
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNO DE MACEDO ITAQUY

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA A GESTÃO DO USO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA – APLICAÇÃO NA FÁBRICA DE ÁGUAS CLARAS DO SUL DA AMBEV**

Porto Alegre

Janeiro 2013

BRUNO DE MACEDO ITAQUY

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA A GESTÃO DO USO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA – APLICAÇÃO NA FÁBRICA DE ÁGUAS CLARAS DO SUL DA AMBEV**

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO
AO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Carlos André Bulhões Mendes

Porto Alegre

Janeiro 2013

BRUNO DE MACEDO ITAQUY

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA A GESTÃO DO USO DA ÁGUA
SUBTERRÂNEA – APLICAÇÃO NA FÁBRICA DE ÁGUAS CLARAS DO SUL DA AMBEV**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 11/01/2013 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira – Diretor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas

.....
Dr. Sandor Arvino Grehs – Professor aposentado

.....
Mestre Rosane Barbosa Lopes Cavalcante – aluna de doutorado do Instituto de Pesquisas Hidráulicas

Conceito:.....

Dedico este trabalho à todos que, de uma forma ou
de outra, contribuíram para a minha formação
acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por me proporcionar uma educação de qualidade e pelos princípios que sempre nortearam a minha vida e as minhas decisões.

À Caroline Führ pelo companheirismo e amor ao longo destes anos da universidade.

Agradeço à UFRGS, em especial ao IPH, por ter me proporcionado além da graduação uma experiência acadêmica sensacional.

Ao Professor Carlos André por aceitar o desafio de orientar este trabalho e assim conduzi-lo de forma impecável.

Ao geólogo Sandor Grehs, co-orientador deste trabalho, pelas contribuições extraordinárias sobre hidrogeologia.

Agradeço à Companhia de Bebidas das Américas, na figura do Engenheiro João Jorge Stephanou, pelo fornecimento de dados e por acreditarem no objeto de estudo.

Agradeço aos meus amigos por todo o carinho e lealdade em todos os momentos da minha vida.

RESUMO

ITAQUY, B.M. Utilização de Técnicas de Otimização Para a Gestão do Uso da Água Subterrânea - Aplicação na Fábrica de Águas Claras do Sul da AMBEV. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este estudo propõe-se a analisar o comportamento dos níveis hidráulicos do aquífero que abastece a fábrica de Águas Claras do Sul da Ambev durante o regime de operação dos poços de forma a determinar, através de ferramentas matemáticas de otimização, qual a melhor forma de utilização dos poços da fábrica. O objetivo principal do modelo matemático de otimização foi a maximização das cargas hidráulicas dos poços, considerando um aquífero livre, unidimensional e o bombeamento realizado em regime estacionário, considerando as características hidrogeológica da área de estudo e a demanda de água baseada em um histórico de vazões da fábrica. Para a realização das simulações matemáticas, utilizou-se o *software* GAMS e propôs-se 24 cenários de abastecimento da fábrica. Desta forma, avaliou-se a quantidade de água extraída em cada um dos sete poços da fábrica, para os 24 cenários propostos, de forma a garantir a maior soma possível das cargas hidráulicas durante o regime de operação. Isso garante o menor cone de depressão e a conseqüente minimização dos impactos ambientais causados ao aquífero pelo bombeamento de água subterrânea. Através deste estudo determinou-se que para pequenas demandas de água deve-se utilizar apenas um dos poços da fábrica, enquanto que para maiores vazões deve-se utilizar dois poços simultaneamente.

Palavras-chave: otimização, água subterrânea, hidrogeologia.

ABSTRACT

ITAQUY, B.M. The use of optimization techniques for de management of groundwater – Application in Ambev’s factory of Águas Claras do Sul. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

This study proposes to analyze the behavior of heads in an aquifer that supplies the Ambev’s plant of Águas Claras do Sul during the regime of operation of the wells to determine, through mathematical optimization tools, to determine the best operational system for the factory. The main objective of the mathematical model of optimization was the maximization of the well heads, considering a free aquifer, unidimensional and steady state pumping and taking into consideration the hydrogeologic characteristics of the area of study and the water demand based on a plant flow rate log. The GAMS software was used for the mathematical simulations and 24 water supply scenarios for the plant were considered. This way, the quantity of water extracted from each of the seven wells of the plant was evaluated, for the 24 scenarios proposed, in a way as to guarantee the largest possible sum of heads during the operation regime. That assures the smallest cone of depression and thus, the minimization of the environmental impacts to the aquifer due to the groundwater pumping. Through this study it was determined that, for small water demands only one well should be employed, while for larger flow rates two wells should be employed simultaneously.

Keywords: optimization, groundwater, hydrogeology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de aquíferos de acordo com a pressão atuante na zona saturada. Ilustração extraída de Basic Ground-water Hydrology do U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220 (Heath, 1983, p.4).	9
Figura 2: Perfil transversal de um poço em operação (Fonte: www.acquasolo.com.br).	13
Figura 3: Localização da área do presente estudo;	20
Figura 4: Seção longitudinal da área de sondagem de caracterização geofísica do terreno (Costa, 1997, p.11);	23
Figura 5: Posição geográfica dos sete poços de captação de água subterrânea;	26
Figura 6: Perfil dos níveis da água subterrânea;	27
Figura 7: Nível h (m) em cada poço de abastecimento da fábrica de Águas Claras do Sul;	28
Figura 8: Plano de projeção unidimensional dos poços;.....	29
Figura 9: Nível hidráulico nos poços;.....	29
Figura 10: Seção longitudinal do aquífero livre unidimensional;.....	30
Figura 11: Gráfico do consumo médio mensal para os anos de 2009 e 2010.....	33
Figura 12: Interface de programação do GAMS;	35
Figura 13: Resultado gráfico da exploração dos poços, suprindo a demanda média do mês de junho de 2009 e com a maximização da soma das cargas hidráulicas em cada poço.....	37
Figura 14: Resultado gráfico da exploração dos poços, suprindo a demanda média do mês de dezembro de 2010 e com a maximização da soma das cargas hidráulicas em cada poço.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de resistividade para diferentes materiais (Costa, 1997);	21
Tabela 2: Correlação geologia/geofísica do subsolo da área da fábrica (COSTA, 1997);.....	22
Tabela 3: Valores de transmissividade hidráulica, definidos através de ensaios de bombeamento, dos estudos realizados na área da fábrica de Águas Claras;.....	24
Tabela 4: Determinação da altura h para cada poço da fábrica;	28
Tabela 5: Níveis hidráulicos para cada nó;.....	32
Tabela 6: Consumo médio mensal de água da fábrica nos anos de 2009 e 2010;	33
Tabela 7: Demanda média de água, nos anos de 2009 e 2010, expressa em m/d.	33
Tabela 8: Resultado da simulação realizada para o mês de junho de 2009, considerando a vazão média de 4243 m ³ /dia.....	36
Tabela 9: Resultado da simulação realizada para o mês de dezembro de 2010, considerando a vazão média de 9012 m ³ /dia.	37

LISTA DE SIGLAS

ABAS: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

AMBEV: *American Beverage Company*

ANA: Agência Nacional de Águas

CECO: Centro de Estudos Costeiros e Oceanográficos

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

COMUSA: Companhia Municipal de Saneamento de Novo Hamburgo

CORSAN: Companhia Rio-grandense de Saneamento

DMAE: Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre

DRH: Departamento de Recursos Hídricos

GAMS: *General Algebraic Modeling System*

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

SAMAE: Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul

SEDAI: Secretaria do Desenvolvimento e dos Assuntos Internacionais do Estado do Rio Grande do Sul

