialmente em todo o mundo. A retirada de água dos aquíferos de forma indiscriminada traz sérios problemas muitas vezes de caráter irreversível.

Nas regiões litorâneas estes efeitos podem ser ainda mais danosos, uma vez que os rebaixamentos dos lençóis subterrâneos podem provocar um avanço da cunha salina e uma retração das águas doces. Este efeito é considerado irreversível e pode causar prejuízos irreparáveis a uma região. Várias cidades brasileiras têm esta preocupação por usar demasiadamente a água subterrânea como Natal, Maceió, Recife, sendo que esta última já possui algumas áreas superexploradas de forma que a perfuração de poços não é mais permitida.

O Aquífero dos Ingleses, escolhido como área de estudo, trata-se de um aquífero costeiro e tem como principal fonte de abastecimento a água subterrânea. A sustentabilidade do aquífero é uma preocupação constante e procedente na região.

### **4.1 – Descrição da Área de Estudo**

O Distrito de Ingleses do Rio Vermelho compreende a porção nordeste da Ilha de Santa Catarina sendo composto pelas praias de Ingleses, Santinho, Moçambique e o Distrito de São João do Rio Vermelho (figura 4.1).

Esta é uma área de planície costeira arenosa, com cerca de 30 km<sup>2</sup>, compreendida entre as coordenadas 27°25'S, 27°31'S, 48°20'W e 48°25'W e cuja maior elevação atinge 395 m, no noroeste da área. Esta zona mais elevada delimita o pacote sedimentar onde se localiza uma bateria de poços da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), que abastece o Distrito com água exclusivamente de origem subterrânea.

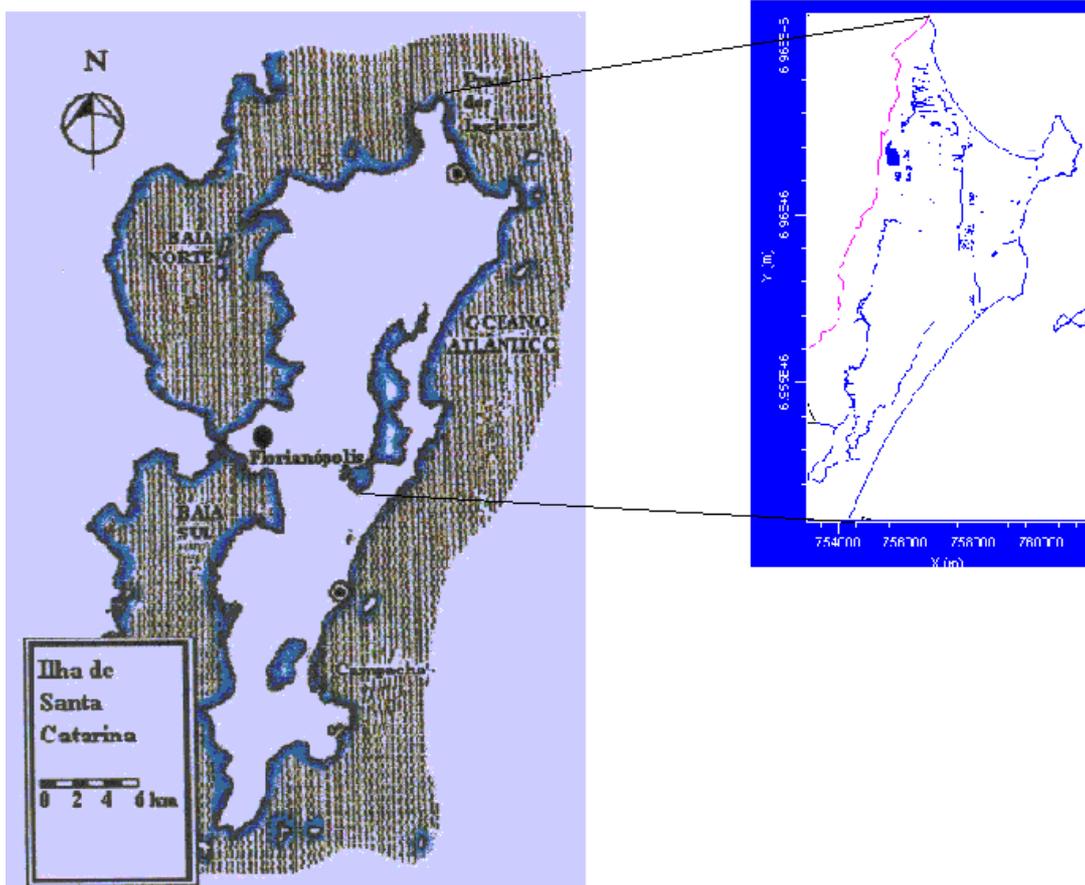


Figura 4.1- Localização da Praia dos Ingleses, na Ilha de Santa Catarina, e uma janela de entrada do *visual MoDFLOW* com a região utilizada para o estudo de caso.

A região é composta predominantemente pelos setores residencial e comercial, sendo voltada principalmente ao turismo. A oferta de água deve atender às demandas fixas (população local) e flutuantes (turistas) que vem aumentando sensivelmente a cada ano. O turismo, que é considerado um dos principais responsáveis pelas receitas de Florianópolis, tem uma demanda sazonal.

O campo de dunas móveis é a feição geomorfológica mais importante do local. Os eucaliptais margeiam o campo de dunas que tem nos seus limites poços captando águas que são conduzidas até a adutora e, posteriormente, para a estação de tratamento de água (ETA)

de Ingleses. As dunas são balizadas pelos morros da Feiticeira, dos Ingleses, das Aranhas e Muquém, tendo ligação com a Lagoa da Conceição.

O Sistema Aquífero que abrange os Distritos de Ingleses do Rio Vermelho e São João do Rio Vermelho, está sujeito a duas potenciais fontes de poluição: a) a intrusão salina, provocado por um regime intensivo de bombeamento de poços de abastecimento que desloca para o interior da zona costeira a interface água doce-água salgada e; b) prática de saneamento *in situ*, como fossas sépticas. Estas ameaças estão sendo intensificadas graças ao crescente aumento de turistas (refletido no aumento das taxas de bombeamento).

A utilização do Distrito dos Ingleses como área de estudo deve-se ao fato da comprovada necessidade de gerenciamento do aquífero com o intuito de manter o seu uso racional e garantir a sua sustentabilidade. O mapeamento da área em regiões cujo atributo é a “vazão ótima outorgável”, determinada através do modelo combinado de simulação-otimização, fornecerá aos “tomadores de decisão” subsídios para a outorga de direito de uso de recursos hídricos. Com a identificação das áreas mais favorecidas ao uso, ao ser implementada a cobrança na região, o órgão gestor, baseado nos resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de outorga, pode estimular os novos investidores a se instalar em áreas ainda propensas ao uso através da adoção de menores custos de água nestas regiões, uma vez que estes estarão de alguma forma provocando menos interferências no sistema como um todo. A aplicação, porém, não abordará diretamente o efeito da intrusão salina.

#### **4.1.1 – Clima**

O encontro das massas de ar tropical atlântica e massa de ar polar, as duas principais, são responsáveis pelo clima subtropical, com invernos relativamente frios e verões quentes.

A distribuição da chuva é regular durante o ano e os mais altos índices pluviométricos e o maior número de dias chuvosos ocorre no verão.

#### 4.1.2 – Precipitação

Na região em estudo, Distrito de Ingleses e Rio Vermelho, o regime pluviométrico tem uma precipitação média anual de 1562mm (média calculada entre os anos de 1968 e 1994), distribuídos uniformemente em toda a área (CASAN, 2000).

#### 4.1.3 - Evapotranspiração

A taxa de evapotranspiração real foi determinada através do método de L. Turc (Borges e Scheibe, 1996 apud CASAN, 2000), utilizando-se os valores de precipitação média anual (1562 mm) e da temperatura média anual (21,38 °C), obteve-se uma evapotranspiração média anual de 1031mm.

#### 4.1.4 – Uso e Ocupação do Solo

O uso e a ocupação do solo e as características físicas na região em estudos delimitam zonas bem definidas, com características bem distintas. A tabela 4.1 apresenta uma síntese desta divisão.

Tabela 4.1 – Divisão da bacia hidrográfica em zonas de acordo com o uso e a ocupação do solo

<b>Região</b>	<b>Uso</b>	<b>Declividade</b>	<b>Vegetação</b>	<b>Drenagem</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>I</b>	encosta e granito	alta	densa de médio porte	canais naturais	15029045,3	31,16
<b>II</b>	urbano	baixa	esparsa	canais de drenagem	1348104,74	2,80
<b>III</b>	dunas fixas	baixa	esparsa	inexistente	4301396,18	8,91
<b>IV</b>	dunas móveis	baixa	inexistente	inexistente	4756403,74	9,86
<b>V</b>	banhado	muito baixa	Rasteira	-	6232890,78	12,92
<b>VI</b>	campo	baixa	Rasteira ou esparsa	Canais naturais	16555859,9	34,33

Fonte: CASAN(2000)

#### 4.1.5 – Escoamento Superficial / Infiltração

O escoamento superficial e a infiltração na área em estudos foram determinados levando-se em consideração a divisão em regiões feita a partir do uso e ocupação do solo.

Com exceção das regiões de formação granítica (região I) e de banhados (região V), tem-se um solo arenoso, com pequena densidade de drenagem (pequena quantidade de canais de drenagem) localizadas, principalmente, na área de encosta (região I), onde o terreno tem uma maior declividade e na área urbana (região II), devido a drenagem artificial. Nas demais áreas (III e IV), mais planas, observa-se a ausência de rede de drenagem.

Nas regiões II e IV, em função da declividade baixa, da ausência de canais de drenagem e do solo arenoso, o escoamento é considerado nulo, ou seja, nestas regiões toda a água precipitada inicialmente se infiltra e, posteriormente, parte evapotranspira e parte irá contribuir para a recarga do aquífero. Na região II, devido à impermeabilização do solo provocada pela urbanização, uma parcela da água precipitada transforma-se em escoamento superficial, estimou-se um redutor de 30% devido à área impermeabilizada. A tabela 4.2 apresenta os valores obtidos em cada região.

Tabela 4.2 – Balanço hídrico nas regiões

Região	P (mm/ano)	ETR (mm/ano)	Es (mm/ano)	I (mm/ano)
I	1562	1031	531 / 492	0
II	1562	1031	160	371
III, IV e VI	1562	1031	0	531
V	1562	1031	531	0

Fonte: CASAN(2000)

#### 4.1.6 – Recarga

A recarga do aquífero foi calculada, conforme proposto por Freeze e Cherry (1979), como 30% da precipitação média anual, obtendo-se, portanto, uma recarga de aproximadamente 500mm/ano.

#### 4.1.7 – Geologia

“A planície costeira de Ingleses desenvolve-se paralelamente ao relevo cristalino, orientada aproximadamente na direção norte-sul. A porção sedimentar alonga-se para o leste, tendo como linha de costa as praias de Ingleses, Santinho e Moçambique. Esta planície estreita-se de norte para sul, e seus litotipos de maior interesse para o abastecimento da área em estudo são as areias bem classificadas e os sedimentos arenoargilosos que, intercalados com sedimentos de granulação mais grossa, compõem a base do sistema aquífero. Um cordão de dunas sésseis sobrepõe-se a este pacote sedimentar, sendo, por seu turno, sotoposto a um campo de dunas móveis” (CASAN,2000).

A foto 1 apresenta uma vista do Costão do Santinho para a Praia dos Ingleses e principais depósitos sedimentares com interesse hidrogeológico.



**Foto 1** – Vista do Costão do Santinho para a Praia dos Ingleses. Fonte: CASAN(2000)

#### **4.1.8 – Hidrogeologia**

As informações contidas neste item foram adaptadas de CASAN (2000).

O Sistema Aquífero Ingleses- Rio Vermelho, predominantemente livre, abrange a Praia dos Ingleses e as porções interiores do sistema deposicional costeiro, nos Distritos de Ingleses do Rio Vermelho e São João do Rio Vermelho. É composto por areias finas a média, com intercalação descontínua de níveis areno-argilosos e tem uma espessura máxima de 153m.

O pacote sedimentar total, no entanto, possui grande espessura, com profundidade máxima em torno de 500m. Este arcabouço sedimentar é, grosso modo, dividido em dois depocentros: um ao norte e outro ao sul da linha imaginária que une os morros de Muquém e das Aranhas.

A alimentação do sistema aquífero se dá principalmente por infiltração direta da precipitação. A distribuição da infiltração ocasionada pela precipitação está fortemente relacionada com a precipitação anual, altitude e percentagem da área coberta por superfícies impermeáveis. A recarga artificial proveniente dos sistemas locais de disposição de efluentes domésticos (sistemas sépticos) e das perdas do sistema de abastecimento, embora relevantes, figuram em segundo plano.

A topografia local controla o movimento e a descarga das águas subterrâneas. A Praia do Santinho é a principal zona de descarga do sistema aquífero, cujo fluxo de água doce avança mar adentro, forçando a cunha salina.

#### 4.1.9 - Topografia do Terreno

A topografia do terreno, mostrada na figura 4.2, está representada em escala de cores, e será utilizada como parâmetro de entrada do modelo de simulação do fluxo subterrâneo.

#### 4.2 – Uso da Água na Região

A CASAN utiliza para o abastecimento público da região norte da ilha poços tubulares, exclusivamente, como pode ser visto nas fotos 2 e 3. O abastecimento é feito por dezesseis poços para os dois Distritos, conforme a distribuição apresentada na tabela 4.3 a seguir. Informações adicionais dos poços da CASAN são mostradas na tabela 4.4. Poços tipo ponteira também são encontrados nos domicílios sob responsabilidade dos próprios moradores (foto 4).



**Foto 02** – Vista lateral do poço tubular da CASAN –CIRO.  
Fonte:CASAN(2000)

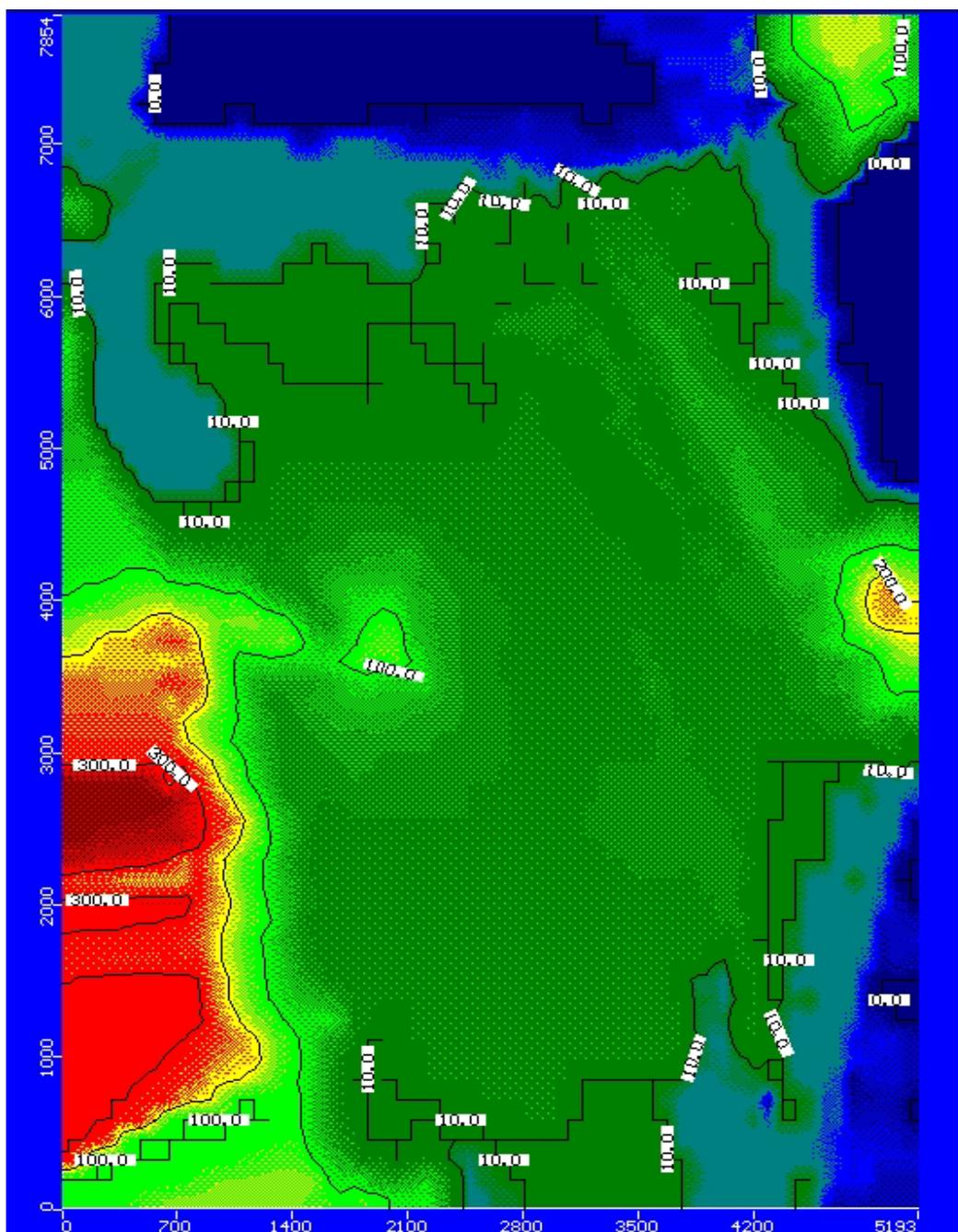


Figura 4.2 - Visualização em escala de cores da topografia do terreno



**Foto 03** –Vista frontal do poço tubular da CASAN –AREIAL.

Fonte:CASAN(2000)



**Foto 04** –Típico poço do tipo ponteira amplamente difundido na região dos Ingleses

Fonte:CASAN(2000)

Tabela 4.3- Informações Cadastrais dos Poços do Sistema Costa Norte

<b>CÓDIGO CASAN</b>	<b>APELIDO</b>	<b>NUM. PAINEL</b>	<b>ADUTORA</b>	<b>COORD X</b>	<b>COORD Y</b>
282.2.FNS 20	Moçambique	timer	Rio Vermelho	755443	6954956
239.2.FNS 3	Ciro	timer	Rio Vermelho	755779	6957743
288.2.FNS 24	Areial/Dunas Descobertas	P11	antiga	757247	6958296
384.2.FNS 38	Dunas Verdes	timer	Rio Vermelho	756236	6958493
311.2.FNS 29	Edmundo	P10	antiga	757285	6958803
287.2.FNS 23	Paulinho da Matriz 1	P8	antiga	757437	6959188
381	Paulinho da matriz 2	P9	antiga	757340	6959330
286.2.FNS 22	Bianco	P7/TIMER	antiga	757579	6959638
309.2.FNS 27	RBS	P6	antiga	757608	6960316
310.2.FNS 28	Ipanema	P5	antiga	757604	6960772
243.2.FNS 7	Didi I	P2	nova	757373	6961149
323.2.FNS 32	Didi II	P3	nova	757474	6961147
382.2.FNS 36	Didi III	P4	nova	757547	6961147
312.2.FNS 30	Oficina	P1	nova	757588	6961417
?	Eta I	P12/MANUAL	nova	757556	6961819
322.2.FNS.31	Eta II	P13/MANUAL	nova	757596	6961771

Fonte: CASAN(2000)

Tabela 4.4- Informações Adicionais dos Poços do Sistema Costa Norte

<b>POÇO/APELIDO</b>	<b>NE MÉDIO(m)</b>	<b>ND MÉDIO (m)</b>	<b>PROFD. (m)</b>
Moçambique	-	23,9	-
Ciro	4.34	10,3	-
Areial/Dunas Descobertas	4.1	3,75	57,78
Dunas Verdes	-	15,5	77
Edmundo	2.34	15,5	48,22
Paulinho da Matriz 1	2.55	9,45	66
Paulinho da matriz 2	2.26	17,2	-
Bianco	-	11,2	65,5
RBS	1.78	15	65,47
Ipanema	1.9	13,65	47,66
Didi I	2.11	14,4	63,66
Didi II	1.07	10,7	60,5
Didi III	1.61	18,9	61
Oficina	3.59	16,6	61,38
Eta I	1.3	7,9	-
Eta II	0.6	18,7	-

Fonte: CASAN(2000)

## **5 – APLICAÇÃO DO MODELO S/O AO AQUÍFERO DOS INGLESES**

O aquífero dos Ingleses é um aquífero do tipo não confinado (livre) que se caracteriza por não ter uma camada limite impermeável na parte superior. Admite-se, para simplificação de cálculo, que existe uma interface de separação entre a zona saturada e uma região não saturada acima.