SEMA: Secretaria Municipal do Meio Ambiente

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1.	Importância da Água Subterrânea.....	1
1.2.	Formulação da questão de estudo - Minimização dos cones de depressão dos poços da Fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev através de modelagem matemática.....	2
1.3.	Justificativa do trabalho	3
1.4.	Hipótese	6
2.	Objetivos do estudo.....	7
3.	Revisão bibliográfica.....	8
3.1.	Hidrogeologia como ciência	8
3.1.1.	Aquíferos e propriedades hidrogeológicas	8
3.2.	Modelagem matemática de otimização/simulação de sistemas de água subterrânea	13
4.	Descrição da área de estudo	19
4.1.	Caracterização hidrogeológica da área de estudo – Terreno da fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev localizado no município de Viamão/RS.	19
5.	Metodologia	25
5.1.	Descrição física do modelo de otimização	25
5.2.	Formulações matemática do objeto de estudo.....	30
5.3.	Modelo matemático aplicado ao estudo de caso – Fábrica de Águas Claras do Sul da Ambev.....	32
6.	Apresentação e análises dos resultados.....	36
7.	Conclusões e recomendações	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	ANEXO 1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES FEITAS PARA AS DEMANDAS DO ANO DE 2009	43
	ANEXO 2 – RESULTADOS GRÁFICOS DA EXPLORAÇÃO DOS POÇOS, SUPRINDO AS DEMANDAS MÉDIAS MENSAS DO ANO DE 2009 COM A MAXIMIZAÇÃO DA SOMA DAS CARGAS HIDRÁULICAS EM CADA POÇO ..	45
	ANEXO 3 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES FEITAS PARA AS DEMANDAS DO ANO DE 2010	47
	ANEXO 4 – RESULTADOS GRÁFICOS DA EXPLORAÇÃO DOS POÇOS, SUPRINDO AS DEMANDAS MÉDIAS MENSAS DO ANO DE 2010 COM A MAXIMIZAÇÃO DA SOMA DAS CARGAS HIDRÁULICAS EM CADA POÇO ..	49

1. Introdução

1.1. Importância da Água Subterrânea

Estima-se que volume total de água no planeta é de, aproximadamente, 1.360 bilhões de km³. Destes, apenas 2,75% correspondem à água doce, estando 2,15% nas calotas polares e geleiras, restando em torno de 0,6% passíveis de exploração para o consumo humano no subsolo, lagos, rios, pântanos e atmosfera. O Brasil é um país privilegiado, pois possui 12% das reservas mundiais de água doce com uma disponibilidade hídrica de 40.732 m³/hab/ano (ANA, 2002). Quando se analisa apenas os 0,6% de água doce passível de exploração, deve-se, obrigatoriamente, destacar a importância da água subterrânea, que corresponde a uma importante fração deste volume.

O subsolo armazena cerca de 10,5 milhões de km³ 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 agropecuárias devendo-se, para isto, empregar a forma correta de captação (Rebouças, 1999).

A água subterrânea assume um papel ainda mais importante tendo em vista a crescente demanda por abastecimento de água nos grandes centros urbanos e pólos industriais. Além disso, cada vez mais os mananciais de água superficial encontram-se indisponíveis para utilização devido à contaminação por efluentes domésticos e industriais. Em contrapartida, a água proveniente do subsolo, freqüentemente apresenta uma boa qualidade, embora a contaminação dos aquíferos já não seja um fato raro. Tendo em vista a escassez do recurso hídrico superficial nos núcleos urbanos e zonas industriais, o recurso subterrâneo tem se tornado uma reserva vital, onde as águas subterrâneas passam a ser uma reserva estratégica para o desenvolvimento de atividades econômicas (CETESB, 2004).

A exploração do recurso hídrico subterrâneo para o abastecimento doméstico, agrícola e industrial vem crescendo intensamente no mundo todo. Estima-se que entre os anos de 1977 e 2002, foram perfurados 12 milhões de poços por ano no mundo. Nos Estados Unidos, por exemplo, perfura-se entre 800 e 900 mil poços/ano, onde o volume de água subterrânea utilizada para irrigação foi triplicado, chegando ao patamar de 45% da água

de irrigação. Já na Índia, a área irrigada com água subterrânea é de 31 milhões de hectares, o que equivale a uma área maior que o estado do Rio Grande do Sul. Alguns países como o Irã e a Argélia tem mais da metade da sua área irrigada com água subterrânea, com 58% e 67%, respectivamente. A Líbia depende exclusivamente deste recurso para irrigação (ABAS, 2001).

Constatado o aumento contínuo pelo abastecimento de água e, sabendo-se que, muitas vezes o uso da água é feita de forma indiscriminada, a proposição de medidas eficazes para o uso racional deste insumo se faz cada vez mais urgente e necessário. Quando se fala em água subterrânea, a gestão do uso do recurso hídrico, baseada nas legislações vigentes e nas características hidrogeológicas do meio, é uma ferramenta fundamental para a preservação do recurso, principalmente em áreas onde já se verifica sobreexploração.

Inserida neste contexto, a unidade fabril de Águas Claras do Sul, localizada no município de Viamão/RS, da Companhia de Bebidas das Américas (AmBev), cuja fonte de abastecimento de água é o Sistema Aquífero Cenozóico na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, através da exploração de sete poços instalados na propriedade da empresa, é o objeto de estudo deste trabalho. Pretende-se minimizar, através de modelos matemáticos de gestão da água subterrânea, os cones de depressão causados pelo bombeamento de água de cada um dos poços de forma a evitar a interferência entre os poços sem é claro deixar de atender a demanda de água da fábrica.

1.2 Formulação da questão de estudo - Minimização dos cones de depressão dos poços da Fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev através de modelagem matemática.

Ao se explorar o recurso hídrico subterrâneo, através do uso de bombas, altera-se a o nível de água no aquífero. Tal alteração na carga hidráulica no ponto de captação de água pode ser definida como o impacto ambiental decorrente do bombeamento, uma vez que o estado natural do aquífero é modificado. Isto acontece em um perímetro circular ao redor do poço de captação denominado raio de influência.

Quando se explora a água subterrânea através de uma bateria de poços, como no caso da fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev, pode ocorrer a influência entre os poços que

estiverem em operação no mesmo período de tempo. As consequências da sobreposição dos raios de influência, ou dos cones de depressão, pode comprometer a disponibilidade hídrica de cada poço.

Para melhorar a gestão dos recursos hídricos da fábrica da AmBev e evitar possíveis impactos como os listados acima, este estudo pretende mostrar qual é o melhor regime de operação dos poços da área de estudo no que diz respeito à minimização dos cones de depressão durante a captação da água subterrânea. Para tanto, utilizou-se um modelo matemático de otimização que relaciona as características hidrogeológicas do meio e as condições de restrição impostas pela realidade da fábrica, tais como volume demandado diariamente e transmissividade hidráulica do aquífero.

1.3 Justificativa do trabalho

A indústria de bebidas tem como matéria prima fundamental para a produção de seus produtos a água. Desta forma deve-se obrigatoriamente otimizar o uso deste recurso de forma a garantir a sustentabilidade da utilização e das reservas deste insumo. Isto acontece, pois a água utilizada nos processos industriais pode ser proveniente de três principais fontes de abastecimento:

- Abastecimento por concessionárias (Ex: Corsan, DMAE, Comusa, SAMAE...);
- Captação de águas superficiais, sujeitas às outorgas de uso da água (Ex: bombeamento de água de corpos hídricos vizinhos ao empreendimento.);
- Captação de água subterrânea, sujeito à outorgas de uso da água (Ex: aproveitamento da água de aquíferos através do regime de operação de poços.);

Em todos os casos a otimização do uso da água é fundamental, pois o manejo deste recurso envolve aspectos legais, econômicos, sociais e institucionais. No caso da captação de água de aquíferos e águas superficiais, além da obrigação legal de atendimento às outorgas de uso da água que balizam os volumes de água retirados dos corpos hídricos e também os regimes de operação das bombas de captação de água, muitas vezes é necessário que esta água seja submetida a processos de tratamento que garantam a performance industrial. Em situações onde o abastecimento é via rede pública, busca-se a menor utilização da água fornecida pelas companhias de

saneamento, o que acarreta em menores custos devido à cobrança realizada pelas concessionárias. Além disso, o uso racional da água pelas indústrias agrega valor a marca devido à preocupação socioambiental que a indústria em questão externa quando adota práticas sustentáveis do uso do insumo. Vale ressaltar que algumas empresas utilizam a água proveniente da chuva como forma complementar ao volume total demandado pelas suas atividades.