Para a execução do modelo de simulação, considerou-se o regime permanente e o aquífero livre sendo todos os rebaixamentos calculados a partir dos resultados obtidos para esta situação.

### **5.1 - Discretização do Domínio**

O Aquífero dos Ingleses teve a sua área de domínio discretizada em uma grade, de 60 linhas por 60 colunas, que foi utilizada para a simulação do fluxo no aquífero (figura 5.1). As células verdes representam a parte inativa, ou seja, onde não há fluxo. As regiões em que encontram-se rios ou banhados são representadas pelas células azuis.

### **5.2 - Condições de Contorno**

As condições de contorno estabelecidas no modelo são de carga hidráulica especificada para a região da praia e dos rios (condição de Dirichlet), e de fluxo especificado na zona de relevo cristalino (condição de Neumann). Os valores assumidos na condição de carga especificada estão apresentados na figura 5.2 e a adoção destes valores basearam-se em observações *in loco*, em estudos das cartas topográficas e em alguns casos os mesmos foram ajustados na fase de calibração do modelo.

Na figura 5.3 pode-se observar, além das condições de contorno anteriormente citadas, a localização dos poços de monitoramento. Um corte com o detalhamento vertical de uma seção do aquífero é apresentado na figura 5.4.

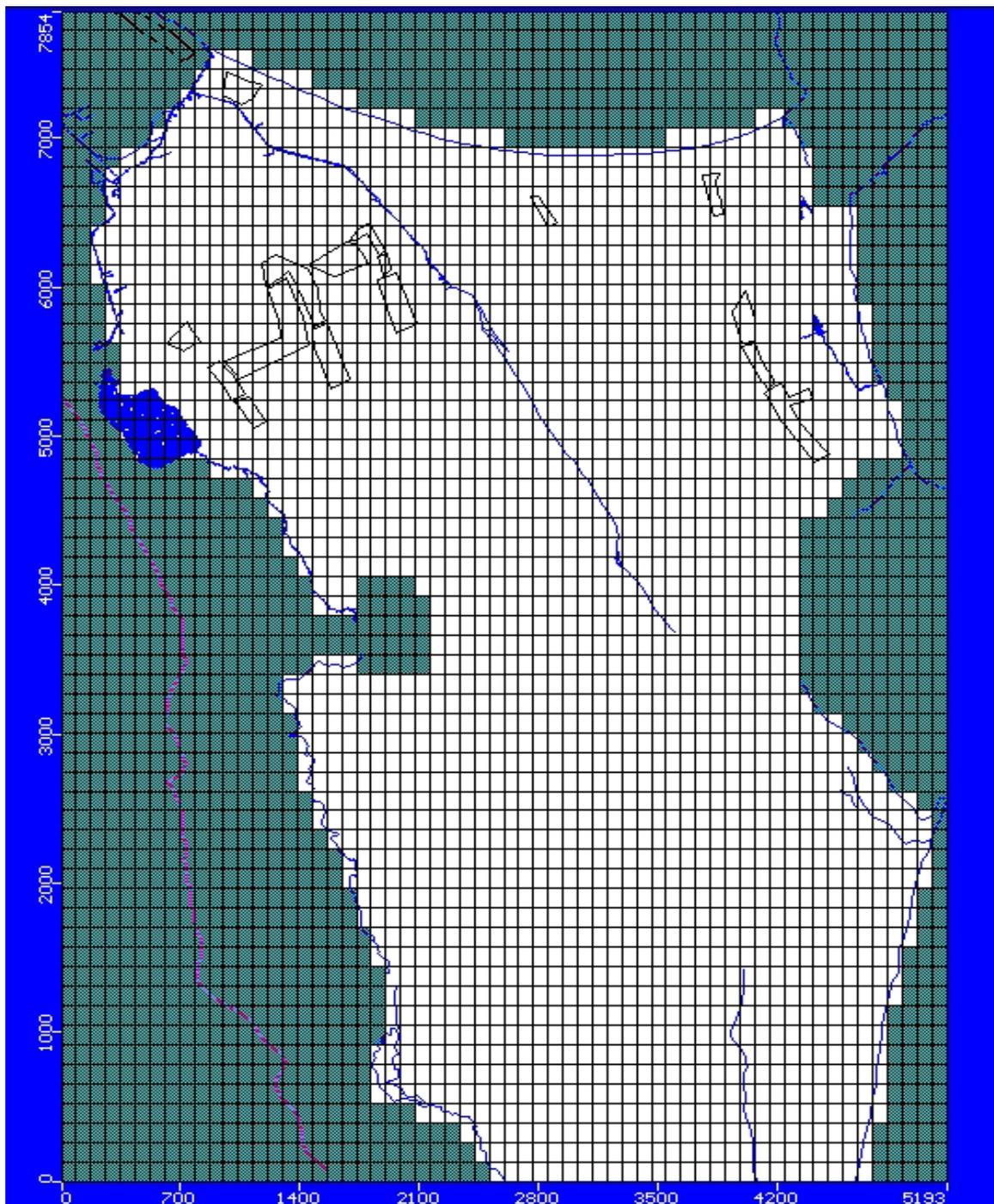


Figura 5.1 – Domínio e malha empregados no modelo s/o.

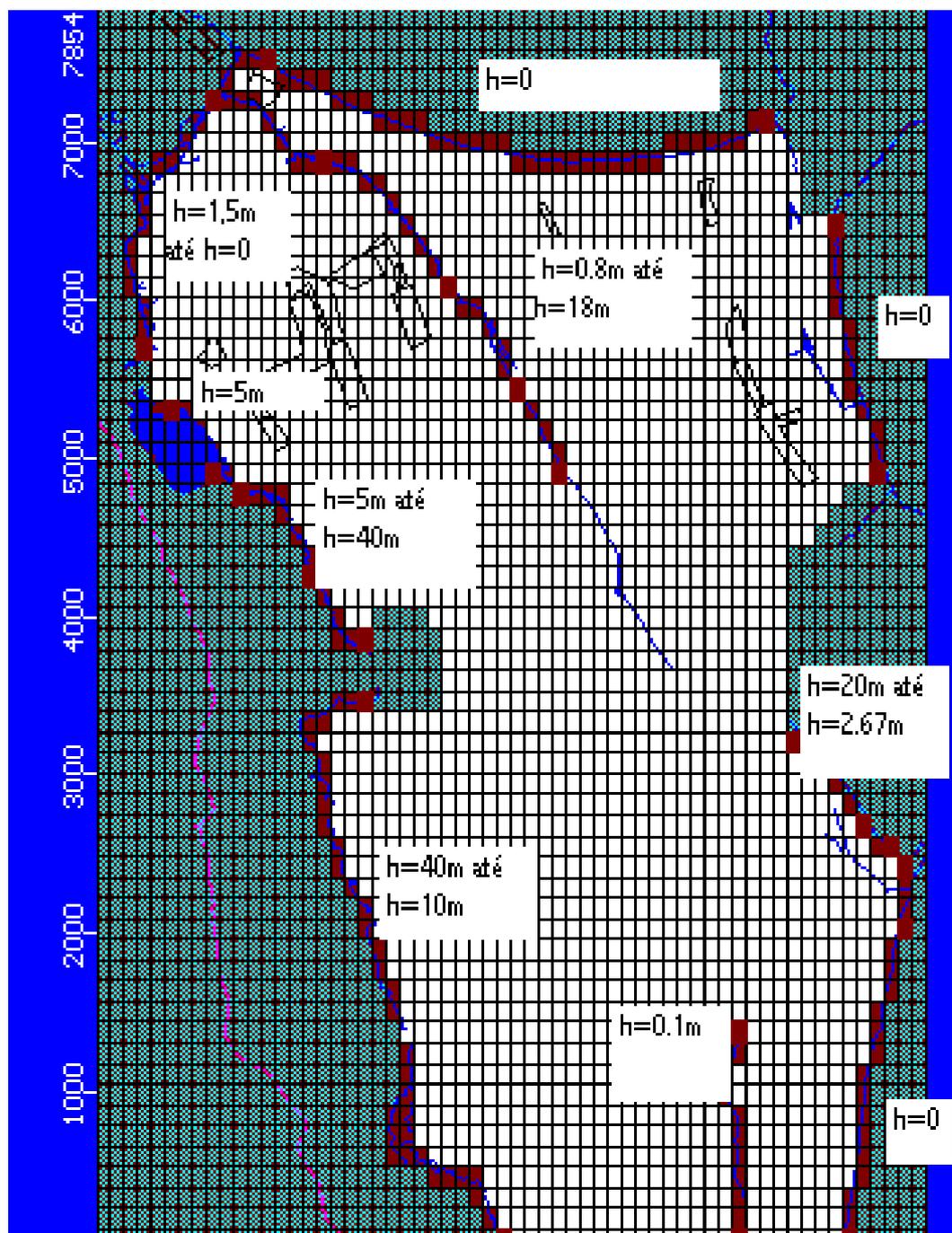


Figura 5.2 – Apresentação da condição de contorno de carga hidráulica especificada no aquífero dos Ingleses

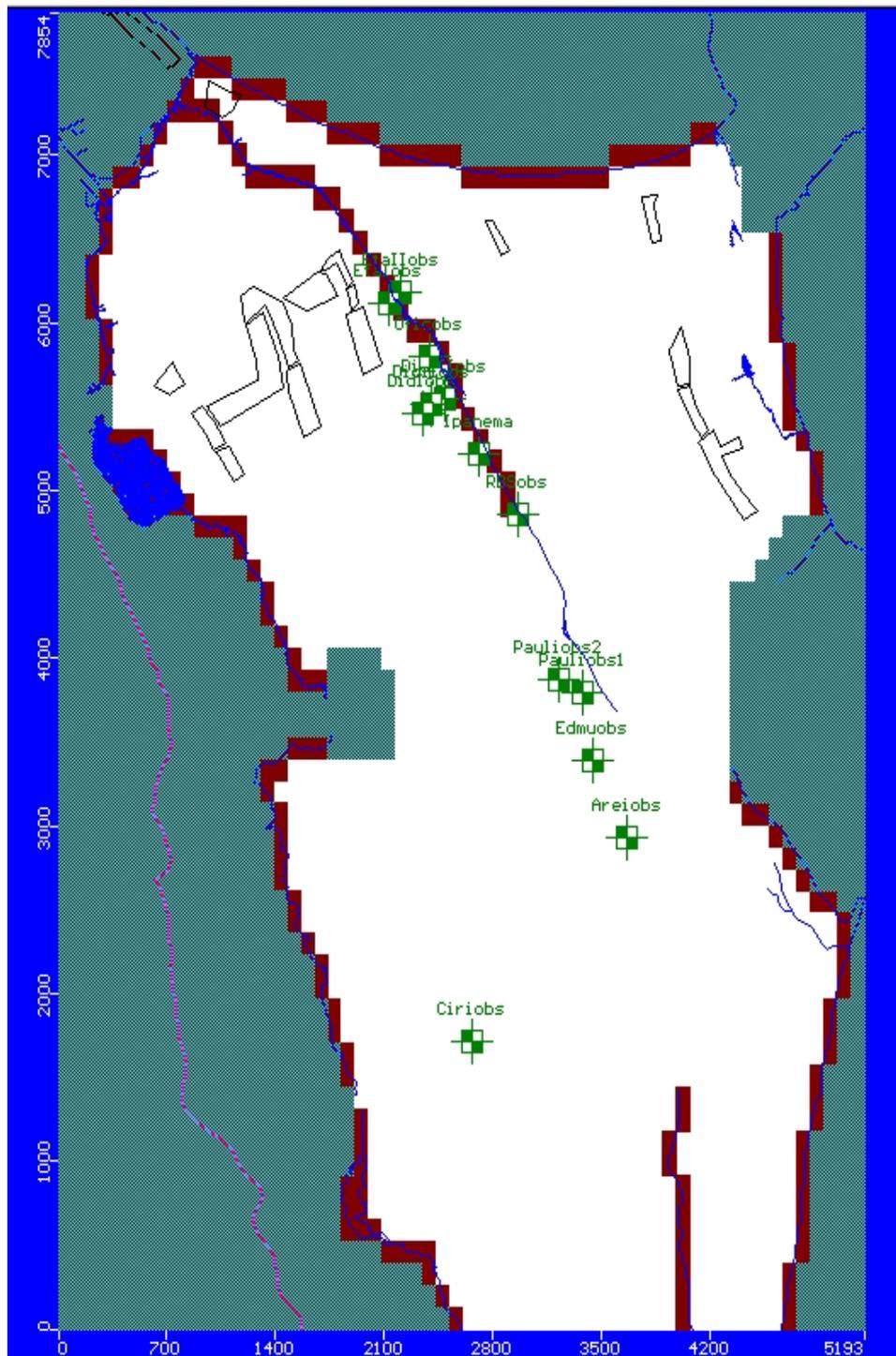


Figura 5.3 - Modelo conceitual implementado para a área. Células em **vermelho** representam condições de contorno de carga fixa e, em **verde**, células inativas. Os poços de monitoramento são representados em **verde escuro**.

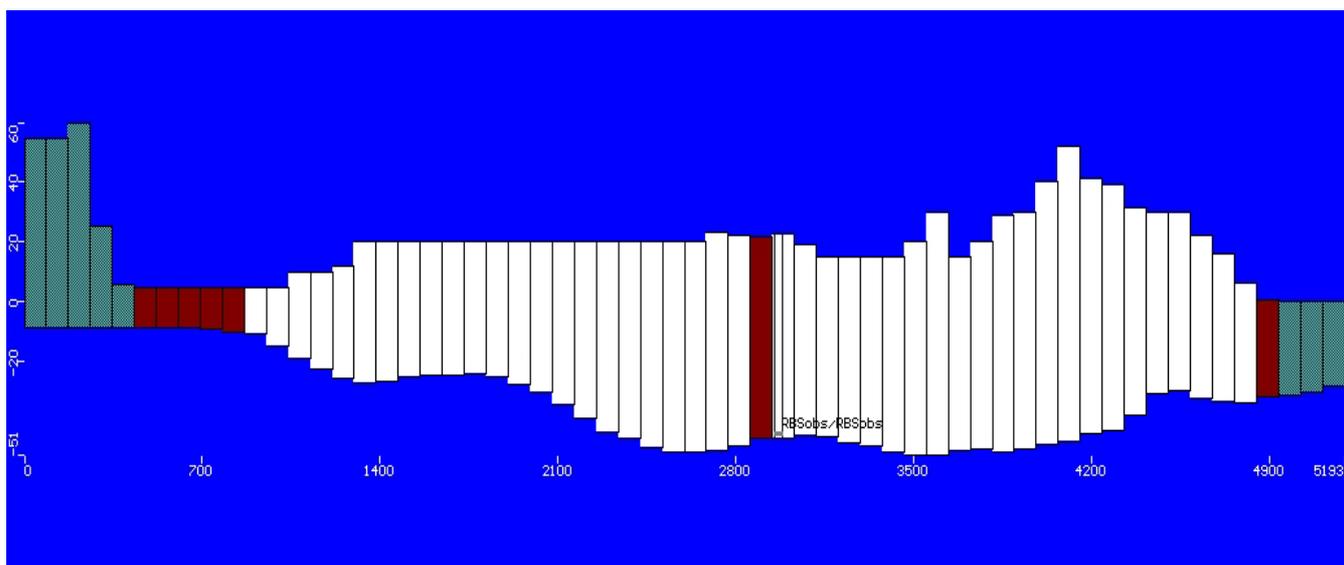


Figura 5.4 – Corte leste-oeste do domínio, a 4900 m do limite sul (linha 23). Células em **vermelho** representam condições de contorno de carga fixa e, em **verde**, células inativas. Exagero vertical de 10 vezes.

### 5.3 – Calibração

A determinação dos parâmetros de ajuste do modelo de fluxo foi fundamentada na literatura existente, para uma primeira tentativa, e uma maior precisão dos mesmos foi obtida durante a execução da calibração.

As propriedades hidrodinâmicas que foram estimadas são:

- a) porosidade efetiva – quantidade de água efetivamente drenada por gravidade de um volume unitário saturado do aquífero;
- b) porosidade total – é a razão entre o volume de vazios e o volume total;
- c) Armazenamento específico ( $S_s$ ) – volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica. Para a estimativa de  $S_s$  empregou-se a expressão 5.1.

$$s_s = \rho g \phi (\alpha_p + \beta) \quad (5.1)$$

Onde:

$\alpha_p$  –compressibilidade do material; adotado igual a  $4,8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ , de acordo com Domenico e Schwartz (1997) para areia solta este parâmetro pode variar de  $1 \times 10^{-7}$  a  $5,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ ;

$\beta$  - compressibilidade da água, tendo seu valor igual a  $4,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$  (Freeze e Cherry, 1979);

$\rho g$  – produto da massa específica da água pela aceleração da gravidade, igual a  $9,8 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ ;

$\phi$  - porosidade, igual a 10%;

Substituindo-se os valores acima na expressão 5.1, obteve-se, portanto,  $S_s = 4,74 \times 10^{-8}$  por unidade de metro.

- a) Rendimento específico ( $S_y$ ) – é a taxa do volume de água que drena de uma rocha saturada devido à atração da gravidade do volume total da rocha.
- b) Condutividade hidráulica ( $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ ) – estudos anteriores indicam valores para este parâmetro conforme apresentado na tabela 5.1 (CASAN, 2000).

Tabela 5.1- Valores das condutividades hidráulicas

Região	Condutividade Hidráulica $K_x=K_y=K_z$ (m/s)
Relevo do Embasamento Cristalino	$6,0 \times 10^{-5}$
Região de dunas	$8,0 \times 10^{-5}$
praias	$15,3 \times 10^{-5}$

Os valores das propriedades hidrodinâmicas finais, ajustados durante o processo de calibração do modelo estão apresentados na tabela 5.2.

O resultado gráfico da calibração do modelo é mostrado na figura 5.5. Os poços utilizados como poços de observação encontram-se em vermelho e a linha pontilhada é o intervalo de confiança com 95% de probabilidade.

Tabela 5.2 – Valores das propriedades hidrodinâmicas após calibração

Propriedade	Valor
Condutividade Hidráulica Horizontal ( $K_x$ e $K_y$ ) e Vertical ( $K_z$ )	$7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Armazenamento Específico ( $S_s$ )	$4,7 \times 10^{-8} / \text{m}$
Rendimento Específico ( $S_y$ )	$5 \times 10^{-5}$
Porosidade Efetiva	0,25
Porosidade Total	0,25

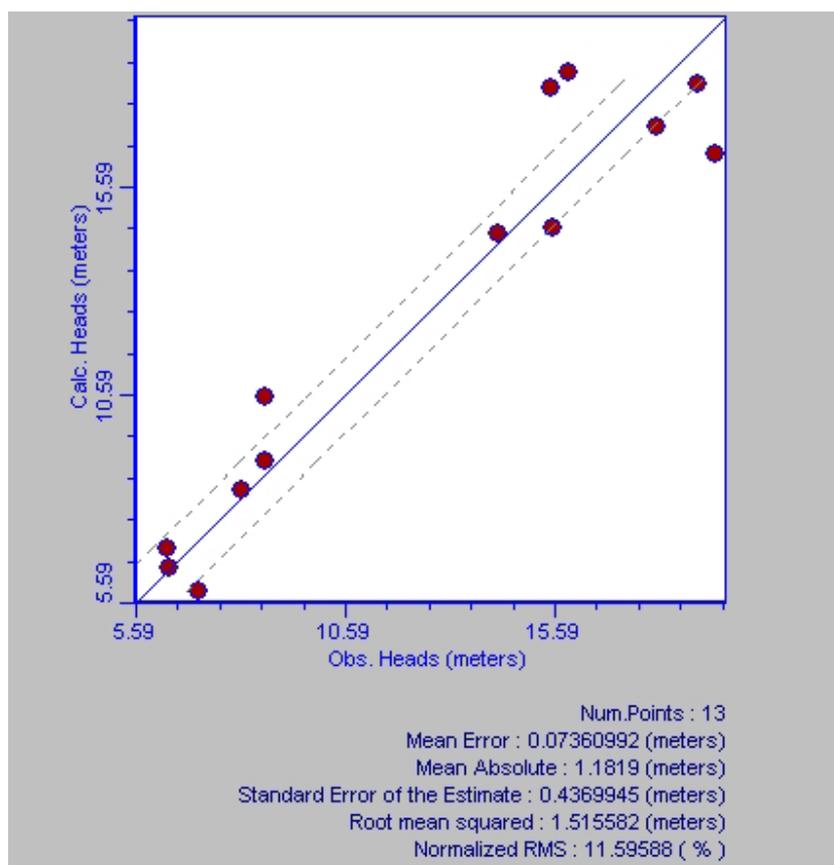


Figura 5.5 – Resultados gráficos da calibração do modelo. Os pontos representam os poços de observação utilizados e, as linhas pontilhadas, o intervalo de confiança com 95% de probabilidade.

Como pode ser observado, os valores calculados pelo modelo foram muito próximos dos valores observados com uma média absoluta obtida de 1,1819 metros. Além disso, a maioria dos pontos utilizados para a calibração estão localizados dentro do intervalo de confiança estabelecido, confirmando, portanto, o bom ajuste obtido na calibração. Porém, apesar do seu bom resultado, não se pode deixar de considerar o fato da aleatoriedade dos processos naturais envolvidos.

As equipotenciais e os vetores de velocidade obtidos para a área em estudo a partir da calibração do modelo, são mostrados nas figuras 5.6 e 5.7.

#### **5.4 - Simulação**

Para a simulação da outorga no aquífero e avaliação do modelo s/o, foram inseridos 50 poços virtuais distribuídos aleatoriamente no aquífero dos Ingleses conforme mostra a figura 5.8. Houve, para tanto, a preocupação de não inserir poços próximo a locais com cargas fixas constantes com o intuito de minimizar as interferências daquelas nos rebaixamentos, uma vez que estes são utilizados diretamente como objeto de estudo. Os poços foram estimulados individualmente com bombeamentos de 1.000 m<sup>3</sup>/dia e os rebaixamentos causados no próprio poço bombeado e nos demais poços localizados no raio de influência do bombeamento (que sofressem rebaixamento de até 0,10m) foram medidos, conforme pode ser observado nas figuras 5.9 e 5.10. Para a adoção da vazão de bombeamento (de 1000 m<sup>3</sup>/dia), levou-se em consideração a necessidade da percepção do efeito do rebaixamento provocado pelo mesmo, buscando-se com isto evitar valores extremamente pequenos que poderiam dificultar a aplicação do modelo.

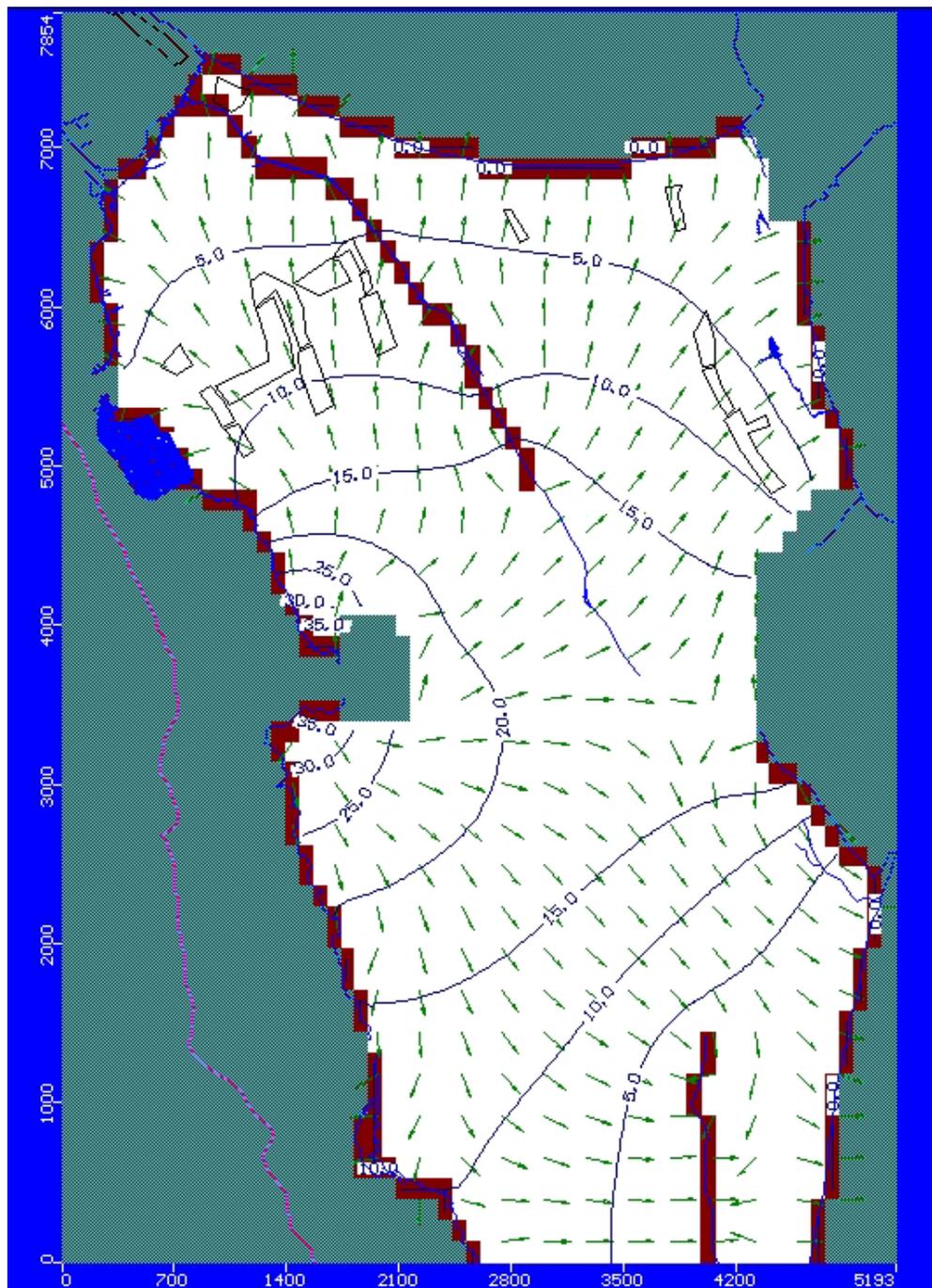


Figura 5.6 – Equipotenciais calculadas através do modelo calibrado para a área. As setas verdes indicam a direção dos vetores velocidade

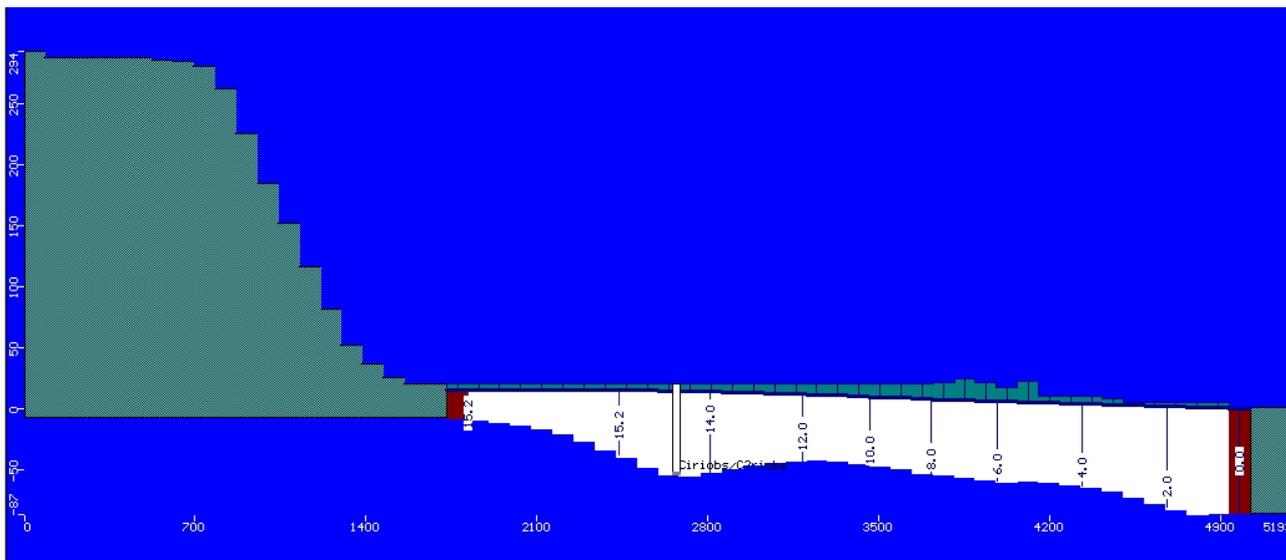


Figura 5.7 – Equipotenciais calculadas através do modelo calibrado para a área. Corte leste-oeste, a 1760 m do limite sul (linha 47). Exagero vertical de 5 vezes

### 5.5 – Cenários de Outorga Considerados no Modelo s/o

Alguns cenários foram considerados com a finalidade de testar a eficiência do modelo proposto na região em estudo. As situações estabelecidas têm o propósito de abordar casos reais como o valor ótimo a ser bombeado nos poços sem que nenhuma outorga tenha sido emitida, ou ainda quando já existem poços em funcionamento. As restrições (reapresentadas resumidamente a seguir) são determinadas no modelo de otimização que fornecerá qual o melhor valor resultante para cada caso simulado e que deverá, portanto, servir como diretriz para o órgão gestor no momento em que o mesmo seja solicitado.

Resumo das restrições:

1.  $Q_i \leq T_i$  – restrição do limite superior a ser outorgado, baseia-se na solicitação do usuário;
2.  $Q_i \geq X_i$  – restrição de limite inferior de outorga, podendo ser também apenas uma igualdade. Tem a função de fixar os bombeamentos já existentes;

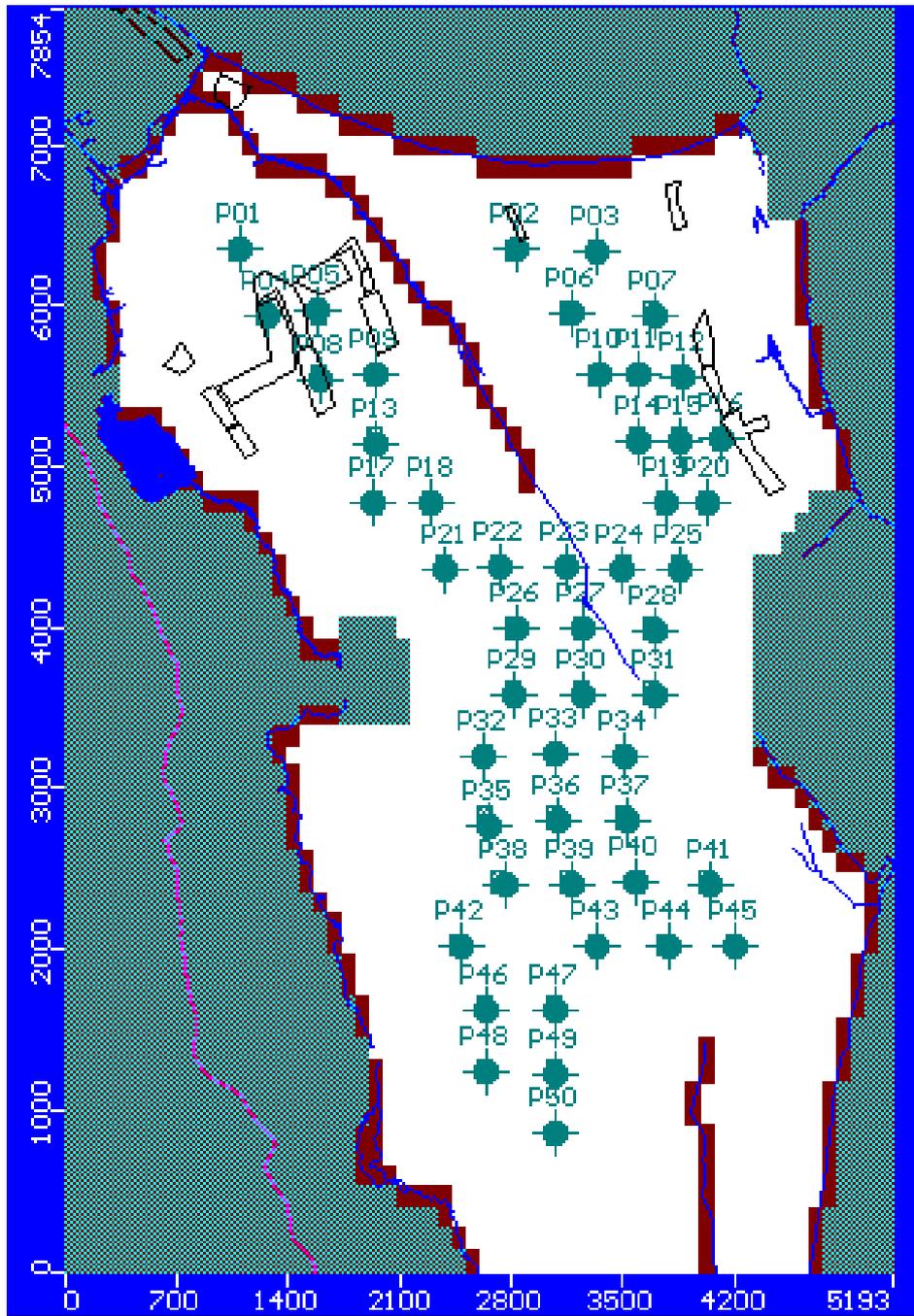


Figura 5.8 – Localização dos poços virtuais inseridos para execução do modelo s/o.

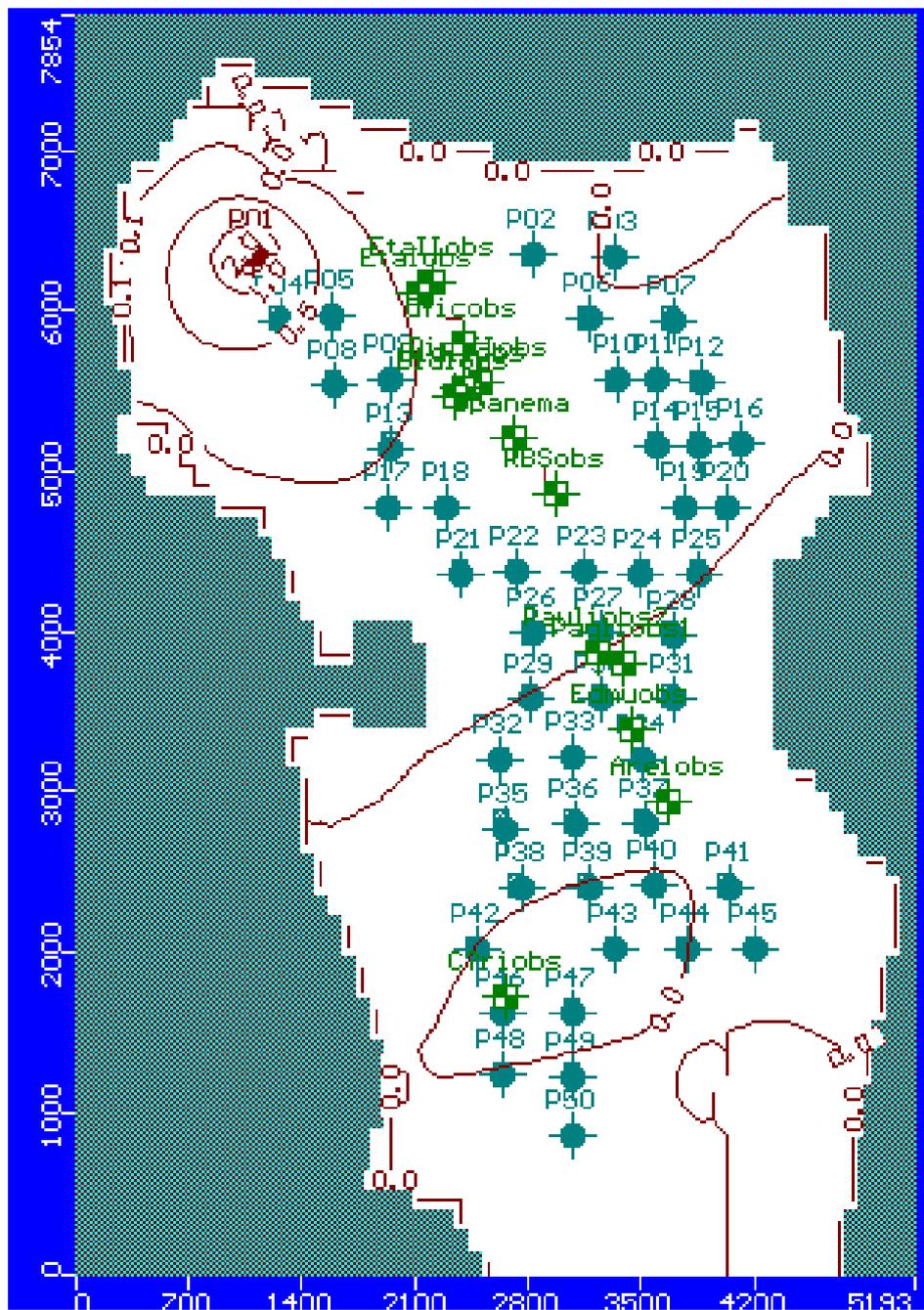


Figura 5.9 – Bombeamento no poço 1 e respectivo cone de rebaixamento.