Neste cenário que envolve o atendimento dos requisitos legais referentes ao uso da água, responsabilidade socioambiental, otimização dos recursos financeiros e valorização da marca, a AmBev busca incessantemente o uso racional dos recursos hídricos. O compromisso assumido pela companhia, válido para todas suas fábricas no Brasil e no exterior, tem como foco reduzir o consumo de água em 11% no ano de 2012, buscando a meta de 3,5 litros de água para cada litro de produto (Fonte: site AmBev). Na busca pelo atendimento desta meta, a gestão do uso dos recursos hídricos nas fábricas da AmBev tem fundamental importância, uma vez que cada unidade fabril tem metas mensais e anuais específicas de consumo de água que, na média, buscam atingir o índice acima descrito.

Especificamente falando da unidade fabril de Águas Claras do Sul, objeto deste estudo, o abastecimento de água na fábrica é feito através do bombeamento de água subterrânea em sete poços instalados na área da fábrica. Sabendo-se que a operação de uma malha de poços pode causar a interferência na disponibilidade hídrica no ponto de captação de cada poço, efeito causado pela área de influência e pelo cone de depressão, foi diagnosticado que a proposição de um modelo matemático de otimização, baseado na minimização do cone de depressão dos poços, não apenas é aplicável à Águas Claras do Sul como é de grande importância para o gerenciamento dos recursos hídricos da planta.

Diversos aspectos relacionados ao manejo dos recursos hídricos subterrâneos da fábrica de Águas Claras do Sul podem ser influenciados pela adoção da proposta de minimização dos cones de depressão causados pelo regime de operação dos poços da fábrica, de forma a justificar o estudo. Alguns destes aspectos são listados abaixo:

- Mitigação do efeito da influencia entre os poços;
- Atendimento às condicionantes das outorgas de uso da água (volume extraído do aquífero, vazão máxima e horas de bombeamento);

- Atendimento à demanda da fábrica aliado a diminuição de perdas de água por bombeamento excedente;
- Regime de operação de forma escalonada o que garante o menor gasto energético do funcionamento das bombas;
- Diminuição da probabilidade de ocorrência de possíveis conflitos com a comunidade acerca do uso da água subterrânea;

O desenvolvimento de modelos de otimização de algum parâmetro relacionado às águas subterrâneas tem sido justificado pelos vários objetivos associados ao planejamento do uso dessa fonte. A previsão dos efeitos causados pela concentração de poços e vazões bombeadas constitui-se numa das mais importantes aplicações desses modelos (Wendland, 2003).

As águas subterrâneas são as principais fontes disponíveis para o abastecimento de água doce. Devido à escassez do recurso hídrico superficial, o recurso subterrâneo é uma reserva vital, sendo de fundamental importância o desenvolvimento de modelos que simulem situações reais para possibilitar o planejamento e a gestão desses recursos hídricos subterrâneos, incluindo sua proteção e descontaminação (Lourencetti, 2006; CETESB, 2004).

A Associação Brasileira de Águas Subterrâneas estima que são perfurados, anualmente, entre 8.000 e 10.000 poços no Brasil, grande parte destes para alimentar as indústrias e para abastecimento urbano. Esta crescente demanda pelo uso da água subterrânea acontece, principalmente, devido à quatro fatores:

- Degradação acentuada dos corpos hídricos superficiais, principalmente aqueles localizados próximos à centros urbanos;
- Avanço tecnológico que possibilitam o acesso e bombeamento de água de poços profundos;
- Crescimento populacional nos núcleos urbanos;
- Normalmente a água subterrânea apresenta boa qualidade;

Pelos motivos acima citados é notória a necessidade da elaboração de um modelo matemático genérico de otimização do regime de operação dos poços de captação de

água, buscando-se a minimizar os cones de depressão, aplicável não somente à fábrica de Viamão, mas também a sistemas de bombeamento de água subterrânea similares ao objeto de estudo.

1.4 Hipótese

É possível melhorar a gestão do uso da água subterrânea, ou seja, abastecer a fábrica com o menor impacto ambiental ao aquífero, através do uso de técnicas de otimização?

2 Objetivos do estudo

Neste contexto o objetivo geral do estudo é propor regimes de operação dos sete poços da fábrica, de forma a maximizar as cargas hidráulicas em cada poço durante a operação (minimização dos cones de depressão), considerando a demanda média mensal de água da fábrica como demanda mínima de água a ser suprida. Buscou-se desenvolver uma metodologia que auxilie a gestão da água subterrânea, baseada nos princípios de otimização, a fim de atender a demanda hídrica da fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev alinhando os conhecimentos hidrogeológicos com os modelos matemáticos.

3 Revisão bibliográfica

3.1 Hidrogeologia como ciência

A hidrogeologia, por definição, é uma subdivisão da ciência hidrologia que trata da ocorrência, movimentação e qualidade da água abaixo da superfície terrestre (Heath, 1983, p.1). As origens das águas subterrâneas são a infiltração, águas superficiais influentes, infiltração de reservatórios, recarga artificial, condensação, infiltração dos oceanos, águas retidas em rochas sedimentares, etc.

De acordo com as características hidrogeológicas do meio, como por exemplo, o tipo e composição da rocha, a água armazenada no solo adquire características e propriedades diferentes. Em rochas sedimentares a velocidade de deslocamento e capacidade de armazenamento são maiores que em rochas cristalinas, por exemplo. Através de alguns estudos hidrogeológicos, como caracterização litológica do meio e ensaios de bombeamento de água do aquífero, é possível determinar a capacidade de exploração de poços, a recarga do aquífero e outras informações necessárias para o bom aproveitamento e proteção destes depósitos de água subterrânea.

A ocorrência de água subterrânea acontece em duas diferentes situações abaixo da superfície do planeta. A camada chamada de não saturada, ocorre imediatamente abaixo da superfície do solo e na sua composição encontra-se tanto água quanto ar. Esta zona não saturada é quase invariavelmente sustentada por uma zona na qual os vazios do solo encontram-se cheios de água. Tal região é conhecida como zona saturada e é onde é possível explorar o uso da água subterrânea. Além da zona saturada, a outra situação na qual se pode explorar a água subterrânea são as rochas fraturadas, onde a água se acumula nas fissuras destas formações geológicas.

3.1.1 Aquíferos e propriedades hidrogeológicas

Os aquíferos, por definição, são formações geológicas que armazenam e transmitem água. O volume de água subterrânea que se pode explorar em um determinado local depende diretamente das características hidrogeológicas do meio e da capacidade de recarga do aquífero. Wendland (2003) define aquífero como formação geológica, formada por rochas permeáveis seja pela porosidade granular ou pela porosidade

fissural, capaz de armazenar e transmitir quantidades significativas de água. Consistem em rochas não consolidadas, como cascalhos, arenitos, rochas calcárias, que geralmente caracterizadas por grandes extensões de área e são, essencialmente, reservatórios de água.

Classificam-se os aquíferos de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limitrófes na base e no topo e também em função da capacidade de transmissão de água das camadas (base e topo) entre as quais está situado. Basicamente, pode-se classificar os aquíferos como confinados e livres.

Os aquíferos livres, também conhecidos como freáticos, são formações onde zona saturada encontra-se sobre a influência da pressão atmosférica, ou seja, sem uma camada impermeável ou semi-permeável acima desta zona saturada. Já os aquíferos confinados, são formações onde a zona saturada está submetida a uma pressão maior que a atmosférica, devido a presença de uma camada impermeável ou pouco permeável de rocha acima da zona saturada, o que faz seu nível potenciométrico subir acima da camada confinante superior. A figura 1 exemplifica os tipos de aquíferos de acordo com a pressão atuante na zona saturada.

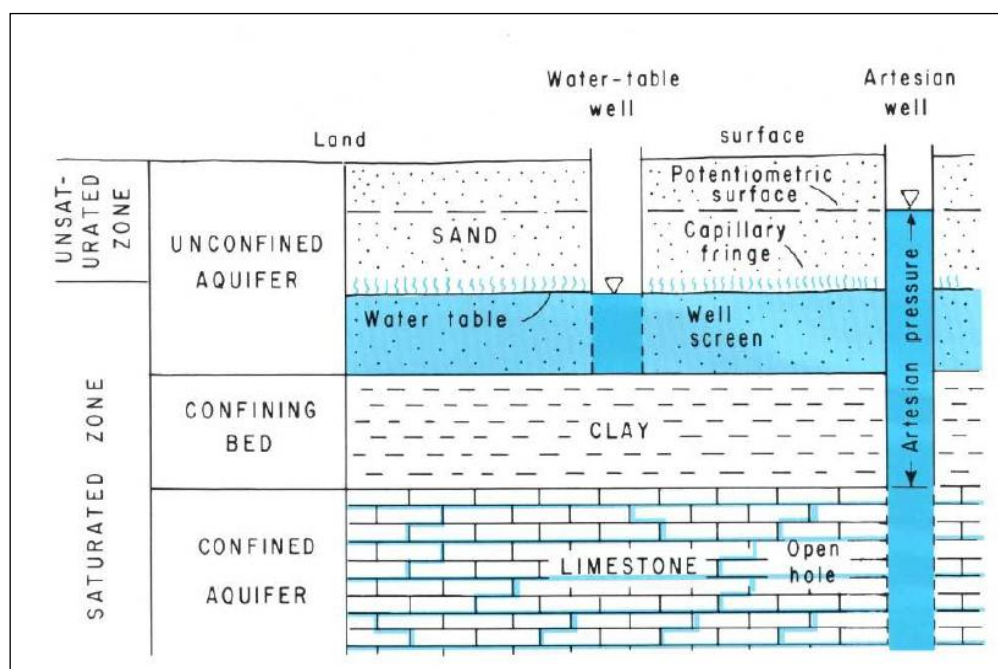


Figura 1: Tipos de aquíferos de acordo com a pressão atuante na zona saturada. Ilustração extraída de Basic Ground-water Hydrology do U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220 (Heath, 1983, p.4).

Os aquíferos têm como função principal armazenar e transportar (transferir) a água subterrânea. Em outras palavras os aquíferos armazenam água como reservatórios e a transporta através dos vazios do solo. Quando se avalia os aquíferos em relação à possibilidade de extração de água subterrânea, é necessário que se conheça alguns parâmetros chave que caracterizam os aquíferos quanto a viabilidade de utilização da água neles contida. Uma importante propriedade relacionada ao armazenamento de água em um aquífero é a porosidade. A porosidade é a relação entre o volume dos poros (vazios do solo) e o volume total do solo. É expressa em fração decimal ou porcentagem e é definida pela equação 1:

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_v}{V_t} \quad (1)$$

onde n é a porosidade expressa em fração decimal, V_t é o volume total de solo ou da amostra de solo, V_s é o volume de sólidos no solo ou na amostra e V_v é o volume de vazios do solo. A porosidade é, portanto, um importante parâmetro da hidrogeologia que indica a quantidade máxima de água que um material poroso pode reter na zona saturada. Entretanto, é igualmente importante entender que apenas uma parcela desta água é passível de abastecer um poço ou uma nascente, não indicando, portanto, a quantidade de água que um aquífero vai render em um possível cenário de bombeamento.

Quando a água é drenada do material saturado, pela ação da gravidade, apenas uma porção do volume saturado nos poros é liberado. A outra porção é retida nos interstícios devido às atrações moleculares de adesão e coesão. Em um aquífero classifica-se como rendimento específico (S_y) a razão entre o volume drenado da zona saturada pelo volume total do solo. A retenção específica (S_r) é a quantidade de água retida, por unidade de volume, após a drenagem por gravidade. A soma entre o rendimento específico e a retenção específica é a porosidade. Assim,

$$n = S_y + S_r \quad (2)$$

$$S_y = \frac{V_d}{V_t} \quad (3)$$

$$S_r = \frac{V_r}{V_t} \quad (4)$$

onde n é a porosidade, S_y o rendimento específico, S_r a retenção específica, V_d é o volume de água drenada do volume total, V_r é o volume de água retida e V_t é o volume total de solo ou da amostra de solo.

A partir dos parâmetros acima definidos é possível se determinar coeficiente de armazenamento (S) em um aquífero. Tal parâmetro é fundamental para a avaliação de viabilidade de projetos de engenharia que pretendem utilizar a água subterrânea em seus processos, uma vez que o coeficiente de armazenamento é definido como o volume de água que o aquífero retém por unidade de área superficial. Os aquíferos confinados apresentam tipicamente os valores do coeficiente de armazenamento na faixa de $5 \times 10^{-5} \leq S \leq 5 \times 10^{-3}$ (Todd, 1980). No caso dos aquíferos livres o valor de S corresponde ao rendimento específico S_y , na ordem de 10^8 . Tal parâmetro é determinado em campo através da interpretação de dados dos ensaios de bombeamento. Para fins de conhecimento do funcionamento da dinâmica de recarga do aquífero faz-se necessária a compreensão de outros parâmetros, como permeabilidade, condutividade e transmissividade hidráulica.

A permeabilidade é a propriedade que define a função transmissão de um aquífero. Mede a facilidade do movimento da água subterrânea através do aquífero e pode ser expressa como condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica, ou coeficiente de permeabilidade (K), é a taxa de fluxo de água através de uma seção transversal unitária sobre a unidade de gradiente hidráulico (por unidade de comprimento ou perda de carga).

A transmissividade hidráulica (T) é a quantidade de água que pode ser transmitida por toda a espessura saturada. É definida pelo produto entre a condutividade hidráulica e a espessura saturada do aquífero, expressa pela equação 5

$$T = K \times b \quad (5)$$

onde K é a condutividade hidráulica e b é a espessura da zona saturada.

A água subterrânea, no seu estado natural, invariavelmente move-se e este movimento é governado pelos princípios da hidráulica. O fluxo de água através de um aquífero é expresso pela Lei de Darcy. Esta lei estabelece que a taxa de fluxo através dos poros é proporcional a perda de carga e inversamente proporcional ao comprimento do caminho de escoamento. A velocidade aparente de Darcy é definida pela equação 6.

$$V = -K \frac{\partial h}{\partial l} \quad (6)$$

onde V é a velocidade específica, K a condutividade hidráulica e dh/dl é o gradiente hidráulico. O sinal negativo representa que o escoamento está acontecendo na direção da diminuição de h .

A vazão total através de uma seção transversal de área A é, portanto, definida como

$$Q = V.A = -K.A. \frac{\partial h}{\partial l} \quad (7)$$

onde A é a área da seção transversal.