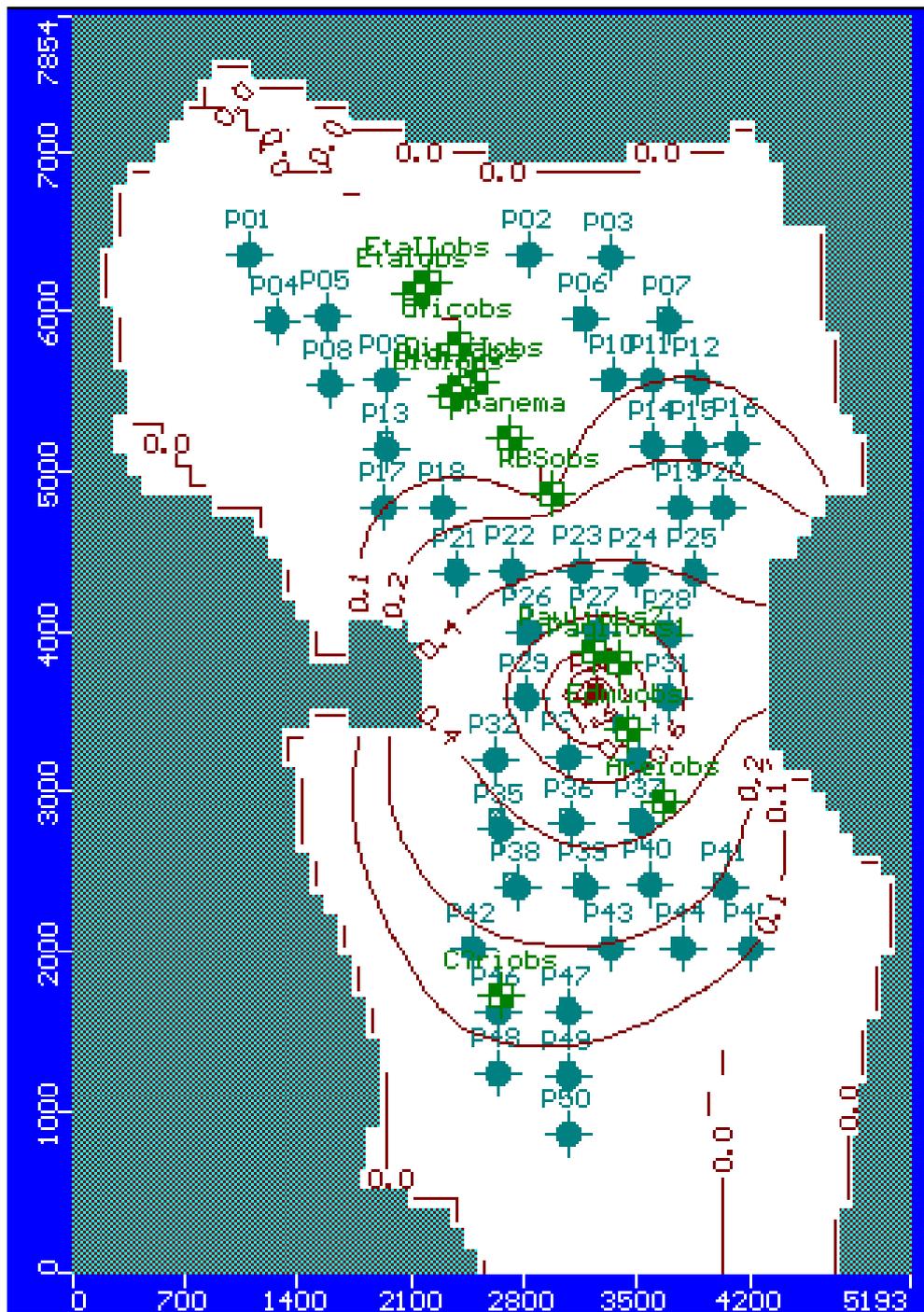


Figura 5.10 – Bombeamento no poço 30 e respectivo cone de rebaixamento.

3.  $\sum Q_i \leq R$  – relaciona as extrações totais à recarga do aquífero;
4.  $RT_i \leq h_{fi}$  – condiciona as captações nos poços às condições de rebaixamentos decorrentes das retiradas de água;
5.  $Q_i \geq 0$  – restrição de não negatividade dos bombeamentos.

### 5.5.1 – Cenário I

O primeiro cenário simulado supõe que nenhuma outorga foi ainda emitida pelo órgão. Sabe-se, no entanto, que os poços existentes na região deverão ser cadastrados para que, em um passo subsequente e de acordo com a legislação vigente, tenham o direito a extração da água subterrânea através da outorga de direito de uso. Como resultado, valores ótimos de bombeamento serão fornecidos pelo modelo para cada um dos poços. Neste caso, não serão utilizadas as restrições de limites superior e inferior do bombeamento (restrições 1 e 2) prevalecendo assim os valores de bombeamento que melhor atendam às demais restrições.

### 5.5.2 - Cenário II

Neste caso, considera-se que todos os 50 poços também já estavam em funcionamento porém, ainda não possuíam permissão para a extração da água. A otimização será realizada tendo na restrição de limite inferior um valor de  $X_i$  igual a  $500\text{m}^3/\text{dia}$ , sendo este um valor mínimo de captação atribuído a cada poço. Os bombeamentos nos poços assumirão assim valores superiores a este limite sem que, contudo, seja estabelecido um limite superior máximo  $T_i$ .

### 5.5.3 – Cenário III

Alguns poços têm bombeamentos fixos pois, supõe-se que já possuem um valor fixo de extração e a restrição de limite inferior passa a ser representada como  $Q_i = X_i$ . Os demais poços são admitidos como novos usuários que serão inseridos no sistema e que

estão solicitando uma extração com valor  $T_i$  sendo este, então, o limite máximo a ser outorgado para o usuário, como pode ser visto na tabela 5.3.

#### 5.5.4 – Cenário IV

Este cenário é semelhante ao anterior diferindo apenas na restrição do limite superior para aqueles poços que ainda não possuem retiradas fixas. Neste caso, admitiu-se que os pedidos dos novos usuários foram extremamente altos exigindo todo o recurso disponível no aquífero (tabela 5.3). O órgão gestor terá a incumbência de distribuir o recurso entre os solicitantes de forma que seja mantida a operacionalidade e a sustentabilidade do aquífero.

Tabela 5.3 – Faixa de domínio das variáveis  $X_i$  e  $T_i$  para os cenários III e IV.

POÇOS	Faixa de domínio das Variáveis ( $m^3/dia$ )		
	$X_i$	$T_i$ -CENÁRIO III	$T_i$ -CENÁRIO IV
P1	= 500	xxxxxxx	xxxxxxx
P2	= 600	xxxxxxx	xxxxxxx
P3	= 400	xxxxxxx	xxxxxxx
P4	= 700	xxxxxxx	xxxxxxx
P5	= 608	xxxxxxx	xxxxxxx
P6	>= 500	<= 1000	<= 10000
P7	= 794	xxxxxxx	xxxxxxx
P8	>= 500	<= 1200	<= 12000
P9	>= 500	<= 800	<= 8000
P10	= 1000	xxxxxxx	xxxxxxx
P11	= 771	xxxxxxx	xxxxxxx
P12	>= 500	<= 750	<= 7500
P13	>= 500	<= 680	<= 6800
P14	>= 500	<= 900	<= 9000
P15	>= 500	<= 790	<= 7900
P16	= 632	xxxxxxx	xxxxxxx
P17	>= 500	<= 580	<= 5800
P18	>= 500	<= 550	<= 5500
P19	>= 500	<= 598	<= 5980
P20	>= 500	<= 1100	<= 1100
P21	>= 500	<= 780	<= 7800
P22	>= 500	<= 900	<= 9000
P23	>= 500	<= 850	<= 8500
P24	= 1704	xxxxxxx	xxxxxxx
P25	= 1361	xxxxxxx	xxxxxxx
P26	>= 500	<= 650	<= 6500
P27	>= 500	<= 550	<= 5500
P28	>= 500	<= 1500	<= 10500
P29	= 1601	xxxxxxx	xxxxxxx

<b>P30</b>	>= 500	<= 885	<= 8850
<b>P31</b>	= 1682	xxxxxxx	xxxxxxx
<b>P32</b>	>= 500	<= 978	<= 9780
<b>P33</b>	>= 500	<= 115	<= 11150
<b>P34</b>	= 803	xxxxxxx	xxxxxxx
<b>P35</b>	>= 500	<= 597	<= 5970
<b>P36</b>	>= 500	<= 615	<= 6150
<b>P37</b>	= 1562	xxxxxxx	xxxxxxx
<b>P38</b>	>= 500	<= 798	<= 7980
<b>P39</b>	= 545	xxxxxxx	xxxxxxx
<b>P40</b>	>= 500	<= 889	<= 8890
<b>P41</b>	>= 500	<= 653	<= 6530
<b>P42</b>	>= 500	<= 714	<= 7140
<b>P43</b>	>= 500	<= 625	<= 6250
<b>P44</b>	= 1294	xxxxxxx	xxxxxxx
<b>P45</b>	>= 500	<= 824	<= 8240
<b>P46</b>	>= 500	<= 890	<= 8900
<b>P47</b>	>= 500	<= 700	<= 7000
<b>P48</b>	>= 500	<= 800	<= 8000
<b>P49</b>	>= 500	<=900	<=5000
<b>P50</b>	>= 500	<= 1500	<= 5000

### 5.5.5 – Cenário V

Neste cenário, procurou-se estudar uma situação em que se deseje armazenar uma maior quantidade de água no aquífero de forma que, ao invés de se poder extrair 80% da carga hidráulica inicial dos poços, reduzam-se estes índices para percentuais inferiores tais como 60 e 40%. Os quatro cenários anteriores foram submetidos a estes novos percentuais.

### 5.5.6 – Cenário VI

Indicativos para valoração da água com o propósito de cobrança são buscados neste cenário. A localização dos poços passam a ter considerável importância em virtude das interferências que os mesmos podem causar no demais poços e no aquífero como um todo. Duas possibilidades de localização dos poços foram estabelecidas com o intuito de, sabendo-se o grau de interferência causado pelo novo usuário, dar subsídios ao órgão gestor para estimar quão valiosa é aquela extração.

## **6- RESULTADOS E DISCUSSÕES DO MODELO S/O**

O aquífero estudado mostrou-se bem comportado, sem restrições de fluxo dentro da área estudada. Os bombeamentos aplicados nos poços virtuais causaram efeitos de rebaixamento visíveis e que possibilitaram manipulação numérica, apesar dos valores obtidos serem muito próximos a zero. Por se tratar de um aquífero arenoso, há uma tendência a uma contribuição de todo o aquífero às interferências a ele provocadas. Desta forma, a verificação do modelo s/o foi realizada em todas as suas etapas.

### **6.1 - Linearização**

A aproximação de aquífero não confinado para aquífero confinado com o propósito da adoção do princípio da superposição, mostrou um erro médio na ordem de 10%, onde os valores obtidos pelo somatório dos efeitos, ou superposição, sempre foram menores que aqueles calculados a partir da simulação, como mostra a figura 6.1. Nota-se ainda que quanto mais poços estejam inseridos no raio de influência do poço em processo de observação dos rebaixamentos, maior é a diferença entre os dois valores (superpostos e o simulado). Provavelmente isto ocorre devido ao acúmulo de erros embutidos na equação ser maior nestes casos visto que mais poços estão sendo considerados.

### **6.2 – Otimização**

#### **6.2.1 - Maximização das Retiradas**

##### **6.2.1.1– Cenários I, II, III e IV**

Os cenários simulados foram criados com a intenção de verificar a eficiência do modelo submetendo-o à várias condições de atuação. Para as situações sugeridas valores de bombeamento otimizados foram obtidos através do modelo s/o para todas as simulações realizadas.

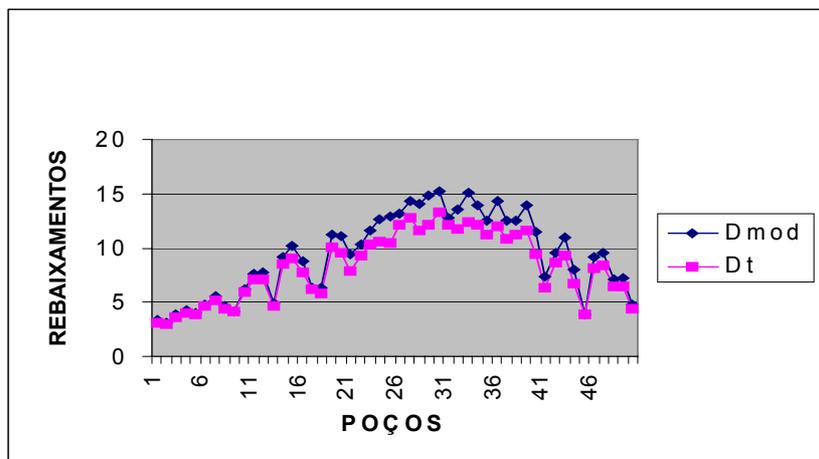


Figura 6.1 – Curvas apresentando os rebaixamentos obtidos através da simulação do bombeamento nos poços (Dmod) e aquelas obtidas a partir da superposição de efeitos (Dt).

As funções objetivo alcançaram o valor máximo permitido, que foi baseado na recarga do aquífero quando houve uma permissão de retirada de até 80% da carga hidráulica dos poços. Ou seja, houve uma distribuição de toda a água disponível para extração, mantendo-se a operacionalidade dos poços e a sustentabilidade do aquífero uma vez que em nenhuma situação as retiradas superaram a recarga, condição esta predeterminada pelo modelo.

Os resultados obtidos (tabela 6.1) confirmam o suporte que o modelo s/o possibilita quando da emissão de outorgas, pois permite ao tomador de decisão assumir, com base nas condições hidrogeológicas do aquífero, quais as quantidades ótimas que devem ser liberadas para extração em cada poço.

Os resultados mostraram que, para a simulação realizada com o primeiro cenário, valores nulos de extração foram obtidos, já que neste caso nenhuma restrição de bombeamento mínimo foi imposta. Sendo assim, não é recomendável que se faça uso de condição semelhante caso os poços já existam, como foi suposto, visto que implicaria no impedimento de captações em poços que já estão em pleno funcionamento.

Nos demais casos, as objeções de uso são relativas exclusivamente às restrições já incorporadas no modelo s/o, já que os resultados refletiram perfeitamente as condições impostas.

Tabela 6.1 – Extrações ótimas resultantes do modelo s/o.

POÇOS	Extrações Ótimas (m <sup>3</sup> /dia)			
	CENÁRIO I	CENÁRIO II	CENÁRIO III	CENÁRIO IV
P1	1278,607	1321,7	500	500
P2	1441,419	1455,161	600	600
P3	748,6413	763,3159	400	400
P4	1511,16	500	700	700
P5	1786,729	1896,578	608	608
P6	1677,458	1640,569	1000	2153,844
P7	1192,163	879,2794	794	794
P8	0	2290,08	1200	2279,252
P9	2497,806	500	800	2172,804
P10	3254,178	2451,11	1000	1000
P11	0	500	771	771
P12	0	829,4081	750	820,4471
P13	2412,573	3066,665	680	2727,017
P14	0	500	900	1766,528
P15	0	500	790	565,5453
P16	1713,048	500	632	632
P17	2464,951	500	580	683,2034
P18	4075,316	3757,66	550	3438,172
P19	0	500	598	500
P20	1174,961	1629,281	1100	500
P21	0	3731,836	780	3231,532
P22	5685,805	500	900	3057,958
P23	0	2995,251	850	1457,366
P24	0	500	1704	1704
P25	0	500	1361	1361
P26	0	500	650	500
P27	0	814,8809	550	500
P28	2972,886	500	1500	500
P29	0	2204,215	1601	1601
P30	0	542,9705	885	500
P31	2814,721	1695,26	1682	1682
P32	0	500	978	965,8737
P33	0	2192,106	1115	500
P34	0	1611,705	803	803
P35	5156,26	500	597	500
P36	0	500	615	500
P37	2999,543	500	1562	1562
P38	0	2631,784	798	2145,026
P39	0	500	545	545
P40	0	500	889	500
P41	2550,577	500	653	2330,189
P42	3571,964	500	714	3402,912
P43	0	500	625	500

P44	0	1694,784	1294	1294
P45	2432,405	1634,834	824	1457,599
P46	0	2627,979	890	500
P47	1599,568	500	700	500
P48	2448,734	500	800	500
P49	0	1419,854	900	1435,678
P50	2285,016	1968,221	1500	2098,542

As Funções Objetivo (F.O.) alcançaram o valor máximo, igual à recarga no aquífero, de cerca de 61.747 m<sup>3</sup>/dia nos cenários I, II e IV. Existe a possibilidade de haver múltiplas soluções ótimas que se reduzirão quando o sistema estiver mais próximo do limite estabelecido pelas restrições.

A obtenção do somatório de retiradas igual à recarga é de certa forma esperado, uma vez que os rebaixamentos são muito pequenos e a permissão de retirada de até 80% da carga hidráulica inicial nos poços constitui-se em uma grande faixa de água subterrânea. A grande vantagem na aplicação do modelo, nestes casos, é a orientação de como poderão ser feitas estas distribuições nos poços. Para o cenário III o somatório das demandas foi inferior ao limite da recarga, ficando a F.O. com um valor de 44.218 m<sup>3</sup>/dia, havendo portanto, neste caso, disponibilidade de água para ingresso de novos usuários.

#### **6.2.1.2 – Cenário V**

A condição de um maior armazenamento de água no aquífero aplicada às situações estabelecidas nos cenários I, II, III e IV, permitiram uma maior discussão em relação à quantificação e disposição das captações de água nos poços.

##### **6.2.1.2.1 – Cenário I**

Para o cenário I a redução das possibilidades de retirada de água nos poços, para 60 e 40% da carga hidráulica inicial, implicaram na redução do somatório de retiradas do aquífero, refletido através da função objetivo, e em uma redistribuição das localizações das captações, como mostra a tabela 6.2. Estas novas distribuições de retiradas são decorrentes das “folgas” ainda remanescentes nestes poços (tabela 6.3), ou seja, em localidades que

ainda havia água armazenada, e a busca para atender a maior demanda de água captada no aquífero, fez com que a retirada nestes locais também fosse processada.

Tabela 6.2 – Retiradas “ótimas” obtidas para o cenário V aplicado ao cenário I

Poços	80%	60%	40%
P1	1278,607	932,8139	621,876
P2	1441,419	1124,681	749,7872
P3	748,6413	563,6475	375,7651
P4	1511,16	963,3828	642,2552
P5	1786,729	1096,277	730,8511
P6	1677,458	1222,885	815,2568
P7	1192,163	599,9847	399,9898
P8	0	1327,147	884,7646
P9	2497,806	1451,682	967,788
P10	3254,178	1590,94	1060,627
P11	0	518,6617	345,7746
P12	0	375,6861	250,4574
P13	2412,573	1786,011	1190,674
P14	0	1124,052	749,3679
P15	0	231,6498	154,4332
P16	1713,048	602,9202	401,947
P17	2464,951	1636,454	1090,969
P18	4075,316	2343,283	1562,189
P19	0	821,0605	547,3737
P20	1174,961	640,4528	426,9685
P21	0	2287,933	1525,289
P22	5685,805	2024,672	1349,782
P23	0	1475,23	983,4868
P24	0	1300,195	866,7969
P25	0	904,5655	603,0436
P26	0	0	0
P27	0	0	0
P28	2972,886	912,8469	608,5646
P29	0	1182,233	788,1553
P30	0	0	0
P31	2814,721	879,7938	586,5292
P32	0	1646,211	1097,474
P33	0	801,8065	534,5377
P34	0	704,6844	469,7896
P35	5156,26	2076,478	1384,319
P36	0	703,1498	468,7666
P37	2999,543	1018,556	679,0372
P38	0	0	0
P39	0	290,4869	193,6579
P40	0	735,2787	490,1858
P41	2550,577	1534,194	1022,796

<b>P42</b>	3571,964	2156,473	1437,649
<b>P43</b>	0	538,1523	358,7683
<b>P44</b>	0	624,3856	416,2571
<b>P45</b>	2432,405	1647,815	1098,543
<b>P46</b>	0	1096,928	731,2851
<b>P47</b>	1599,568	445,5016	297,001
<b>P48</b>	2448,734	1456,034	970,6891
<b>P49</b>	0	682,171	454,7807
<b>P50</b>	2285,016	1434,813	956,5419
<b>F.O</b>	<b>61746,49</b>	<b>51514,26</b>	<b>34342,84</b>

Tabela 6.3 - Folgas existentes nas restrições de rebaixamento para o Cenário I.