Ao se realizar o bombeamento de água dos aquíferos para a exploração da água subterrânea, o impacto ambiental associado a esta atividade é o rebaixamento do nível de água do lençol freático. Denomina-se de rebaixamento do lençol freático, ou da superfície piezométrica, a variação do nível de água entre a etapa de pré-bombeamento (nível estático) para o nível durante o bombeamento (nível dinâmico). Esta variação entre os níveis é facilmente identificada nas curvas de rebaixamento, que variam conforme a distância do poço. Esta curva, para um fluxo radial, descreve o cone de depressão, que por sua vez atua sobre uma área de influência (Figura 2)

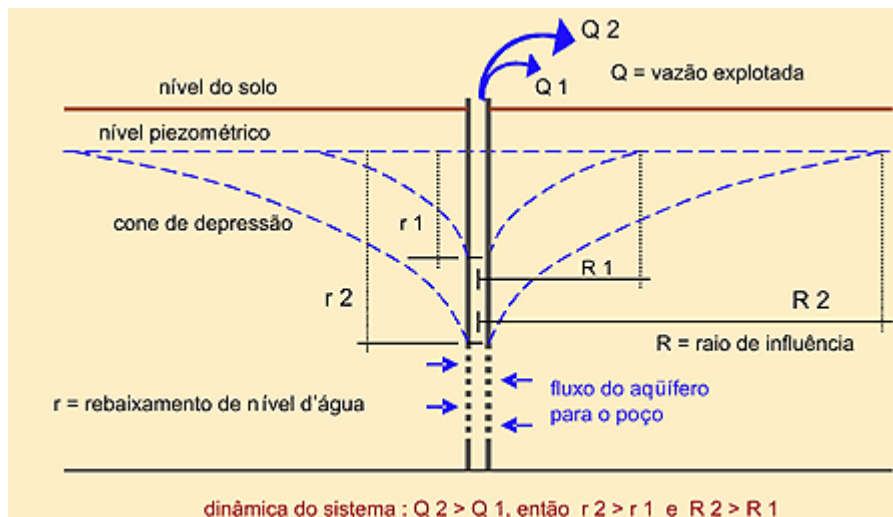


Figura 2: Perfil transversal de um poço em operação (Fonte: www.acquasolo.com.br).

A definição dos parâmetros hidrogeológicos acima apresentados são de grande importância para o entendimento da dinâmica da hidráulica envolvida não só nos processos naturais de recarga de aquíferos mas também na ação antrópica da extração de água subterrânea. Desta forma, o conhecimento destes parâmetros da área de estudo são indispensáveis para a proposta do modelo matemático de otimização dos cones de depressão, tendo em vista que a função objetivo é dependente dos parâmetros, para que, assim, atinja-se o regime de operação ótimo e a adequada gestão dos recursos hídricos da fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev.

3.2 Modelagem matemática de otimização/simulação de sistemas de água subterrânea

Modelos de simulação do comportamento dos aquíferos vêm sendo utilizados para examinar os efeitos das várias estratégias de gestão da água subterrânea. A combinação das técnicas de simulação e otimização vem se demonstrando um método poderoso e usual na determinação de estratégias de planejamento e gestão dos sistemas de água subterrânea.

A classificação dos modelos de gestão da água subterrânea baseados em técnicas de otimização é baseada em duas categorias básicas, conforme definição de Gorelick (1983).

- a) Modelos de gestão hidráulica das águas subterrâneas, cujos objetivos são a gestão do bombeamento e da recarga;
- b) Modelos de política de avaliação, que também podem considerar a economia da alocação da água (outorgas do uso da água)

Os modelos de gestão hidráulica vêm sendo desenvolvidos com três principais abordagens: abordagem de incorporação, a abordagem de controle ótimo, unidade de abordagem da matriz de resposta (Mays e Tung, 1983).

A primeira abordagem incorpora as equações do modelo de simulação diretamente no problema de otimização a ser resolvido. Este método, segundo os autores, tem limitada aplicação e é principalmente utilizado para águas subterrâneas. O problema de otimização rapidamente torna-se muito complexo para se resolvido por algoritmos disponíveis quando o aquífero é de larga escala, especialmente nos livres.

A segunda é baseado nos conceitos da teoria de controle ótimo com a metodologia que conecta as técnicas de otimização com um simulador de água subterrânea para, implicitamente, resolver a equação que rege o fluxo de águas subterrâneas para cada interação do processo de otimização. Esta metodologia pode ser feita através de uma variação da abordagem de incorporação com as equações sendo resolvidas implicitamente. As equações do simulador são usadas para expressar as variáveis de estado em termos de variáveis, produzindo uma redução dos problemas de otimização que muitas vezes surgem.

A terceira gera uma matriz de resposta com a simulação sendo feita várias vezes, cada uma com um bombeamento unitário. O rebaixamento é feito através da sobreposição destes valores unitários. Isto produz um pequeno problema de otimização, mas este método apresenta duas principais limitações. É exato somente para aquíferos confinados, mas tem boa precisão para aquíferos livres com pequeno rebaixamento relativo a espessura da zona saturada. Heidari (1982) descreve um método de correção do rebaixamento que pode ser usado para melhorar a precisão para um aquífero freático com grandes rebaixamentos, mas a precisão não pode ser garantida. Além disso, a matriz de resposta pode ser recalculada quando fatores exógenos, como condições de contorno do aquífero ou mudança na localização de poços potenciais, são inseridos no

modelo. Uma alternativa é tratar esses fatores como variáveis decisórias, mas mais variáveis e restrições são incluídas no modelo de otimização.

Os modelos de política, avaliação e alocação da água subterrânea são utilizados para propostas de outorga de uso da água envolvendo a gestão de objetivos econômicos alienados às restrições políticas juntamente com a adição da gestão das restrições hidráulicas. Estes modelos apresentam problemas transitórios nos aquíferos que consideram a economia em resposta às políticas institucionais e ao uso conjuntivo da água superficial e subterrânea.

Os modelos numéricos de simulação/otimização vêm sendo utilizados extensivamente para avaliar e desenvolver uma melhor compreensão do fluxo das águas subterrâneas. Além disso, são utilizados para explorar os problemas hidrogeológicos e para prever os impactos das várias alternativas de gestão da água subterrânea, tais como os impactos de bombeamento e recarga, interações da superfície da zona saturada, migração de poluentes, intrusão salina, etc. São utilizados, portanto, nos problemas recorrentes da gestão da água subterrânea, considerando vários cenários, e com o objetivo de tentar encontrar o que melhor alcança as exigências de uma determinada demanda de projeto, adequação legal ou minimização de custos operacionais.

A partir da década de 70 os modelos numéricos vêm sendo utilizados para solucionar os problemas relacionados à água subterrânea. Remson e Aguado (1974), descreveram a técnica de incorporação desses modelos numéricos em modelos de programação lineares (LP) de gestão da água subterrânea. As “variáveis da água subterrânea”, tais como características hidrogeológicas do meio e vazões máximas de bombeamento, são inseridas diretamente como variáveis decisórias na formulação do programa linear. Os autores introduziram a programação linear nos modelos de gestão baseados na incorporação da aproximação de diferenças finitas das equações diferenciais restritivas do modelo. Eles obtiveram soluções para exemplos de aquíferos livres e confinados, com fluxo uni ou bidimensional, em estado estacionário ou regime transiente.

Em seu trabalho pioneiro, os autores compararam os resultados obtidos através de um modelo de gestão da água subterrânea baseado em programação linear com os resultados obtidos em modelos analógicos numéricos da água subterrânea. Foi determinada a localização fixa de 3 poços em uma matriz e variou-se a localização de um 4º poço. A mínima taxa de descarga foi especificada para cada poço. O objetivo foi

maximizar a carga hidráulica na área de interesse. Desta forma o problema se resume em determinar a localização do 4º poço para maximizar as cargas hidráulicas para diferentes taxas de bombeamento e determinar a carga ótima em cada nó da matriz. A partir da matriz gerada pela mudança de localização do 4º poço em relação aos demais, obteve-se 8 equações com 16 variáveis. Foi possível, assim, determinar a função objetivo que visava a maximização das cargas hidráulicas. Os autores concluíram que o modelo numérico validou o modelo de programação linear da água subterrânea, em respeito às predições de otimização do bombeamento e distribuições de carga dos poços deste mesmo modelo. Além disso, uma melhor condição ótima pode ser obtida por qualquer um dos modelos analisados, permitindo atingir o déficit de descarga desejada, a partir de mais de um poço ou usando um espaçamento menor entre os poços.

Aguado et. al (1974) utilizaram o método de programação linear para determinar o plano ótimo para desaguamento de um canteiro de obras sobre restrições específicas. Os autores buscaram encontrar o número ótimo, localização e taxas de bombeamento ótimas de poços, necessários para manter o nível da água subterrânea abaixo do nível do terreno (rebaixamento do lençol freático).

Nos exemplos explorados por Remson e Aguado (1974), o objetivo principal foi maximizar as cargas hidráulicas em pontos específicos. Em um paralelo ao estudo proposto neste trabalho, a minimização dos cones de depressão pode ser interpretada como a maximização das cargas hidráulicas em cada poço durante o regime de operação dos poços. Portanto, os estudos destes autores forneceram uma importante base teórica para a realização do estudo proposto neste trabalho.

Os modelos de otimização podem ser utilizados em outras esferas da gestão do uso da água subterrânea, não apenas do regime ótimo de bombeamento. Gorelick & Remson (1982) incorporaram o estado estacionário com diferenças finitas na equação de transporte de poluentes em aquíferos como restrições do modelo. Eles maximizaram a disposição de resíduos sólidos em dois locais específicos, de forma a proteger simultaneamente a qualidade da água (afetada pelo lixiviado percolado até a zona saturada) em poços de abastecimento e, paralelamente, garantir a manutenção e vida útil do local de disposição destes resíduos sólidos. O objetivo principal deste estudo foi identificar todos os locais adequados para descarte de resíduos. Foi possível identificar

todos os possíveis locais de depósito pela interpretação das soluções dos dois problemas de programação linear.

Willis (1983) utilizou a programação linear para determinar o regime ótimo de bombeamento para três períodos consecutivos, a fim de atender às demandas de água da agricultura. Os objetivos foram maximizar a soma de cargas hidráulicas e minimizar o déficit total de água demandado. O aquífero considerado neste estudo era um aquífero livre, situado na Bacia Hidrográfica Lin Yun, em Taiwan. A equação de fluxo foi calculada utilizando a expansão em série de Taylor. Isto resultou em uma aproximação linear, resolvida por meio de um procedimento iterativo. Ele usou a abordagem da matriz de resposta como solução para o problema proposto.

Misirli et.al (1995) abordaram a interceptação da propagação dos poluentes que encontram-se em fase livre em aquíferos através da instalação de poços com o intuito de realizar o bombeamento dos contaminantes. Esta é uma solução amplamente utilizada para problemas de contaminação da água subterrâneas. O objetivo proposto pelos autores foi a minimização dos custos. Foi feita a comparação entre um modelo quadrático e o modelo de programação integral. Os modelos propostos são um modelo de programação quadrática que minimiza apenas os custos operacionais de poços e um modelo de programação inteira que minimiza tanto os custos operacionais e os custos fixos de instalação de poços. Embora a solução do modelo de programação quadrática produza custos operacionais mais baixos, o número total de poços de interceptação preenchidos e, conseqüentemente, os custos de investimento de capital requeridos são consideravelmente mais elevados do que os do modelo de programação inteira mista. Os resultados mostraram que uma economia considerável pode ser obtida se os custos fixos são contabilizados em modelos de otimização em problemas relacionados a projetos de contenção.

Percebe-se a aplicabilidade dos modelos matemáticos de otimização também na determinação de possíveis zonas de captura de água subterrânea. Tal aplicação é importante no planejamento estratégico de municípios e empresas, por exemplo. Bonganha et. al (2005) simulou numericamente os aquíferos que compõem a área de entorno do município de Araraquara, e buscou, desta maneira, disponibilizar uma ferramenta de gestão para a utilização sustentável dos recursos hídricos subterrâneos. Os autores utilizaram o programa Visual MODFLOW. Simulou-se então, a situação do

sistema hidrogeológico considerando a vazão atual de bombeamento de 19 poços, considerados os mais significativos da região. Foram feitas simulações visando estimar os efeitos causados por futuros aumentos na demanda de água pelo município. Em uma dessas simulações assumiu-se o dobro do bombeamento da extração atual de água nos 19 poços. Constatou-se em nível regional que o rebaixamento pode chegar a 22 metros, resultado que deve ser levado em conta para elaboração das políticas de gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos no município de Araraquara.

Mays e Tung (1983) apresentaram os princípios básicos de gestão, simulação e otimização para os sistemas de água subterrânea. Paralelamente à definição de parâmetros hidrogeológico, os autores apresentaram as equações que regem os sistemas de simulação/otimização para aquíferos livres e confinados, uni e bidimensionais, em estado estacionário ou transiente, também através de modelos de programação linear. Muitos dos problemas apresentados pelos autores consistem na maximização da carga hidráulica em poços durante o regime de bombeamento, sendo, desta forma, um importante guia para a resolução do problema proposto neste trabalho.

4 Descrição da área de estudo

4.1 Caracterização hidrogeológica da área de estudo – Terreno da fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev localizado no município de Viamão/RS.

A caracterização hidrogeológica da área de estudo é extremamente importante para a definição de alguns parâmetros essenciais para o correto funcionamento do programa de otimização proposto neste estudo. Com o objetivo de melhorar a gestão dos recursos hídricos da fábrica, baseado na minimização dos cones de depressão iminentes ao bombeamento da água subterrânea, o conhecimento da hidrogeologia local, especificamente falando da transmissividade do aquífero, torna-se imprescindível para a função objetivo proposta no modelo matemático. Para tanto, consultou-se os estudos, alguns da época do projeto da fábrica e outros do monitoramento periódico das condições operacionais do bombeamento, fornecidos pela AmBev.

A área objeto do presente estudo, denominada Águas Claras do Sul, localiza-se no município de Viamão/RS, ao lado leste da RS-040 e abrange uma área de aproximadamente 350 hectares, conforme imagem de satélite retratada na figura 3.

Em relação à geologia da região estudada, é importante ressaltar que são encontrados sedimentos terciários da Província Costeira do Rio Grande do Sul. Tais sedimentos são essencialmente arenosos, sobrepostos a rochas granitóides, cuja profundidade deve ser superior a 130 metros (Leão e Grehs, 1996).