<b>Poços</b>	<b>80%</b>	<b>60%</b>	<b>40%</b>	<b>Poços</b>	<b>80%</b>	<b>60%</b>	<b>40%</b>
<b>P1</b>	0	0	0	<b>P26</b>	4273,435	922,1837	614,7892
<b>P2</b>	0	0	0	<b>P27</b>	2909,869	0	0
<b>P3</b>	0	0	0	<b>P28</b>	0	8,866075	5,910669
<b>P4</b>	0	0	0	<b>P29</b>	5347,523	0	0
<b>P5</b>	0	0	0	<b>P30</b>	2922,779	76,99139	51,32759
<b>P6</b>	0	0	0	<b>P31</b>	0	0	0
<b>P7</b>	0	0	0	<b>P32</b>	5223,386	0	0
<b>P8</b>	2414,36	0	0	<b>P33</b>	3953,997	0	0
<b>P9</b>	0	0	0	<b>P34</b>	2794,726	0	0
<b>P10</b>	0	0	0	<b>P35</b>	0	0	0
<b>P11</b>	2039,998	0	0	<b>P36</b>	3029,979	0	0
<b>P12</b>	2097,883	0	0	<b>P37</b>	0	0	0
<b>P13</b>	0	0	0	<b>P38</b>	2943,599	1242,975	828,65
<b>P14</b>	3952,221	0	0	<b>P39</b>	2511,575	0	0
<b>P15</b>	2589,538	0	0	<b>P40</b>	2707,752	0	0
<b>P16</b>	0	0	0	<b>P41</b>	0	0	0
<b>P17</b>	0	0	0	<b>P42</b>	0	0	0
<b>P18</b>	0	0	0	<b>P43</b>	2162,58	0	0
<b>P19</b>	4258,38	0	0	<b>P44</b>	1888,017	0	0
<b>P20</b>	2114,628	0	0	<b>P45</b>	0	0	0
<b>P21</b>	5436,453	0	0	<b>P46</b>	2701,595	0	0
<b>P22</b>	0	0	0	<b>P47</b>	0	0	0
<b>P23</b>	4657,94	0	0	<b>P48</b>	0	0	0
<b>P24</b>	4766,862	0	0	<b>P49</b>	1480,475	0	0
<b>P25</b>	4015,892	0	0	<b>P50</b>	0	0	0

#### 6. 2.1.2.2 – Cenário II

A aplicação de novos percentuais para o cálculo da permanência de água nos poços localizados no aquífero dos Ingleses ao cenário II teve, para percentuais máximos de

rebaixamento de 80 e 60% da carga hidráulica inicial do poço resultados semelhantes ao que ocorreu no cenário I. A função objetivo apresentou valor menor quando houve menos disponibilidade de água para extração (tabela 6.4).

Tabela 6.4 – Extrações “ótimas” obtidas com a redução do rebaixamento para o cenário II

Poços	80%	60%	Poços	80%	60%
P1	1321,7	932,4052	P26	500	500
P2	1455,161	1104,907	P27	814,8809	500
P3	763,3159	566,0871	P28	500	500
P4	500	964,1776	P29	2204,215	500
P5	1896,578	1097,459	P30	542,9705	500
P6	1640,569	1218,934	P31	1695,26	1009,283
P7	879,2794	536,8804	P32	500	1995,05
P8	2290,08	1328,764	P33	2192,106	500
P9	500	1452,163	P34	1611,705	630,33
P10	2451,11	1746,236	P35	500	1837,701
P11	500	587,4107	P36	500	500
P12	829,4081	500	P37	500	500
P13	3066,665	1755,232	P38	2631,784	500
P14	500	500	P39	500	500
P15	500	500	P40	500	500
P16	500	585,0457	P41	500	1728,789
P17	500	1662,707	P42	500	2074,743
P18	3757,66	2363,367	P43	500	500
P19	500	500	P44	1694,784	509,1762
P20	1629,281	939,4307	P45	1634,834	1556,387
P21	3731,836	2309,723	P46	2627,979	1136,561
P22	500	2340,615	P47	500	500
P23	2995,251	500	P48	500	1419,254
P24	500	500	P49	1419,854	699,0821
P25	500	1465,415	P50	1968,221	1407,177
			<b>F.O</b>	<b>61746,49</b>	50460,49

Entretanto, a redução para 40% não atendeu à demanda inicialmente estabelecida que é de  $X_i = 500\text{m}^3/\text{dia}$  para alguns poços já em operação. Partindo da hipótese de que o órgão gestor ao iniciar o procedimento de outorga já encontrou os usuários com os poços em operação, com retiradas correspondentes a  $X_i$  em cada um deles e, sabendo-se que deve-se limitar os rebaixamentos em 40%, por questões de sustentabilidade do aquífero, uma situação de conflito está estabelecida e critérios de procedimentos para redução devem ser adotados com o objetivo de compatibilizar as ofertas às demandas.

Existindo um comitê de bacia, este poderá decidir qual o critério que irá adotar para a redução das retiradas de água no aquífero. Algumas opções que atendem às restrições, como o emprego de  $X_i$  igual a 200, 300, 400 e  $450\text{m}^3/\text{dia}$  para todos os poços já implantados, estão apresentadas na tabela 6.5. Um outro resultado possível também está exposto na mesma tabela, em que se buscou retirar a maior quantidade de água possível sem, no entanto, se preocupar com uma redução igualmente proporcional para todos mas, tentando-se alcançar as captações anteriormente realizadas por eles( $500\text{m}^3/\text{dia}$ ). Os limites inferiores diferenciados adotados estão apresentados na tabela 6.6.

Tabela 6.5 – Retiradas “ótimas” obtidas para o cenário II com diferentes valores de  $X_i$

	Valores de $X_i$ ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )				
	200	300	400	450	vários
<b>P1</b>	621,6574	621,6132	621,6639	621,3187	621,1472
<b>P2</b>	750,8707	741,8574	754,614	521,5503	521,5503
<b>P3</b>	375,2418	373,7896	400	450	450
<b>P4</b>	642,8691	642,8854	642,3638	643,416	643,7813
<b>P5</b>	731,8797	731,8413	730,9828	733,4523	734,3571
<b>P6</b>	806,1473	811,7514	893,0849	450	450
<b>P7</b>	357,3299	355,419	400	450	450
<b>P8</b>	884,3729	885,0445	887,3589	885,0489	884,9347
<b>P9</b>	965,2158	967,4759	969,718	948,864	941,1514
<b>P10</b>	1063,929	1123,119	636,3259	450	450
<b>P11</b>	387,7047	408,39	400	450	450
<b>P12</b>	268,7278	300	400	450	450
<b>P13</b>	1177,843	1173,395	1177,582	1191,416	1196,475
<b>P14</b>	760,6513	484,2403	400	450	450
<b>P15</b>	200	300	400	450	450
<b>P16</b>	388,2636	412,4238	400	450	450
<b>P17</b>	1105,677	1104,716	1095,378	1101,651	1101,211
<b>P18</b>	1588,243	1584,53	1550,094	1606,916	1622,505
<b>P19</b>	472,6561	300	400	450	450
<b>P20</b>	526,6416	612,1115	701,4554	450	450
<b>P21</b>	1541,398	1532,257	1548,94	1689,72	1752,913
<b>P22</b>	1408,174	1508,076	1549,602	952,2308	743,7695
<b>P23</b>	1063,536	588,3817	400	450	450
<b>P24</b>	200	300	400	450	450
<b>P25</b>	886,4348	975,162	400	450	450
<b>P26</b>	200	300	400	450	500
<b>P27</b>	200	300	400	450	450
<b>P28</b>	200	300	400	450	450
<b>P29</b>	200	300	400	450	500
<b>P30</b>	200	300	400	450	500

<b>P31</b>	723,572	437,3902	400	450	500
<b>P32</b>	1221,071	1260,783	1534,416	1073,83	872,5603
<b>P33</b>	467,427	300	400	450	500
<b>P34</b>	530,9942	749,9517	473,4239	450	500
<b>P35</b>	1402,609	1433,208	504,991	822,9407	500
<b>P36</b>	370,396	300	400	450	500
<b>P37</b>	710,6695	407,152	400	450	500
<b>P38</b>	200	300	400	450	500
<b>P39</b>	200	300	400	450	500
<b>P40</b>	512,5361	300	400	450	500
<b>P41</b>	1043,656	1119,335	1145,101	1140,441	500
<b>P42</b>	1379,466	1373,756	1324,926	450	500
<b>P43</b>	351,9714	300	400	450	500
<b>P44</b>	378,5866	458,357	400	450	500
<b>P45</b>	1041,786	1034,71	957,4799	895,8912	998,9057
<b>P46</b>	743,1927	741,7217	400	450	500
<b>P47</b>	306,7133	315,558	400	450	500
<b>P48</b>	945,1122	950,2531	1046,062	1148,852	856,4697
<b>P49</b>	450,7465	462,9725	513,7293	450	500
<b>P50</b>	954,8184	946,3969	924,6487	964,7009	984,4972
<b>F.O</b>	<b>34110,79</b>	<b>33830,03</b>	<b>32983,94</b>	<b>31792,24</b>	<b>31176,23</b>

Tabela 6.6 – Limites inferiores diferenciados adotados para a captação no cenário II.

<b>P1 &gt;= 500</b>	<b>P11 &gt;= 450</b>	<b>P21 &gt;= 500</b>	<b>P31 &gt;= 500</b>	<b>P41 &gt;= 500</b>
<b>P2 &gt;= 450</b>	<b>P12 &gt;= 450</b>	<b>P22 &gt;= 500</b>	<b>P32 &gt;= 500</b>	<b>P42 &gt;= 500</b>
<b>P3 &gt;= 450</b>	<b>P13 &gt;= 500</b>	<b>P23 &gt;= 450</b>	<b>P33 &gt;= 500</b>	<b>P43 &gt;= 500</b>
<b>P4 &gt;= 500</b>	<b>P14 &gt;= 450</b>	<b>P24 &gt;= 450</b>	<b>P34 &gt;= 500</b>	<b>P44 &gt;= 500</b>
<b>P5 &gt;= 500</b>	<b>P15 &gt;= 450</b>	<b>P25 &gt;= 450</b>	<b>P35 &gt;= 500</b>	<b>P45 &gt;= 500</b>
<b>P6 &gt;= 450</b>	<b>P16 &gt;= 450</b>	<b>P26 &gt;= 500</b>	<b>P36 &gt;= 500</b>	<b>P46 &gt;= 500</b>
<b>P7 &gt;= 450</b>	<b>P17 &gt;= 500</b>	<b>P27 &gt;= 450</b>	<b>P37 &gt;= 500</b>	<b>P47 &gt;= 500</b>
<b>P8 &gt;= 500</b>	<b>P18 &gt;= 500</b>	<b>P28 &gt;= 450</b>	<b>P38 &gt;= 500</b>	<b>P48 &gt;= 500</b>
<b>P9 &gt;= 500</b>	<b>P19 &gt;= 450</b>	<b>P29 &gt;= 500</b>	<b>P39 &gt;= 500</b>	<b>P49 &gt;= 500</b>
<b>P10 &gt;= 450</b>	<b>P20 &gt;= 450</b>	<b>P30 &gt;= 500</b>	<b>P40 &gt;= 500</b>	<b>P50 &gt;= 500</b>

A adoção de um ou outro limite inferior ( $X_i$ ) dependerá da disposição e/ou da necessidade dos usuários em utilizar a maior quantidade de água permitida ou reservar água para futuros usos. Observa-se ainda que quanto menor o limite inferior maior é o valor da função objetivo, pois desta forma há um maior desprendimento do modelo em alocar as retiradas naqueles poços que proporcionam uma maximização das extrações, ou seja, um aumento da F.O.. Não se pode deixar de lembrar, entretanto, que adotando-se maiores limites inferiores está se buscando atender a captação nos poços já existentes. Os novos

usuários terão que se adequar àquelas possibilidades restantes e, a depender de onde ele deseje se instalar, haverá uma maior ou menor disponibilidade de água.

Outras opções podem ser adotadas, supondo que os usuários já existentes optem por utilizar retiradas diferenciadas, de acordo com as suas necessidades, então novas simulações poderão então ser efetuadas para as novas condições.

### 6.2.1.2.3 – Cenário III

O cenário III apresenta extrações fixas em alguns poços, conforme tabela 6.7, e a suposição de que outros estejam desejando começar as retiradas. Inicialmente, os novos usuários pretendem realizar captações não inferiores a 500 m<sup>3</sup>/dia porém, na verdade, vislumbram maiores vazões, sendo estas as que requisitam. O órgão gestor, então, impõe como limite superior de retiradas ( $T_i$ ) as vazões requeridas pelos solicitantes. A aplicação dos percentuais de 80 e 60% dos rebaixamentos para o cenário III, da mesma forma que ocorreu para o II, não apresentou problemas, conforme exposto na tabela 6.8. Porém, para o percentual de 40% reduções nas extrações terão que ser efetuadas, tanto para os antigos quanto para os novos usuários (figura 6.2), buscando-se atender a esta restrição.

Tabela 6.7- Extrações (em m<sup>3</sup>/dia) fixas em alguns poços do cenário III

<b>P1 = 500</b>	<b>P5 = 608</b>	<b>P16 = 632</b>	<b>P31 = 1682</b>	<b>P44 = 1294</b>
<b>P2 = 600</b>	<b>P7 = 794</b>	<b>P24 = 1704</b>	<b>P34 = 803</b>	
<b>P3 = 400</b>	<b>P10 = 1000</b>	<b>P25 = 1361</b>	<b>P37 = 1562</b>	
<b>P4 = 700</b>	<b>P11 = 771</b>	<b>P29 = 1601</b>	<b>P39 = 545</b>	

Tabela 6.8 - Extrações “ótimas” obtidas com a redução do rebaixamento para o cenário III.

<b>Poços</b>	<b>80%</b>	<b>60%</b>	<b>Poços</b>	<b>80%</b>	<b>60%</b>
<b>P1</b>	500	500	<b>P26</b>	650	500
<b>P2</b>	600	600	<b>P27</b>	550	500
<b>P3</b>	400	400	<b>P28</b>	1500	500
<b>P4</b>	700	700	<b>P29</b>	1601	1601
<b>P5</b>	608	608	<b>P30</b>	885	500
<b>P6</b>	1000	1000	<b>P31</b>	1682	1682
<b>P7</b>	794	794	<b>P32</b>	978	500
<b>P8</b>	1200	1200	<b>P33</b>	1115	500
<b>P9</b>	800	800	<b>P34</b>	803	803
<b>P10</b>	1000	1000	<b>P35</b>	597	500

<b>P11</b>	771	771	<b>P36</b>	615	500
<b>P12</b>	750	561,5261	<b>P37</b>	1562	1562
<b>P13</b>	680	680	<b>P38</b>	798	500
<b>P14</b>	900	500	<b>P39</b>	545	545
<b>P15</b>	790	500	<b>P40</b>	889	500
<b>P16</b>	632	632	<b>P41</b>	653	500
<b>P17</b>	580	580	<b>P42</b>	714	639,7902
<b>P18</b>	550	550	<b>P43</b>	625	500
<b>P19</b>	598	500	<b>P44</b>	1294	1294
<b>P20</b>	1100	500	<b>P45</b>	824	824
<b>P21</b>	780	500	<b>P46</b>	890	890
<b>P22</b>	900	500	<b>P47</b>	700	700
<b>P23</b>	850	500	<b>P48</b>	800	800
<b>P24</b>	1704	1704	<b>P49</b>	900	900
<b>P25</b>	1361	1361	<b>P50</b>	1500	1500
			<b>F.O</b>	<b>44218</b>	<b>37682,32</b>

Várias possibilidades de redução foram testadas, seguindo dois critérios para isto: 1) a média das captações e; 2) percentuais equivalentes de decréscimo para todos os usuários já em atividade no aquífero.

Após a constatação do não atendimento da totalidade das retiradas, atuais e futuras, deu-se início a uma série de tentativas visando atender da melhor forma possível as demandas. As alternativas que obtiveram êxito foram (tabela 6.9):

- 1) redução de 20% das retiradas nos poços já existentes na zona com maiores conflitos (figura 6.3), e a não adoção de limites inferiores de retiradas para os usos futuros;
- 2) na região que inclui os poços 2, 3, 7, 10, 11 e 16, que mostrou-se mais sensível, uma outra opção para buscar a melhor solução foi estudada. Neste caso, uma média das retiradas dos mesmos foi calculada e aplicada naqueles com extração superior a esta média (poços 7, 10 e 11) conforme a tabela 6.10. Semelhante à alternativa anterior, não houve restrição de limite inferior para os futuros usuários;
- 3) Nesta alternativa, a preocupação está em inserir um limite mínimo para captação de usuários futuros. As vazões obtidas como entrada para todos os poços estão apresentadas na tabela 6.11. Na figura 6.4 podem ser observadas as áreas de captação diferenciadas obtidas a partir das simulações realizadas. Para os poços já em funcionamento, as reduções foram feitas com base em médias de vazões nas regiões determinadas, que foram aplicadas naqueles que a ultrapassavam. Estas

médias foram calculadas da seguinte forma: Na região 1 esta média incluiu todos os poços da mesma, 794 m<sup>3</sup>/dia; Com os poços P24 e P31 foi obtida a média de 1693 m<sup>3</sup>/dia para a região 2; Uma nova média com os poços P44, P39, P34 e P37 foi gerada (1051 m<sup>3</sup>/dia) sem, no entanto, seguir os padrões de região anteriormente adotado;

- 4) Nesta opção foram fixados para todos os poços em operação uma redução equitativa proporcional de 20% além de limites superiores de retiradas de 1000 m<sup>3</sup>/dia. Esta sistemática foi estabelecida para os poços atuais em substituição às médias e, para os demais, o mesmo procedimento da alternativa anterior, conforme tabela 6.12 de entradas de vazões.

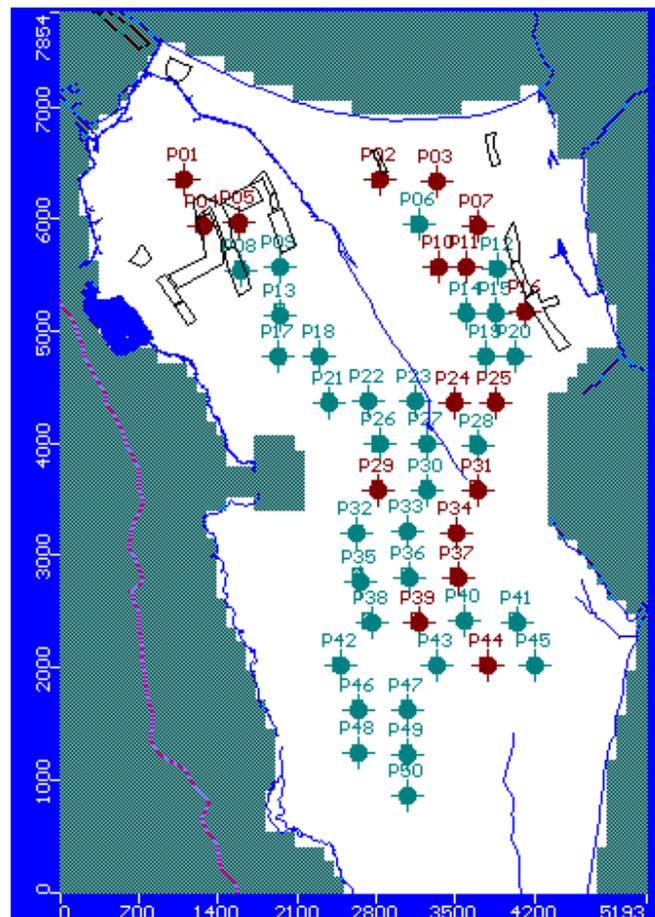


Figura 6.2 – Configuração dos poços em operação (**vermelho**) e com instalações previstas (**verde**).

Tabela 6.9 – Vazões “ótimas” para as alternativas consideradas no cenário III

	1	2	3	4		1	2	3	4
<b>P1</b>	500	500	500	500	<b>P26</b>	0	0	100	400
<b>P2</b>	480	600	600	480	<b>P27</b>	0	0	100	500
<b>P3</b>	320	400	400	320	<b>P28</b>	0	0	100	200
<b>P4</b>	700	700	700	700	<b>P29</b>	1601	1601	1601	1000
<b>P5</b>	608	608	608	608	<b>P30</b>	0	0	100	300
<b>P6</b>	944,964	465,1208	11,14631	354,6795	<b>P31</b>	1682	1682	1682	1000
<b>P7</b>	635,2	699,5	794	635,2	<b>P32</b>	0	0	100	300
<b>P8</b>	1200	1200	1200	1200	<b>P33</b>	0	0	100	300
<b>P9</b>	800	800	800	800	<b>P34</b>	803	803	803	642,4
<b>P10</b>	800	699,5	794	800	<b>P35</b>	0	0	100	300
<b>P11</b>	616,8	699,5	771	616,8	<b>P36</b>	0	0	100	300
<b>P12</b>	0	0	0	200	<b>P37</b>	1562	1562	1051	1249,6
<b>P13</b>	680	680	680	680	<b>P38</b>	0	0	100	300
<b>P14</b>	0	0	0	200	<b>P39</b>	545	545	545	436
<b>P15</b>	0	0	0	200	<b>P40</b>	0	0	100	300
<b>P16</b>	505,6	632	632	505,6	<b>P41</b>	0	0	100	300
<b>P17</b>	580	580	580	580	<b>P42</b>	0	0	100	300
<b>P18</b>	550	550	452,7608	550	<b>P43</b>	0	0	100	300
<b>P19</b>	0	0	0	200	<b>P44</b>	1294	1294	1051	1000
<b>P20</b>	0	0	0	200	<b>P45</b>	361,6201	361,6201	824	300
<b>P21</b>	305,8139	168,3546	100	780	<b>P46</b>	526,2313	526,2313	100	300
<b>P22</b>	0	0	100	900	<b>P47</b>	0	0	100	300
<b>P23</b>	0	0	100	568,2596	<b>P48</b>	800	800	800	800
<b>P24</b>	1704	1704	1693	1000	<b>P49</b>	900	900	900	484,9266
<b>P25</b>	1361	1361	794	1000	<b>P50</b>	1045,668	1045,668	1081,735	1105,295
					<b>F.O</b>	<b>24411,9</b>	<b>24167,49</b>	<b>24148,64</b>	<b>27296,76</b>

Tabela 6.10 - Extrações (em m<sup>3</sup>/dia) fixas em alguns poços do cenário III- 2<sup>a</sup> alternativa

<b>P1 = 500</b>	<b>P5 = 608</b>	<b>P16 = 632</b>	<b>P31 = 1682</b>	<b>P44 = 1294</b>
<b>P2 = 600</b>	<b>P7 = 699,5</b>	<b>P24 = 1704</b>	<b>P34 = 803</b>	
<b>P3 = 400</b>	<b>P10 = 699,5</b>	<b>P25 = 1361</b>	<b>P37 = 1562</b>	
<b>P4 = 700</b>	<b>P11 = 699,5</b>	<b>P29 = 1601</b>	<b>P39 = 545</b>	

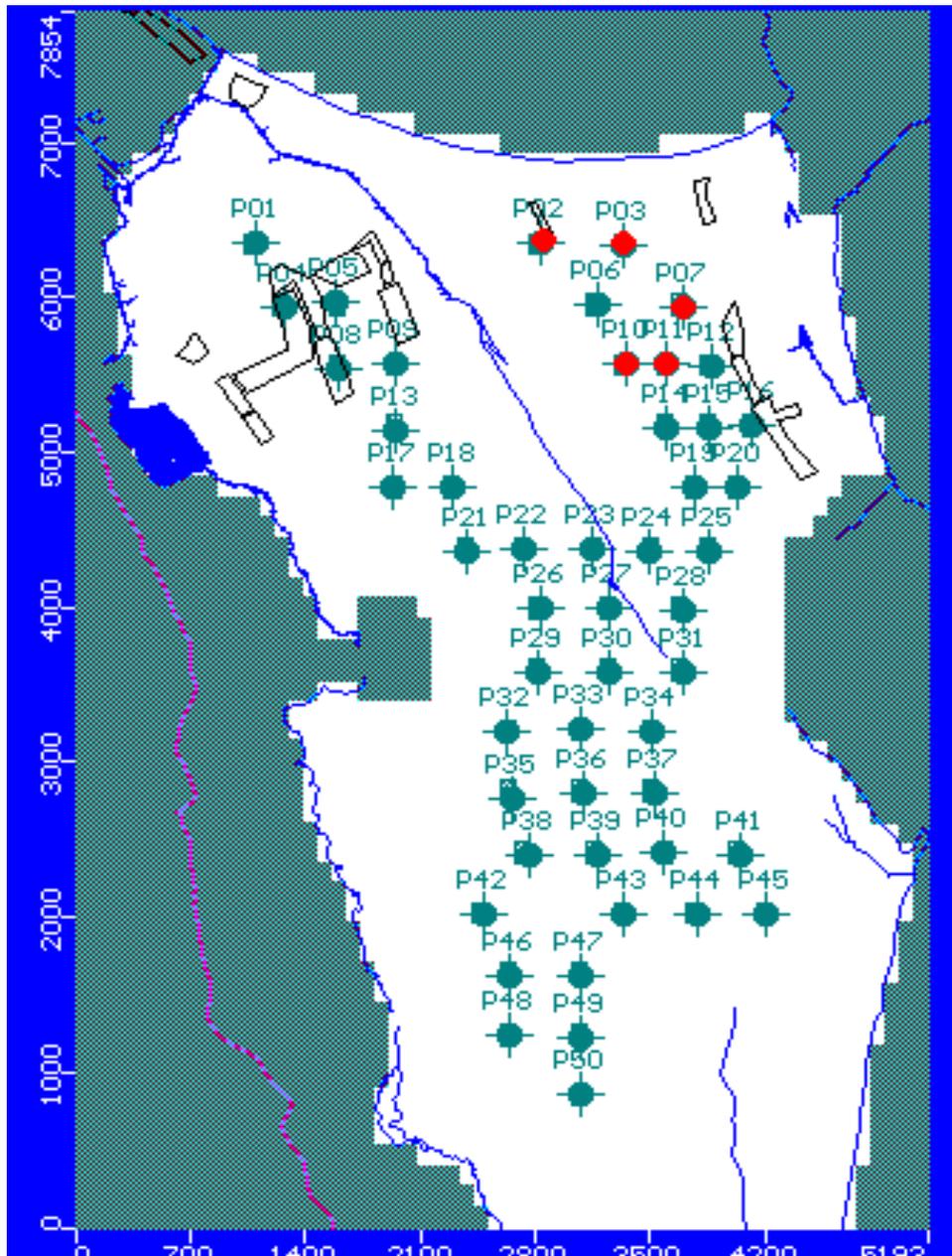
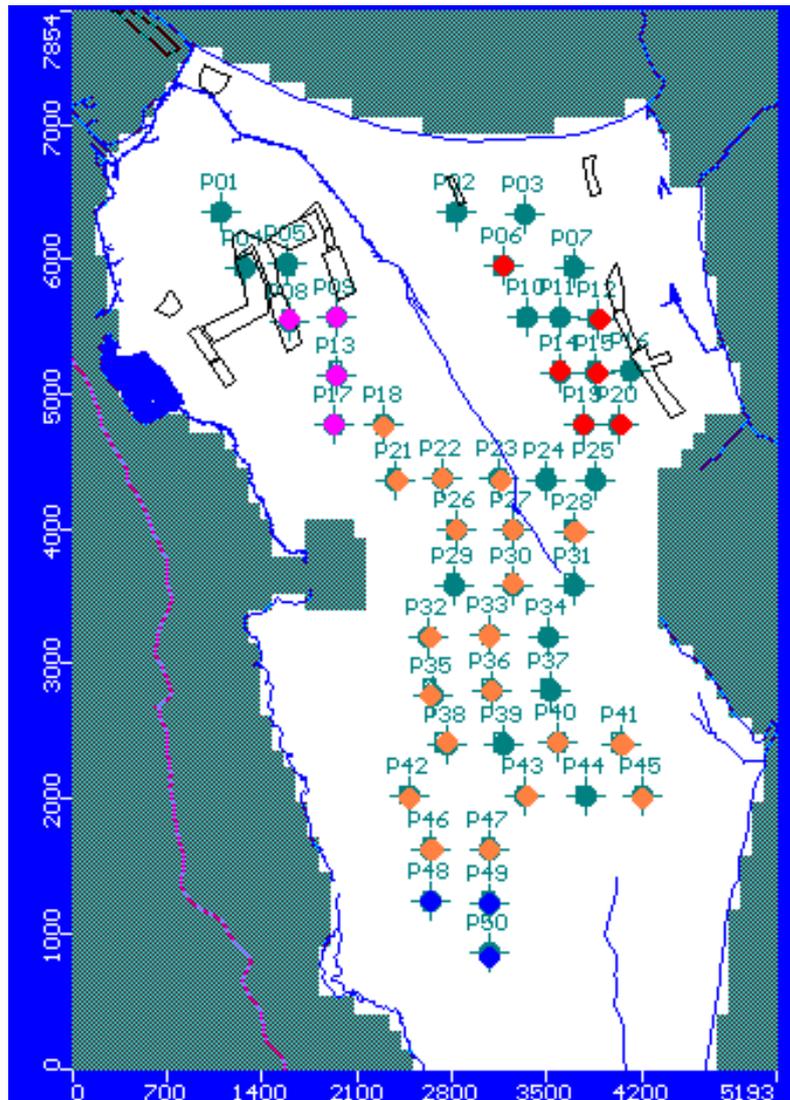


Figura 6.3 - Poços, em vermelho, localizados na região de maior conflito observado



- Não são permitidas extrações – região 1
- Extrações de 100m<sup>3</sup>/dia são admitidas - região 2
- Extrações de 300m<sup>3</sup>/dia são admitidas – região 3
- Extrações de 500m<sup>3</sup>/dia são admitidas – região 4
- Poços já existentes

Figura 6.4 – Regiões estabelecidas para o aquífero através das simulações

Tabela 6.11 - Extrações (em m<sup>3</sup>/dia) estabelecidas na 3ª alternativa do cenário III

Poços atuais		Poços futuros			
P1 = 500	P16 = 632	P6 >= 0	P18 >= 100	P28 >= 100	P41 >= 100
P2 = 600	P24 = 1693	P8 >= 500	P19 >= 0	P30 >= 100	P42 >= 100
P3 = 400	P25 = 794	P9 >= 500	P20 >= 0	P32 >= 100	P43 >= 100
P4 = 700	P29 = 1601	P12 >= 0	P21 >= 100	P33 >= 100	P45 >= 100
P5 = 608	P31 = 1682	P13 >= 500	P22 >= 100	P35 >= 100	P46 >= 100
P7 = 794	P34 = 803	P14 >= 0	P23 >= 100	P36 >= 100	P47 >= 100
P10 = 794	P37 = 1051	P15 >= 0	P26 >= 100	P38 >= 100	P48 >= 300
P11 = 771	P39 = 545	P17 >= 500	P27 >= 100	P40 >= 100	P49 >= 300
	P44 = 1051				P50 >= 300

Tabela 6.12 - Extrações (em m<sup>3</sup>/dia) estabelecidas na 4ª alternativa do cenário III

Poços atuais		Poços futuros			
P1 = 500	P16 = 505.6	P6 >= 200	P18 >= 500	P28 >= 200	P41 >= 300
P2 = 480	P24 = 1000	P8 >= 500	P19 >= 200	P30 >= 300	P42 >= 300
P3 = 320	P25 = 1000	P9 >= 500	P20 >= 200	P32 >= 300	P43 >= 300
P4 = 700	P29 = 1000	P12 >= 200	P21 >= 400	P33 >= 300	P45 >= 300
P5 = 608	P31 = 1000	P13 >= 500	P22 >= 400	P35 >= 300	P46 >= 300
P7 = 635.2	P34 = 642.4	P14 >= 200	P23 >= 400	P36 >= 300	P47 >= 300
P10 = 800	P37 = 1000	P15 >= 200	P26 >= 400	P38 >= 300	P48 >= 300
P11 = 616.8	P39 = 436	P17 >= 500	P27 >= 500	P40 >= 300	P49 >= 300
	P44 = 1000				P50 >= 300

Supondo agora que o processo de outorga inicie com rebaixamentos máximos de 40% de  $h_0$ . De acordo com o que está apresentado na figura 6.4 percebe-se que em algumas regiões não são mais admitidas retiradas e para a inserção de mais algum empreendimento naquela localidade, duas opções podem ser consideradas. A primeira seria captar água em algum outro ponto ainda permitido e transportá-la até o local em que o empreendedor estime ser melhor para o seu estabelecimento a segunda hipótese seria a de se instalar no local em que as retiradas ainda sejam permitidas.

Os custos referentes às duas possibilidades terão que ser analisados tanto do ponto de vista do empreendedor quanto da sociedade. Caso seja mais vantajoso para o empreendedor arcar com os custos do transporte e se instalar no local desejado, esta será a sua escolha, caso contrário, ele mudará o ponto de fixação do empreendimento. Porém, a

sociedade pode ter benefícios decorrentes da instalação que compense uma ampliação no limite do rebaixamento passando para 60% de  $h_0$ , por exemplo. Neste caso duas outras situações referentes aos custos irão ocorrer: 1) a própria sociedade arcaria com os custos dos rebaixamentos decorrentes do bombeamento em um poço nas vizinhanças visto que os benefícios da sua instalação superam os custos; 2) o novo usuário pagaria pelos novos custos proporcionados aos antigos, nas vizinhanças do novo poço, uma vez que o cone de rebaixamento será alterado e novos gastos de energia surgirão em virtude da nova profundidade de extração para os que forem atingidos.

#### **6.2.1.2.4 – Cenário IV**

Os resultados obtidos para o cenário III podem ser também empregados neste cenário, uma vez que o que os diferencia são os acréscimos constantes no cenário IV para os limites superiores de extração.

#### **6. 2.1.3 – Cenário VI**

A tabela 6.13 apresenta duas situações de localização de um poço de extração para a simulação da outorga de direito de uso da água. No primeiro caso, figura 6.5, a localização desejada do poço é em um ponto central do aquífero com vários poços circunvizinhos. No segundo, figura 6.6, considera-se que o poço será instalado em um ponto mais afastado dos demais estando ainda localizado no mesmo aquífero. Testaram-se dois valores de extração de  $1500\text{m}^3/\text{dia}$  e  $2000\text{m}^3/\text{dia}$  em ambas as situações.

Referindo-se à tabela 6.13, a primeira simulação testada (coluna 2) foi para o caso da não existência dos poços em verificação (poços 12 e 30) tendo para os demais poços, considerados já existentes, vazões mínimas e máximas de 500 e  $1500\text{ m}^3/\text{dia}$ , respectivamente. A segunda (coluna 3) foi para o caso de P12 igual a zero e P30 diferente de zero, adotando-se para isto os mesmos valores máximos e mínimos dos demais poços da situação anterior. Na situação 3 (coluna 4) o poço 12 continua com bombeamento igual a zero e o poço 30 teve sua extração fixada em  $2000\text{ m}^3/\text{dia}$ , sendo a situação 6 (coluna 7) o

inverso desta, ou seja, P12=2000 m<sup>3</sup>/dia e P30=0. A coluna 8 apresenta o resultado comparativo entre estas situações. Finalmente, na situação 4 (coluna 5) admitiu-se P12=0 e P30=1500 m<sup>3</sup>/dia tendo o inverso para a situação 5 (coluna 6), P12=1500m<sup>3</sup>/dia e P30=0 e, mais uma vez, fez-se uma comparação entre os bombeamentos ótimos obtidos que estão apresentados na coluna 9.

Tabela 6.13 – Resultados da simulação de otimização para as situações testadas de bombeamento e localização.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
POÇOS	SIT1	SIT2	SIT3	SIT4	SIT5	SIT6	SIT6-SIT3	SIT5-SIT4
P12	0				1500	2000	xxxxxxx	Xxxxxxx
P21	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P22	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P23	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P24	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P25	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P26	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P27	1485,011	1313,177	695,3048	1500	1357,171	1315,011	619,7058	-142,829
P28	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P29	1500	1500	500	1017,227	1500	1500	1000	482,773
P30	0	598,5843	2000	1500	0	0	xxxxxxx	Xxxxxxx
P31	1500	1500	500	500	1500	1500	1000	1000
P32	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P33	1489,277	1375,1	500	500	1500	1500	1000	1000
P34	1132,925	1012,135	500	500	1155,569	1163,995	663,9946	655,5691
P35	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P36	1415,386	1390,458	1500	1500	1422,343	1425,522	-74,4781	-77,6567
P37	1329,678	1315,157	1500	1500	1333,044	1334,432	-165,568	-166,956
P38	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P39	822,7585	817,313	1038,108	974,1138	824,8208	825,6306	-212,477	-149,293
P40	1160,342	1161,47	1318,066	1267,281	1162,576	1163,337	-154,729	-104,705
P41	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P42	1500	1500	1500	1500	1500	1500	0	0
P43	1456,287	1454,688	1500	1500	1459,31	1460,355	-39,6445	-40,6902
P44	1460,956	1451,877	1402,884	1458,142	1455,036	1453,086	50,20215	-3,10681
P45	1500	1500	1483,688	1483,716	1500	1500	16,31152	16,28418
F.O	34252,62	34389,96	32438,05	33200,48	35669,87	36141,37	3703,32	2469,39

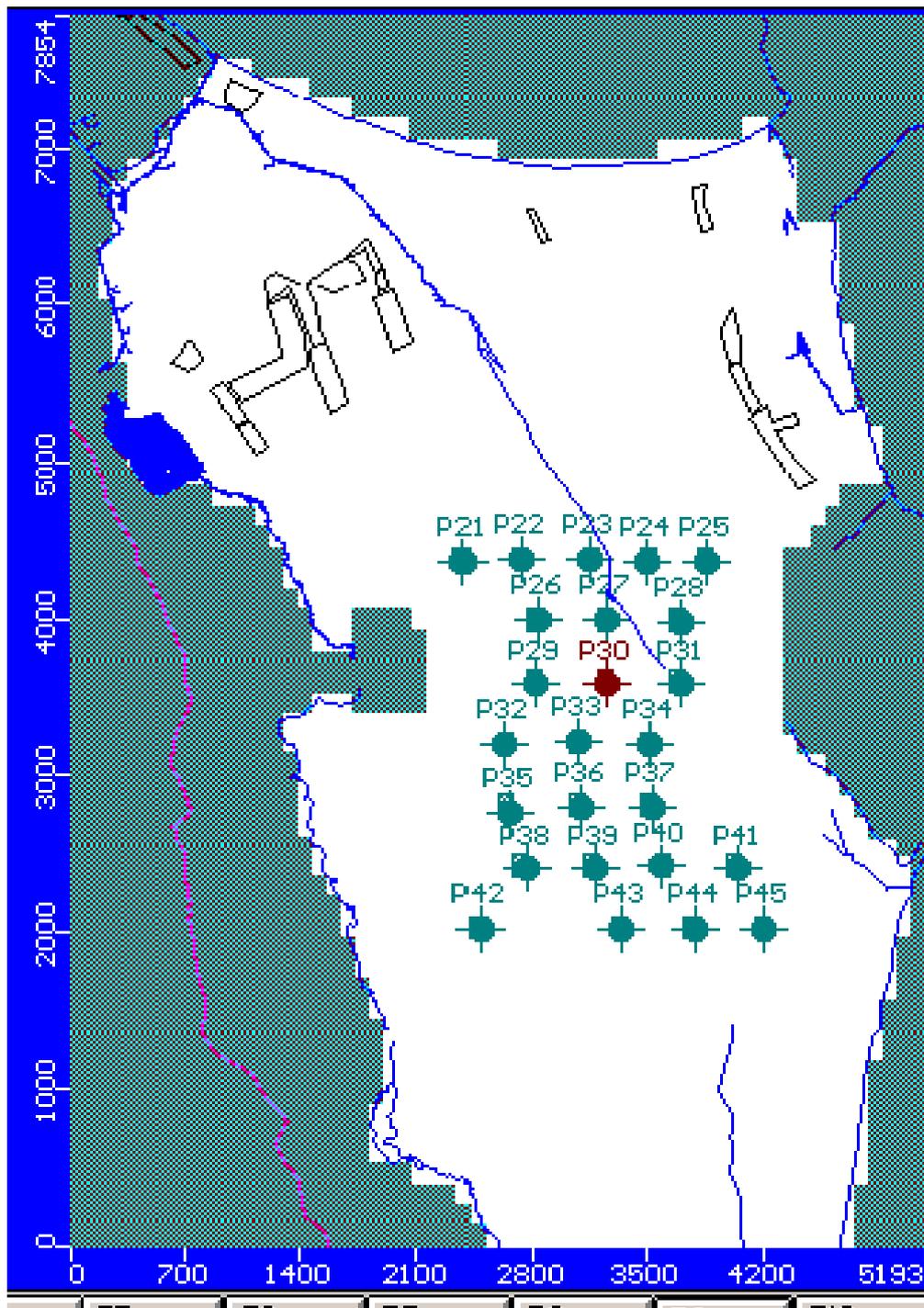


Figura 6.5- Localização de um poço de extração bem próximo aos outros poços supostamente já existentes