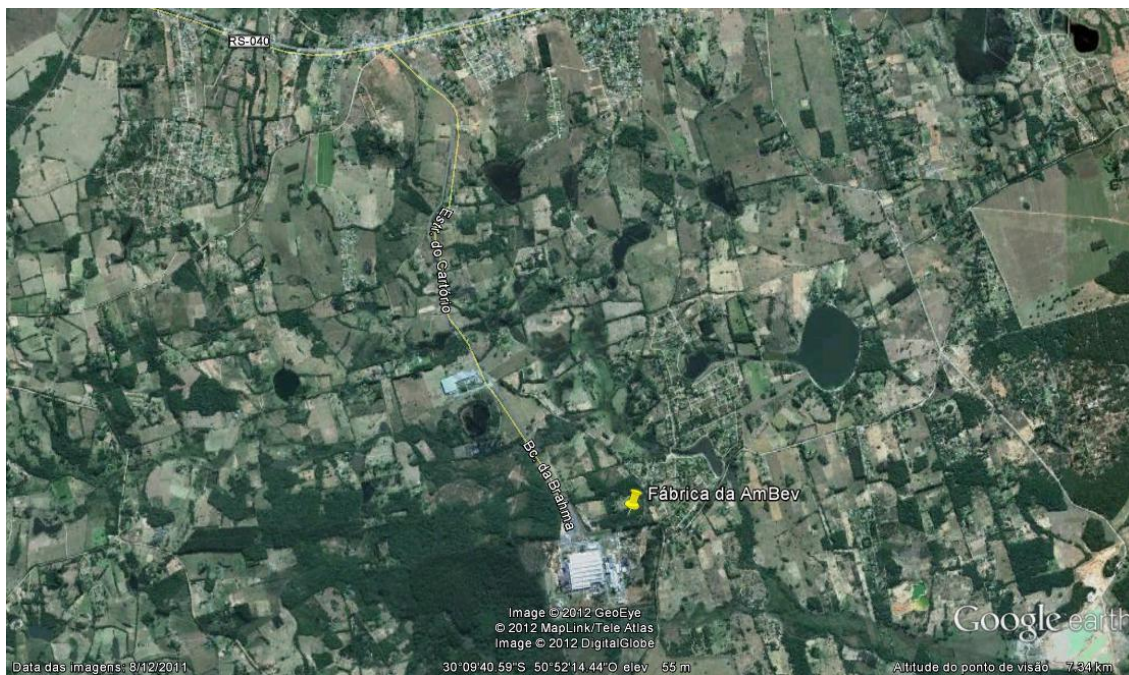


Figura 3: Localização da área do presente estudo;

Estes depósitos sedimentares foram mapeados na escala 1:100.000 pelo Centro de Estudos Costeiros e Oceanográficos – CECO, do Instituto de Geociências da UFRGS (Mapa Geológico Passo do Vigário e Lagoa Capivari, 1984), como sendo depósitos eólicos de dunas litorâneas. O perfil geológico traçado na construção dos poços de captação de água na época do projeto da fábrica indica que em 120 metros perfurados predominam areias que variam de finas a médias (Leão & Grehs, 1996). Os geólogos Marcos Leão e Sandor Grehs desenvolveram em meados do ano de 1996, o primeiro estudo sobre a possibilidade de extração de água subterrânea na área objeto deste estudo.

Ainda no ano de 1996, a empresa paulista Água e Solo, através do estudo denominado "Construção e Condições de Exploração do Poço Tubular Profundo ACGL-1" constatou a presença de rochas do embasamento cristalino, subjacentes aos sedimentos, na forma de granitos (sem interesse hidrogeológico, servindo apenas de base ao depósito sedimentar). Ainda neste mesmo estudo, constatou-se que sobre esta camada impermeável encontram-se os sedimentos Pleistocênicos e Holocênicos da planície costeira do Rio Grande do Sul, compostos por sedimentos arenosos, silticos e argilosos. A espessura global indicada pela empresa para esta faixa de material sedimentado pode chegar a 140 metros.

No ano seguinte a empresa AFC Consultoria e Serviços Geofísicos, por recomendação da Secretaria do Desenvolvimento e dos Assuntos Internacionais do estado do Rio Grande do Sul (SEDAI/RS), desenvolveu o levantamento geofísico da área da fábrica. Tais métodos são aplicados com a finalidade de definir alguns parâmetros importantes na caracterização das rochas em subsuperfície, o que é fundamental para tomada de decisão acerca da exploração, ou não, da água subterrânea local, tendo em vista que este método indica o tipo da rocha e o volume do aquífero, por exemplo.

Realizado através de sondagens elétricas, a caracterização geofísica fornece a variação da resistividade elétrica das rochas em um determinado ponto. A correlação com a geologia é feita a partir dos valores de resistividade elétrica obtidos para cada camada subsuperficial, permitindo assim o tipo de material atravessado. A tabela 1 apresenta valores de resistividade para diferentes materiais.

Tabela 1: Valores de resistividade para diferentes materiais (Costa, 1997);

ÁGUAS OU ROCHAS	RESISTIVIDADE (ohm.m)
Água do mar	0,2
Água de aquíferos aluviais	10 - 30
Água de fontes	50 - 100
Areias e cascalhos secos	1000 - 10000
Areias e cascalhos com água doce	50 - 500
Areias e cascalhos com água salgada	0,5 - 5
Argilas	2 - 20
Calcáreos	300 - 10000
Arenitos argilosos	50 - 300
Arenitos	300 - 10000

Através de 20 sondagens elétricas verticais foi possível estabelecer a correlação necessária entre a geologia/hidrogeologia com os parâmetros geofísicos. As sondagens detectaram três camadas geoeletricas distintas:

- camada superficial com resistividade variável, maior que 2000 ohm.m e, aproximadamente, 15 metros de espessura, indicando areia superficial não saturada;
- a segunda camada é bem definida, com resistividade superior 1000 ohm.m e, aproximadamente 100 metros de espessura, perfeitamente relacionável a zona saturada;

- e a terceira camada (camada inferior), com resistividade bem mais baixa, entre 25 e 75 ohm.m, indicando a camada impermeável;

A tabela 2 resume o modelo de correlação hidrogeológica/geofísica para a área em questão.

Tabela 2: Correlação geologia/geofísica do subsolo da área da fábrica (Costa, 1997);

CAMADA	RESISTIVIDADE (ohm.m)	GEOLOGIA
1	> 2000	areias não saturadas, superficiais
2	360 - 1300	areias saturadas, zona saturada
3	25 - 75	areias siltico-argilosas, impermeáveis, base do aquífero

As sondagens elétricas permitiram uma clara definição das características do aquífero da região, apresentando as três camadas (não saturada, saturada e impermeável) bem definidas em relação aos valores de resistividade. Trata-se, portanto de um aquífero livre, cujo volume é estimado em $2,9 \times 10^8$ m³. As espessuras da zona saturada variam entre 91 e 142 metros, como pode ser visto na figura 4, onde retrata-se o corte longitudinal da área onde se realizou as sondagens.