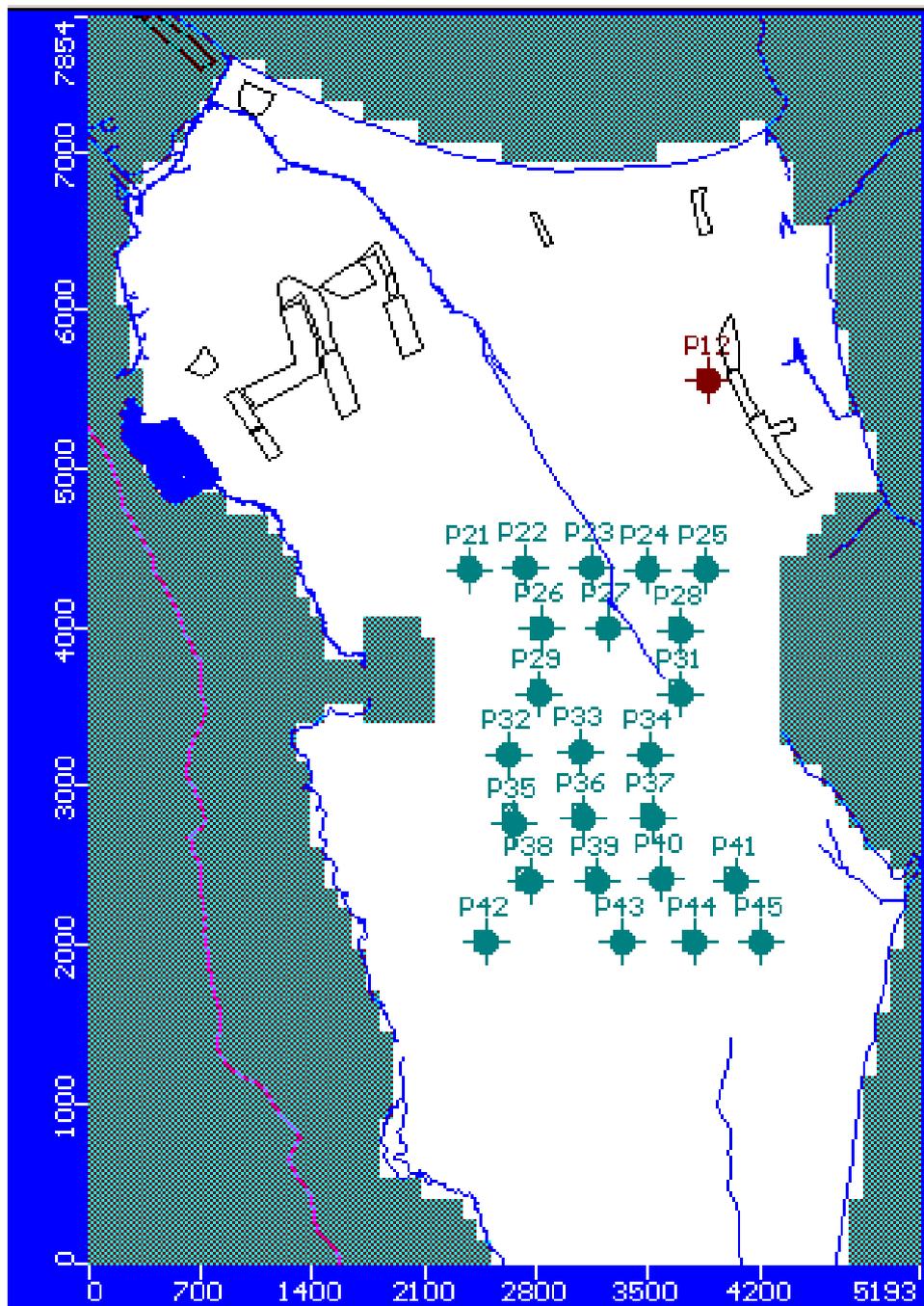


Figura 6.6- Localização de um poço de extração um pouco mais distanciado dos demais poços supostamente já existentes

O que se constatou nos casos abordados foi:

- 1) que os poços localizados nas proximidades do leito do rio sofreram pouca ou nenhuma interferência dos bombeamentos realizados independentemente de onde seja a sua localização, isto provavelmente ocorre devido à manutenção da carga potenciométrica no aquífero causada pela influência do nível da água do rio ;
- 2) não houve um aumento de retiradas em todos os poços, apesar do distanciamento do poço 12, no segundo caso, porém, a função objetivo apresentou valores totais de retiradas maiores. Neste caso constata-se que a localização do poço em um ponto mais distante possibilitará uma maior retirada total de água (observado através da diferença na F.O entre ambos os casos, colunas 8 e 9) uma vez que estará afetando menos as restrições de retiradas impostas. Ou seja, haverá um ganho no percentual total de retirada mesmo que se tenha, pela simulação, resultados de valores ótimos de retiradas menores em alguns poços específicos.
- 3) Pode-se, com isto, estabelecer este fator como um indicador do custo da água para a instalação do poço em uma ou em outra posição. Como a localização de um poço nas proximidades dos demais provoca menor possibilidade de retirada de água, o fator de redução pode ser calculado e, sabendo-se o custo do metro cúbico de água na região, seria este o valor a ser cobrado para a implantação do poço nesta região.

A tabela 6.14 apresenta mais duas análises comparativas realizadas para os dois casos de localização de poços anteriormente citados. São apreciadas as situações com e sem extração de  $1500\text{m}^3/\text{dia}$  e  $2000\text{m}^3/\text{dia}$ , considerando inicialmente que o poço 12 foi instalado (coluna 2 e 4, respectivamente) e, posteriormente, que o poço 30 foi instalado (coluna 3 e 5, respectivamente).

Tabela 6.14 – Análise comparativa da inclusão de poços de bombeamento no aquífero.

1	2	3	4	5
poços	sit5-sit1 (tab. 7.13)	sit4-sit1 (tab. 7.13)	sit6-sit1 (tab. 7.13)	sit3-sit1 (tab. 7.13)
P12	1500	0	2000	0
P21	0	0	0	0
P22	0	0	0	0
P23	0	0	0	0
P24	0	0	0	0
P25	0	0	0	0
P26	0	0	0	0
P27	-127,84	14,98914	-170	-789,706
P28	0	0	0	0
P29	0	-482,773	0	-1000
P30	0	1500	0	2000
P31	0	-1000	0	-1000
P32	0	0	0	0
P33	10,72327	-989,277	10,72327	-989,277
P34	22,64404	-632,925	31,06958	-632,925
P35	0	0	0	0
P36	6,957154	84,61389	10,13574	84,61389
P37	3,366089	170,3221	4,753907	170,3221
P38	0	0	0	0
P39	2,062256	151,3553	2,872009	215,3494
P40	2,233399	106,9387	2,994873	157,7236
P41	0	0	0	0
P42	0	0	0	0
P43	3,022949	43,71314	4,068604	43,71314
P44	-5,92078	-2,81397	-7,87036	-58,0725
P45	0	-16,2842	0	-16,3115
F.O	1417,25	-1052,14	1888,75	-1814,57

Os valores negativos obtidos nestas análises (tabela 6.14) significam que os bombeamentos na otimização com o estabelecimento dos poços foram superiores àqueles ainda sem as suas inserções; para o valor positivo a interpretação é contrária a esta.

Após a interpretação constatou-se que:

1. Os poços que estão localizados nas proximidades do rio não sofrem interferência nas retiradas provavelmente em virtude da manutenção da carga potenciométrica do aquífero por este (poços 21 ao 26 );
2. Os poços situados nas vizinhanças do poço a ser instalado, principalmente quando se trata do poço 30, sofreram um acréscimo no rebaixamento chegando a alcançar o valor mínimo de extração estipulado na restrição. Em

conseqüência disto, os demais poços que antes ficavam reprimidos para atender à restrição da altura mínima de água que deve ser conservada nos poços passaram a ter uma maior folga tendo, portanto, aumentado as suas retiradas.

3. As alterações proporcionadas pela inclusão do poço 12 na maioria dos poços pode ser considerada insignificante, excetuando-se ao o poço 27. O aumento do valor da função objetivo é atribuída ao fato da adição de mais um poço no aquífero.
4. Para a inserção do poço 30, as conseqüências são consideráveis em virtude das grandes modificações decorrentes de sua instalação.O reflexo disto fica evidenciado também no decréscimo do valor da função objetivo.

### **6.2.2 - Minimização dos Custos**

Este modelo de otimização tem como critério de outorga a minimização do custo de energia para a maior retirada de água permitida do aquífero, ou seja, para um volume de captação total igual à recarga do aquífero. A simulação, efetuada para o cenário I, dá ao órgão gestor uma estimativa do volume a partir do qual a quantidade de água extraída por um usuário provocará um custo maior aos demais.A tabela 6.15 apresenta a distribuição de retiradas de água para os 50 poços, supostamente em implantação no aquífero dos Ingleses, que implicará no menor custo de retirada. Assim, caso o proprietário do poço opte por uma extração superior àquela determinada, e desde que atenda às condições de sustentabilidade, o volume de água incremental ( $\Delta V$ ) retirada por um usuário tem custo social igual ao custo incremental de bombeamento de todos os poços que sofrem rebaixamento. Como exemplo está apresentado na mesma tabela uma elevação do volume de água do poço 6.

Tabela 6.15 – Distribuição das captações nos poços considerando a minimização dos custos

Poço	Distribuição de retiradas com menor custo	Distribuição de retiradas para P6=2200m <sup>3</sup> /dia	Decréscimo de retiradas nos demais poços	Aumento de retiradas no Poço 6 e demais poços
P1	1622,5	1623,2		0,7
P2	0,2	0,2	0	
P3	1924,7	1910,3	-14,4	
P4	1743,9	1736,4	-7,5	
P5	1908,1	1899,9	-8,2	
P6	1987,2	2200		212,8
P7	1851,4	1827,5	-23,9	
P8	1713,1	1705,8	-7,3	
P9	1955,6	1947,3	-8,3	
P10	1600	1691,4		91,4
P11	1470,1	1445,8	-24,3	
P12	0	0	0	
P13	1595,1	1588,2	-6,9	
P14	1207	1193,5	-13,5	
P15	1084,6	1074,3	-10,3	
P16	1300,8	1291,2	-9,6	
P17	1119,6	1114,7	-4,9	
P18	1553,3	1546,7	-6,6	
P19	1110,8	1102,2	-8,6	
P20	1079	1071,5	-7,5	
P21	1268,5	1263,3	-5,2	
P22	1428,6	1423	-5,6	
P23	1251	1245,2	-5,8	
P24	1146	1140,7	-5,3	
P25	1024,2	1019,9	-4,3	
P26	1122,6	1118,3	-4,3	
P27	893,1	889,8	-3,3	
P28	936,4	933,4	-3	
P29	811,4	807,9	-3,5	
P30	795,4	792,2	-3,2	
P31	897,9	894,4	-3,5	
P32	988	983,8	-4,2	
P33	883,1	879,3	-3,8	
P34	979,1	974,9	-4,2	
P35	1103,9	1099,1	-4,8	
P36	861,5	857,8	-3,7	
P37	1019,4	1015	-4,4	
P38	894,3	890,4	-3,9	
P39	730,5	727,3	-3,2	
P40	983,7	979,4	-4,3	
P41	1626,2	1619,2	-7	
P42	1103,9	1099,1	-4,8	

<b>P43</b>	996	991,7	-4,3	
<b>P44</b>	1407,8	1401,8	-6	
<b>P45</b>	2170,5	2161,2	-9,3	
<b>P46</b>	1185,5	1180,4	-5,1	
<b>P47</b>	1052	1047,5	-4,5	
<b>P48</b>	1357,9	1352,1	-5,8	
<b>P49</b>	1222,7	1217,4	-5,3	
<b>P50</b>	1778,6	1771	-7,6	
<b>total</b>	<b>61746,7</b>	<b>61746,7</b>	<b>-305</b>	<b>304,9</b>

Como pode ser visto na tabela 6.15, a alteração provocada no P6 implica em uma redistribuição das retiradas para que se obtenha uma nova minimização de custos, com redução de volume máximo de bombeamento na grande maioria dos poços e aumento em 3 deles, incluindo aí o próprio P6. O fato é que, como há uma exigência em uma das restrições de que se mantenha a retirada da água igual à recarga do aquífero, existe uma compensação da diminuição das extrações nos poços e aumento em outros, “favorecendo” alguns usuários.

Cabe, portanto, ao órgão gestor e à sociedade decidir se o benefício deste volume incremental no poço 6 é maior que os custos que esta ação irá imputar. Além disto, uma outra decisão terá que ser tomada quando da aplicação da cobrança: A quem cabe arcar com estes custos? Este questionamento será respondido, tomando-se, novamente, como base o quão benéfico para a sociedade será aquele empreendimento.

Deve ser notado que poderão existir múltiplas soluções quanto à distribuição das vazões máximas de bombeamento que determinam o mesmo valor mínimo de energia utilizada para os recalques. Nesses casos, a nova solução determinará uma redistribuição nos bombeamentos máximos, mas sem que o custo de recalque aumente.

A tabela 6.16 apresenta três situações de bombeamento para a poço P6. Na primeira delas, já apresentada anteriormente, não foi pré-estabelecido uma vazão de bombeamento, buscou-se apenas a distribuição de retiradas que minimizaria os custos no aquífero como um todo. O valor da F.O. obtido foi considerado referência para as demais possibilidades de

retirada. No segundo caso, estipulou-se uma captação de 2000m<sup>3</sup>/dia para o P6, obtendo-se a F.O com valor igual ao anterior porém, uma nova alocação de retiradas máximas foi encontrada. Finalmente, para o terceiro caso, um aumento de 15,3% em relação a primeira extração foi introduzido (2.200 m<sup>3</sup>/dia) e registrou-se um aumento de 0,39% na F.O.. Desta forma dois processos de cobrança são propostos:

Cobrança incitativa:

- 1 - o modelo oferece uma solução de mínimo custo global de energia para retirada do máximo de água do aquífero, igual a sua recarga;
- 2 - ou seja, o custo social mínimo de retirada do valor máximo de vazão é estipulado pela solução ótima obtida - ele é global, variando de usuário para usuário, alguns pagando mais e outros menos por metro cúbico captado conforme seja a localização que selecionem - esta será do conhecimento deles, possibilitando que analisem a localização mais adequada (que será determinada pelas vantagens geográficas dessa localização e do custo de bombeamento);
- 3 - caso um usuário resolva, por razões geográficas, localizar-se de forma inadequada em relação à solução de mínimo custo de energia - solicita maior quantidade do que é possível naquele poço; nesse caso ele onerará os demais usuários (a sociedade) por um custo incremental de energia além do mínimo. Não interessa quem será prejudicado nesse momento - o fato é que alguns usuários pagarão mais do que deveriam pagar caso ele seguisse a regra estabelecida pela solução ótima. E sob o ponto de eficiência de retirada de água do aquífero a sociedade como um todo perderia;
- 4 - uma regra de cobrança que poderia ser estabelecida é que esse usuário poderia retirar água como quiser, desde que pagasse ao órgão gestor do aquífero o custo incremental que imputa à sociedade que é igual à diferença entre a solução de mínimo custo nova (obtida com a sua entrada), e a solução de mínimo custo anterior;
- 5 - essa regra induz a um uso eficiente de água sob o ponto social pois esse usuário somente estaria disposto a pagar esse valor se as vantagens geográficas compensarem a esse custo;
- 6 - o órgão gestor poderia optar por qual aplicação faria com o dinheiro: cobrir seus custos, investir na bacia, entre outros. Poderia até compensar os usuários que tenham ônus incremental mas nesse caso eles poderão nem existir - o modelo apenas irá indicar uma

solução nova na qual as possibilidades de bombeamento serão quantificadas em cada poço, com custo global maior, sendo que o aquífero estaria nessa situação longe de atingir seu limite de retirada;

7 - dado o novo patamar de energia mínima, o processo continuaria: qualquer novo usuário que resolvesse incrementar ainda mais a energia necessária para retirada da vazão máxima (a recarga do aquífero) deveria pagar a diferença. Com isto o sistema de cobrança induziria à obediência da regra de localização ótima a não ser nos casos que a localização geográfica compensasse a violação, o que levaria o usuário aceitar o ônus maior.

8 - esse valor de cobrança seria um dos componentes do valor total cobrado - o órgão gestor poderia estabelecer outro valor para retirada, de acordo com estudos baseados no custo de oportunidade de água, visando que os usos mais eficientes fossem supridos pelo aquífero; dessa forma, pelo menos duas cotas existiriam: a que busca a eficiência de uso e a que busca a eficiência de localização.

Mercado de água de aquífero:

1 - o órgão gestor do aquífero ofereceria cotas de retiradas de acordo com a solução ótima de mínima energia; qualquer método poderia ser adotado: distribuição gratuita de acordo com o uso prévio, para quem chegar primeiro, mediante leilão, mediante pagamento fixo;

2 - nessa atribuição de cotas ficaria especificado qual o custo de bombeamento máximo que pagarão quando o aquífero estiver em plena utilização com a máxima vazão sendo bombeada - eles poderão se localizar de acordo com a situação mais adequada, que envolve as vantagens geográficas e o custo de bombeamento;

3 - os usuários poderiam vender suas cotas a outros interessados, ao preço que for estabelecido pelo mercado; com isto o preço de água variará de acordo tanto com a negociação mas também refletindo as vantagens geográficas e energéticas;

4 - se o usuário demandar outorga de acordo com a distribuição ótima (mínima energia) ele nada deveria pagar além do que for eventualmente estipulado para os usuários que seguem a regra de localização;

5 - se ele, porém, resolver violar a regra (retirar de um poço mais do que o valor na solução ótima, onerando os usuários) ele deveria pagar a diferença entre o custo da nova solução ótima original e a solução original. Esse pagamento iria ou para os usuários eventualmente

instalados que tenham incrementos de custo de bombeamento acima do máximo informado quando da outorga ou, caso eles ainda não tenham se instalado, para o órgão gestor;

6 - nessa situação haveria 2 tipos de usuários: aqueles que se localizaram de acordo com o padrão indicado pelas soluções de mínimo custo (são várias as soluções pois na medida que novos usuários violem a solução ótima vigente, nova solução ótima será estabelecida) e usuários que violam as condições de localização.

7 - apenas os segundos pagariam o valor estipulado no item 5;

8 - ao ofertar sua cota no mercado, os usuários que obedecem ao padrão ótimo de localização deverão ter suas cotas mais valorizadas no mercado do que aqueles que fogem ao padrão, pois não teriam que compensar aos prejudicados;

Tabela 6.16- Situações de variação do bombeamento em P6 para análise do custo mínimo

Poço	Custo mínimo	P6=2000 (m <sup>3</sup> /dia)	P6=2200 (m <sup>3</sup> /dia)	Poço	Custo mínimo	P6=2000 (m <sup>3</sup> /dia)	P6=2200 (m <sup>3</sup> /dia)
P1	1622,5	1622,8	1623,2	P26	1122,6	1121,2	1118,3
P2	0,2	0,2	0,2	P27	893,1	892,1	889,8
P3	1924,7	1921,2	1910,3	P28	936,4	935,7	933,4
P4	1743,9	1741,2	1736,4	P29	811,4	810,2	807,9
P5	1908,1	1905,1	1899,9	P30	795,4	794,3	792,2
P6	1987,2	2000	2200	P31	897,9	896,7	894,4
P7	1851,4	1842,5	1827,5	P32	988	986,5	983,8
P8	1713,1	1710,4	1705,8	P33	883,1	881,7	879,3
P9	1955,6	1952,6	1947,3	P34	979,1	977,6	974,9
P10	1600	1707,3	1691,4	P35	1103,9	1102,1	1099,1
P11	1470,1	1457,3	1445,8	P36	861,5	860,1	857,8
P12	0	0	0	P37	1019,4	1017,8	1015
P13	1595,1	1592,6	1588,2	P38	894,3	892,9	890,4
P14	1207	1200,1	1193,5	P39	730,5	729,3	727,3
P15	1084,6	1079,7	1074,3	P40	983,7	982,1	979,4
P16	1300,8	1296,6	1291,2	P41	1626,2	1623,6	1619,2
P17	1119,6	1117,8	1114,7	P42	1103,9	1102,1	1099,1
P18	1553,3	1550,9	1546,7	P43	996	994,4	991,7
P19	1110,8	1107	1102,2	P44	1407,8	1405,6	1401,8
P20	1079	1075,8	1071,5	P45	2170,5	2167,1	2161,2
P21	1268,5	1266,7	1263,3	P46	1185,5	1183,6	1180,4
P22	1428,6	1426,8	1423	P47	1052	1050,3	1047,5
P23	1251	1248	1245,2	P48	1357,9	1355,8	1352,1
P24	1146	1143	1140,7	P49	1222,7	1220,7	1217,4
P25	1024,2	1021,6	1019,9	P50	1778,6	1775,8	1771
			<b>F.O (x10<sup>8</sup>)</b>		<b>1,2872</b>	<b>1,2872</b>	<b>1,2877</b>

### **6.3 – Considerações Finais**

Os vários cenários com reais possibilidades de ocorrência criados para análise do modelo mostrou a importância do mesmo para a boa gestão de um aquífero. A quantidade de água permitida para extração em um poço, para emissão de outorga pelo órgão gestor, pode ser diretamente calculada levando-se em conta restrições que têm a finalidade de manter a sustentabilidade e operacionalidade do sistema.

Outro instrumento de gestão, a cobrança, deverá ser adotada complementado a outorga objetivando a racionalização do uso. Sobre-taxas ou bonificações podem ser criadas para aqueles usuários que realizem extrações acima ou abaixo, respectivamente, dos valores determinados e fixados pela outorga.

Os modelos propostos podem ser inseridos no sistema de gestão simultaneamente ou em estágios diferentes. O primeiro, em um processo incipiente de gestão quando a maior preocupação se verifica apenas pelo controle da retirada de água do aquífero e o segundo, em um estágio mais avançado, quando já se deseja que economias de custos sejam consideradas, podendo, ainda, auxiliar ao órgão gestor a estipular o valor da água subterrânea para efeito da cobrança.

## **7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Os modelos de simulação associados aos modelos de otimização são ferramentas que possibilitam fornecer aos órgãos gestores uma maior garantia para a implementação dos instrumentos de outorga e cobrança de acordo com o que preconiza a lei das águas no Brasil.

Propostas de modelos de simulação/otimização foram efetuadas neste trabalho além da apresentação de um estudo com base na cobrança da água subterrânea, baseado na legislação em vigor no país. Algumas outras análises, no entanto, podem ser adicionadas com vistas ao seu aprimoramento.

### **7.1 – Conclusões**

A Lei 9.433/97 que dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos, é considerada inovadora, sendo destacados alguns elementos de suma importância para atingir os objetivos impostos pela mesma, salientando-se a racionalização do uso da água no país. Instrumentos de gestão são adotados na citada Política e dentre eles estão a outorga de direito de uso da água, a cobrança e os planos de recursos hídricos. O processo de implementação da outorga e da cobrança, bem como a elaboração do plano, requer amplo conhecimento das condições hidrogeológicas envolvidas na área em estudo. A indissolubilidade das águas superficiais e subterrâneas, a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento são também preconizadas pela Lei 9.433/97 e, como já foi dito anteriormente os limites da bacia hidrográfica podem, de forma geral, ser considerados iguais aos limites hidrogeológicos.

Nos planos de recursos hídricos são elencadas as ações que serão desenvolvidas para alcançar as metas estipuladas nos mesmos, tendo como principal finalidade o desenvolvimento sustentável da bacia hidrográfica. Decisões que permeiem o campo dos recursos hídricos devem ser discutidas na fase de elaboração do plano tais como:

enquadramento dos corpos de água em classe de usos preponderantes, os usos prioritários dos recursos hídricos, enfim, toda e qualquer ação que interfiram na quantidade, na qualidade ou no regime das águas da bacia hidrográfica.

Apesar de diversas legislações contemplarem a água subterrânea no Brasil, lacunas ainda são verificadas especialmente no que diz respeito às normas gerais sobre o aproveitamento, avaliações, controle, utilização racional, proteção e direitos e obrigações dos usuários.

A outorga e a cobrança pelo uso da água, instrumentos de gestão adotados pela Política Nacional de Recursos Hídricos, têm valiosa aplicação à água subterrânea, devido à grande procura que se faz a este recurso nos tempos atuais, estimulados, principalmente, pela qualidade destas águas. Estes instrumentos, neste caso, aplicam-se apenas para fins de captações uma vez que não se admite o uso para fins de lançamentos. É importante e/ou desejável que os instrumentos de gestão sejam considerados conjuntamente pois o desenvolvimento do plano de recursos hídricos deverá estar baseado nas ações implementadas pelos demais instrumentos à luz da sustentabilidade da bacia.

Deve-se discutir, para a elaboração do plano de bacia, qual a água que se deseja ter nesta geração e nas futuras, em que condições qualitativas e quantitativas e, dentro deste aspecto, estipular as metas que serão seguidas para alcançar o objetivo.

Os dois modelos propostos neste trabalho têm por finalidade auxiliar aos órgãos gestores em suas tomadas de decisão como também no estabelecimento de metas a serem atingidas pelos planos de recursos hídricos, no que concerne à gestão das águas subterrâneas.

O primeiro modelo pode ser adotado para uma gestão a curto prazo, pois o mesmo estabelece quais as retiradas “ótimas” que podem ser feitas sob condições especificadas pelos planos de bacia e/ou pelos órgãos gestores.

O segundo modelo seria aplicado em médio ou longo prazo, como uma meta estratégica, de forma que a máxima retirada seja efetuada com a mínima energia.

As outorgas emitidas levando-se em consideração o primeiro momento, ou seja, atendendo ao primeiro modelo, continuariam sendo preservadas quando o segundo passasse a ser colocado em prática em um segundo estágio de gestão. Nestes modelos o órgão gestor e/ou planos de bacia podem estipular em cada momento qual a máxima depleção que pode ser atingida pelo lençol freático, de acordo com o que estiver atribuído no plano de bacia.

O conhecimento prévio do comportamento hidrogeológico do aquífero é essencial para a implementação da outorga e, conseqüentemente, da cobrança pelo uso da água subterrânea. Os modelos de simulação/otimização propostos neste trabalho alcançaram o objetivo de estimar qual a quantidade ótima de captação de água em cada poço, para cada cenário simulado. Os modelos têm como suportes principais a manutenção da sustentabilidade do aquífero, quando restringe a quantidade de água retirada à recarga, e à conservação da água nos poços da vizinhança, através do controle dos rebaixamentos em cada poço, garantindo assim a sua operacionalidade.

Vários parâmetros devem ser considerados para efeito da cobrança da água subterrânea que podem parecer não estar vinculados à cobrança que a lei 9.433 preconiza (cobrança pela água bruta) mas, pelas peculiaridades que estão intrínsecas ao processo físico e, conseqüentemente, às captações da água subterrânea, devem ser cautelosamente observados. O valor econômico total da água subterrânea é uma função do valor de extração e do seu valor de permanência e estes podem variar em decorrência de extrações adjacentes. Portanto, ao se valorar a água subterrânea para efeito de cobrança, além dos aspectos inerentes à própria captação se faz necessário considerar quais as externalidades causadas para que as mesmas sejam inseridas no seu valor, com o propósito de evitar grandes concentrações de usuários em áreas próximas.

Os resultados obtidos dependem muito de como foi feita a modelagem da área. Este é um ponto fundamental para o bom funcionamento dos modelos de simulação/otimização (s/o), visto que alguns erros são inerentes a este processo. A vantagem é que, à medida que as outorgas forem sendo feitas, e que um sistema de monitoramento dos níveis de água seja implementado e acompanhado, o modelo pode ser atualizado, refeito se necessário, amadurecido, e os erros relacionados com a modelagem serão reduzidos com o tempo.

## **7.2 – Recomendações**

Considerando estes fatores, recomenda-se que o modelo observe a interação rio-aquífero pois, as alterações originadas em qualquer um dos mananciais, superficial ou subterrâneo, poderá acarretar em conseqüências para o outro que não devem ser desconsideradas. Ou seja, um modelo que incorpore as retiradas (outorgas) superficiais e subterrâneas é necessário para uma análise completa do sistema.

A incorporação dos custos de captação, importantes para o estudo da cobrança da água subterrânea, ao modelo s/o dará ainda mais subsídios para a alocação das captações e conseqüentemente das outorgas. Isto permitirá ao usuário, quando a situação couber, optar pela captação de água na região em que os custos sejam menores em virtude, por exemplo, da baixa concentração de usuários em uma área com uma menor profundidade nas perfurações.

O aspecto da qualidade da água é um fator de extrema importância e que deve constar no estudo de cobrança. Usos que não necessitem de água de boa qualidade podem ser incentivados a se instalar em locais em que a água não tenha um padrão excelente de qualidade através da adoção de um menor valor de cobrança.

## 8 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABAS.2001. **Água Subterrânea - curiosidades.** Disponível on-line em <http://www.abas.org.br/curioso.htm>. 11 Mar 1999.
- AGUADO, E.; REMSON, I..1974. **Groundwater hydraulics in aquifer management.** In: Journal of Hydrology. Eng., ASCE, vol.100, No. 1 January, p.103-118.
- BARLOW, P.M.; WAGER, B.J. & BELITZ, K..1996. **Pumping strategies for management of a shallow water table: the value of the simulation-optimization approach.** In: Ground Water. Vol. 34, No. 2. p305-317.
- BARRAQUÉ, B..1995. **As políticas da água na Europa.** Instituto Piaget – Lisboa. 374p.
- BARTH, F..1999.**Aspectos institucionais do gerenciamento de recursos hídricos.** In: Águas Doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação. Org. e Coord.: Rebouças, A.; Braga, B.; Tundisi, J..p565-599.
- BUSTAMANTE, R..1999. **Outorga na Bolívia.** [Comunicação pessoal].
- CAICEDO. N. L..1999. **Águas subterrâneas.** IPH - UFRGS - Porto Alegre. Notas de aula da disciplina.
- CASAN .2000. **Estudo Hidrogeológico do Sistema Aquífero Distrito de Ingleses do Rio Vermelho e São João do Rio Vermelho.** Relatório Interno.
- CIRILO, J. A. & CABRAL, J. P..1989. **Modelos de água subterrânea.** In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. ABRH. Vol.I. P302-380.
- CIRILO, J. A..1997. **Programação não linear aplicada a Recursos Hídricos.** In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Rubem La Laina Porto.p.305-359.
- COTA, S. D. S.. 2000. **Modelagem da contaminação de aquíferos livres por NAPLs residuais na zona insaturada.** Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós

Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental,  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL.1988. Editora Exped –  
Expressão e Cultura

DAEE. 1999. **Outorga no Estado de São Paulo**. Disponível on-line em  
<http://www.dace.sp.gov.br>. 10 AGO 1999.

DEININGER, R. A..1970. **Systems analysis of water supply systems**. In: Water Resources  
Bulletin. Vol. 6. No. 4 p 573-592.

DOMENICO, P.A. e F.W. SCHWARTZ. 1997. **Physical and Chemical Hydrogeology**, 2<sup>a</sup>  
edição, John Wiley & Sons.

ESTÁGIO atual dos aspectos institucionais da gestão de recursos hídricos do Brasil. 1997.  
In: Política Nacional de Recursos Hídricos: Lei nº 9433 de 8 de janeiro de 1997.  
Brasília: ABEAS. p 1-9.

FERNÁNDEZ, C..1999. **Outorga na Costa Rica**. [Comunicação pessoal].

FETTER JR, C. W..1980. **Aplied Hydrogeology**. Charles E.. Merrill Publishing Company.  
A. Bell & Howell Company. Columbus, Ohio. 488p.

FREEZE, R.A. e J.A. CHERRY, **Groundwater**, Prentice-Hall, 1979.

FREIRE, C. C., RIBEIRO, M. M. R. & PEREIRA, J. S.. 1999. **Aspectos legais da gestão  
das águas subterrâneas em Pernambuco – Brasil**. Disponível on-line em  
<http://www.iica.org.uy/16-6-pan3-pon5.htm> - II Encontro das Águas. 15 AGO 1999.

GAMA. A. S.. 1998. **Dimensionamento ótimo de um sistema de recursos hídricos de  
grande porte**. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos  
e saneamento Ambiental. 137f. Dissertação (mestrado).

- GHARBI, A. & PERALTA, R. C..1994. **Integrated embedding optimization applied to Salt Lake valley aquifers**. Water Resources Research, Vol.30, No. 3. P817-832.
- GOLDBARG, M. C. & LUNA, H. P.. 2000. **Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus. 649 p.
- GONZALEZ, A. S. 1989a. **Basic economics concepts applied to groundwater management**.. Groundwater Economics. Developments in Water Science. Editado por CUSTÓDIO E. & GURGUÍ, A. Vol. 39. P3 - 22.
- GONZALEZ, A. S. 1989b. **Ground water externalities**. Groundwater Economics. Developments in Water Science. Editado por CUSTÓDIO E. & GURGUÍ, A. Vol. 39. P361-371.
- GOODMAN, A. S..1984. **Principles of water resources planning**. Publicado por Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632. 563p.
- GORELICK, S. M..1983. **A review of distributed parameter groundwater management modeling methods**. Water Resources Research. Vol. 19. No. 2. P305-319.
- HALEK, V. & SVEC, J..1979. **Groundwater Hydraulics**. Elsevier, New York, N.Y., P.52-53. Apud Lall et al..1989.
- ILOG, Inc..1997. **Optimization technology white paper. A comparative study of optimisation technics**. Mountain View, California 94043.1-800-FOR-ILOG.  
[www.ilog.com](http://www.ilog.com).
- KOLVALLI, S. & CHICOINE, D. L..1989. **Groundwater markets in Gujarat, Índia**. Water Resources Development. V. 5. Nº. 1. p38-45.

- KRAEMER, R. A. 1999. **Water management and policy in Germany**. Water Resources Management- Brazilian and European Trends and Approches. Editado por Gilberto Valente Canali (et al.) – Porto Alegre: ABRH, 2000. 328 p.
- KRAEMER, R. A. 1999. **Water management and policy in Germany**. Water Resources Management- Brazilian and European Trends and Approches. Editado por Gilberto Valente Canali (et al.) – Porto Alegre: ABRH, 2000. 328 p.
- LALL, U. & SANTINI, M. D..1989. **An optimization for unconfined stratified aquifer systems**. In: Journal of Hydrology, 111. P145-162.
- LANNA, A. E. L..1997. Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Organizador: Rubem La Laina Porto.p.15-41.
- LANNA, A. E. L..2000. **Cobrança pelo uso**. Lista de Gestão em Recursos Hídricos- ABRH. Disponível on line em <http://www.abrh.org.br> - 23 OCT 2000. Mensagem Nº 813.
- LEAL, M. S. 1997. **Gestão Ambiental de Recursos Hídricos por Bacias Hidrográficas: sugestões para o Modelo Brasileiro**. Rio de Janeiro: UFRJ - Curso de Pós-Graduação em Engenharia. 230f. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil.
- MAGALHÃES, M.L.F..1992. **Legislação ambiental**. In: Projeto Tecnologias de Gestão Ambiental (para a Amazônia, Pantanal e Cerrado), Relatório Final. DITAM/IBAMA.
- McDONALD, M.G. & A.W. HARBAUGH, 1988. **A modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground Water Flow Model**, Techniques of Water–Resources Investigations of the United State Geological Survey, Book6, Chapter A1, USGS Open-File Report 83-875.
- MCKINNEY, D. C., LINDNER, P. R., KAM, A., KAN, L. & YE, Z..1985. **Edwards aquifer emergency withdrawal reducion plan: a modeling analysis**. In: Groundwater Management. P65-70.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE..2002. Disponível on line em:  
<http://www.mma.gov.br>.

MOLINAS, P. A. & VIEIRA, V. P. P. V..1997. Marco legal e institucional das águas subterrâneas no Brasil – Breve contribuição ao aprimoramento do sistema jurídico-institucional. In: Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória –ES. P 175-181.

MONTAIGNE, F..2002. Água sob pressão. In: National Geographic – Brasil. Setembro/2002. p50-81.

MOSTERT, E..1999. **Water resources management in the Netherlands**. Semana Internacional de Estudos sobre Gestão de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, 19-23 de abril de 1999. ABRH. 16p.

MUELLER, F. A . & MALE, J. W.. 1993. **A management model for specification of groundwater withdrawal permits**. In: Water Resources Research. Vol. 29, No. 5 P 1359-1368.

NISHIKAWA, T..1998. **Water–Resources optimization model for Santa Barbara, California**. In: Journal of Resources Planning and Management. P252-263.

NOBRE, M. DE M. M. & NOBRE, R. C. M., 2000. **Uso sustentável de águas subterrâneas na Região Metropolitana de Maceió**. In: Anais do 1<sup>st</sup> Joint World Congress on Grounwater. 16 p.

REBOUÇAS, A. 1998 **.Desenvolvimento das águas subterrâneas no Brasil**. In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo. 1- 11.

PIMENTA, C. C. M. & REIS, D..2001. **Projeto de emenda constitucional**. Lista de Gestão em Recursos Hídricos-ABRH. Disponível on line em <http://www.abrh.org.br> - 2 OCT 2001. Mensagem N° 1564.

- POMPEU, C. T..2000. **Direito de águas no Brasil – atualização**. Apostila. 95p.
- REBOUÇAS, A. C. 1999. **Águas subterrâneas**. In: Águas Doces no Brasil – Capital Ecológico, Uso e Conservação. Organização e Coordenação Científica: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B. & TUNDISI, J. G.. P. 117-151.
- REICHARD, E. G. 1987. **Hydrologic influences on the potential benefits of basinwide groundwater management**. In: Water Resources Research. Vol. 23, Nº 1, p 77-91.
- RIBEIRO, M. M. R. E LANNA, A. E. 1997. **Bases para a cobrança de água bruta: discussão de algumas experiências**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória: ABRH, v.1, p.1-8.
- RODRIGUEZ-CASTRO, J. A..1995. **Modeling of groundwater management alternatives for the city of Florence, South Carolina**. In: GROUNDWATER MANAGEMENT INTERNATIONAL SYMPOSIUM,1995, San Antonio. Proceedings. New York: American Society of Civil Engineers. P.24-29.
- SERÔA DA MOTTA, R., RUITENBEEK, J. & HUBER, R..1996. **Uso de instrumentos econômicos na gestão ambiental da América Latina e Caribe: lições e recomendações**. Rio de Janeiro: IPEA. 70p.
- SEROA DA MOTTA, R..1998. **Utilização de critérios econômicos para a valorização da água no Brasil**. Projeto PLANAGUA - SEMA/GTZ, Cooperação Técnica Brasil - Alemanha, 2a. ed. 90p.
- SILVA, R. S. da, MARQUES, C. & MONTEIRO, A. B.. 1998. **Implantação do Sistema de Outorga em Pernambuco**, mimeo.
- SCHIFFLER, M..1998. **The economics of groundwater management in arid countries: theory, internacional experience and a case study of Jordan**. GDI Book Series Nº 11.
- SCHVARTZMAN, A.. 1999. **Outorga no Estado de Minas Gerais**. [Comunicação pessoal].
- SMITH, S..1995. **“Green” taxes and charges: policy and practice in Britain and Germany**. London, The Institute for Fiscal Studies.

THAME, A. C. DE M..2000. **A cobrança pelo uso da água.** São Paulo: IQUAL, Instituto de Qualificação e Editoração LTDA. 256 p.

TING, C., ZHOU, Y., VRIES, J. J. & SIMMERS, I..1998. **Development of a preliminary ground water flow model for water resources management in the Pingtung plain, Taiwan.** In: Ground Water, Vol. 35, No. 6. P20-36.

TUNG, Y. & KOLTERMANN, C. E..1985. **Some computational experiences using embedding technique for ground-water management.** In: Ground Water, Vol. 23, No. 4 p 455-464.