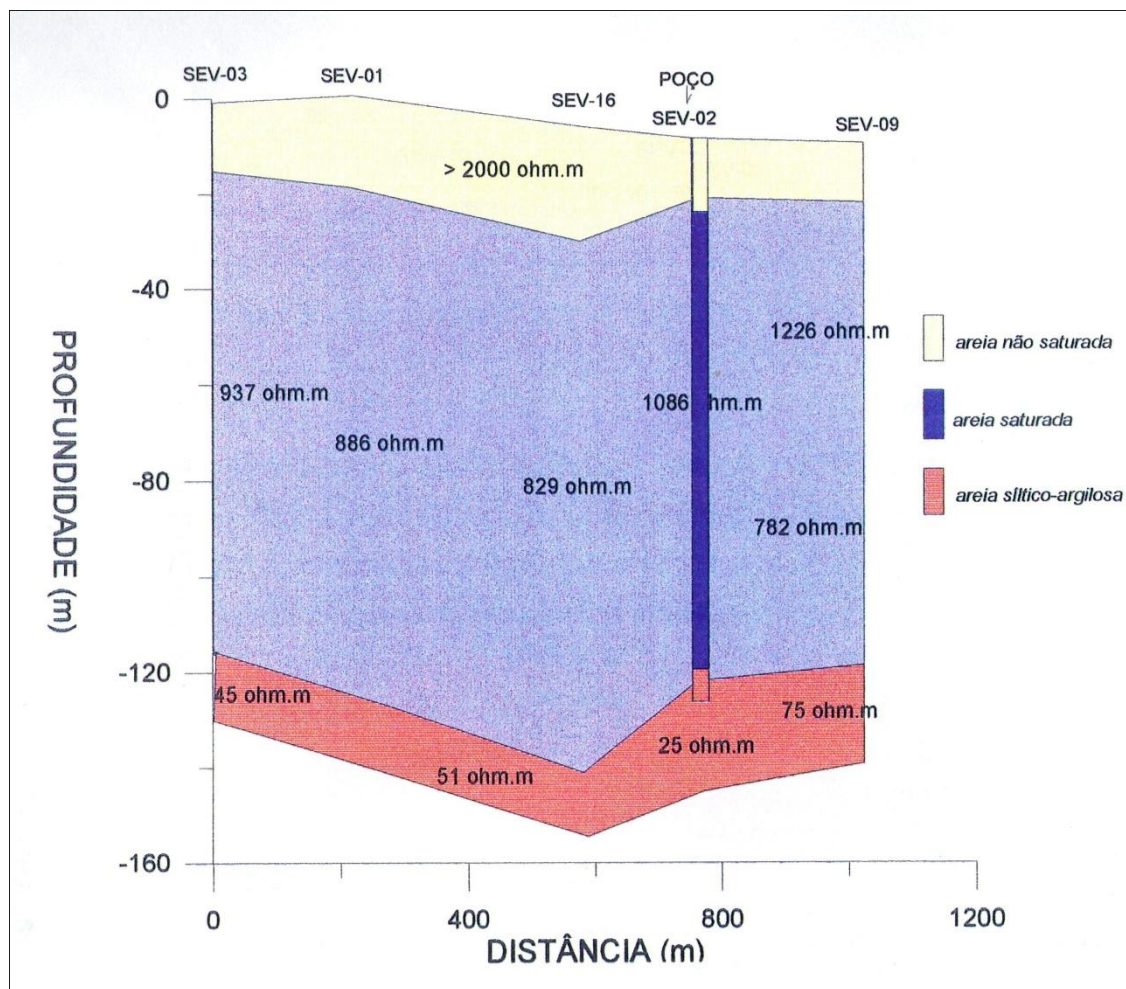


Figura 4: Seção longitudinal da área de sondagem de caracterização geofísica do terreno (Costa, 1997, p.11);

Já em 2008, em um estudo de monitoramento das condições atuais de bombeamento da água subterrânea da fábrica, a empresa Georep, em parceria com a empresa Uniper constatou a presença de um aquífero na área da fábrica. Tal formação geológica, não verificada nos demais estudos preliminares, é composta por materiais ou rochas porosas (incluem-se aqui as argilas siltsas ou arenosas) que, embora armazenem quantidades significativas de água no seu interior, permitem a circulação apenas de forma muito lenta, indicando uma camada impermeável.

A definição das características hidrogeológicas é fundamental para o uso confiável do modelo matemático. Condições hidrogeológicas distintas indicam valores de transmissividade hidráulica distintos. De acordo com os estudos realizados desde a época do projeto da fábrica determinou-se diferentes valores de transmissividade, de acordo com a tabela 4.

Tabela 3: Valores de transmissividade hidráulica, definidos através de ensaios de bombeamento, dos estudos realizados na área da fábrica de Águas Claras;

	Transmissividade hidráulica (m²/dia)
IPH - 1996	691,2
Água e Solo - 1998	96
Uniper - 2008 (poço 4)	2505,3
Uniper - 2008 (poço 5)	992,2

De acordo com os estudos iniciais do projeto e do laudo geofísico realizado na área, é notória a presença de um aquífero livre no terreno estudado. Desta forma, esta condição hidrogeológica foi assumida na elaboração deste estudo. Esta definição é importante para assumirmos um valor adequado de transmissividade hidráulica e, assim, executar o modelo de otimização da maneira adequada.

O valor de transmissividade hidráulica assumido neste estudo, para a área da fábrica de Águas Claras do Sul da AmBev, foi de 1200 m²/dia. Este valor, considerado apropriado pelo Geólogo Sandor Grehs, coorientador deste estudo e responsável por um dos estudos iniciais da hidrogeologia do local estudado, é um valor médio entre os valores encontrados nos demais estudos realizados até então para o mesmo terreno. É importante ressaltar que o modelo matemático é sensível à alterações nos valores de transmissividade, porém, para se realizar as simulações neste modelo, deve-se definir um valor para este parâmetro. Como a transmissividade hidráulica é uma característica do meio, define-se o seu valor através de ensaios hidrogeológicos na área a ser estudada.

5 Metodologia

Como dito anteriormente, o objetivo deste estudo é tentar melhorar o gerenciamento do uso da água subterrânea da fábrica de Águas Claras do Sul da Ambev, a partir da determinação do regime de operação ótimo dos poços da fábrica. Entende-se por regime ótimo, neste caso, aquele que atende a demanda volumétrica de água da fábrica com o menor cone de depressão em cada poço, de forma a evitar a interferência entre poços. O cone de depressão é a consequência radial da alteração do nível estático do aquífero para o nível dinâmico, ou seja, o impacto ambiental do bombeamento de água subterrânea consiste na alteração da carga hidráulica nos poços durante o bombeamento de água.

Para atingir o objetivo proposto, utilizou-se o software de otimização chamado General Algebraic Modeling System (GAMS), cuja função objetivo busca maximizar a carga hidráulica em cada poço da Ambev durante a operação dos poços e, desta forma, garantir o menor cone de depressão.

O GAMS é um sistema de modelagem de alto nível para programação matemática e otimização. O software é constituído por um compilador de linguagem de programação, de alto desempenho que permite a iteração de valores numéricos que buscam atingir um determinado valor, condicionado a restrições propostas pelo projetista. O GAMS pode ser adaptado para aplicativos complexos de modelagem em grande escala, e permite construir modelos sustentáveis de grande porte que podem ser adaptados rapidamente a diversas situações, como por exemplo, uso da água subterrânea, alocação de recursos, etc. (FONTE: www.gams.com)

5.1 Descrição física do modelo de otimização

Na formulação do estudo considerou-se o fluxo unidimensional da água subterrânea em um aquífero livre. Tal consideração implica em uma limitação do modelo, uma vez que a influência do cone de depressão não se manifesta em apenas uma dimensão. Além disso, considerou-se estado estacionário, ou seja, o bombeamento não varia em função do tempo como em um regime transiente.

Para tanto, projetou-se a malha espacial dos poços da fábrica em um plano que indicasse a direção do fluxo da água subterrânea. Primeiramente, identificou-se a localização geográfica dos poços, conforme a figura 5.



Figura 5: Posição geográfica dos sete poços de captação de água subterrânea;

Para se determinar a direção do fluxo da água subterrânea determinou-se o nível piezométrico em cada um dos poços durante o regime de operação dos poços. Esta determinação foi realizada com os dados dos monitoramentos periódicos dos níveis estáticos e dinâmicos da Ambev, e atribuindo-se a profundidade média do aquífero igual a 100 m (dados do estudo geofísico realizado na área da fábrica). Sendo assim, através da caracterização dos níveis piezométricos dos poços e considerando a profundidade média do aquífero, calcula-se o nível h em cada um dos poços, durante a retirada de água o aquífero. Este parâmetro h , expresso em metros, é o que define a direção do fluxo da água subterrânea e é calculado pela subtração da profundidade média do aquífero com o nível estático e o nível dinâmico. A direção do fluxo é um dado de entrada do modelo matemático de otimização, caracterizando as condições de contorno que balizam o comportamento das cargas hidráulicas em cada poço durante a operação.

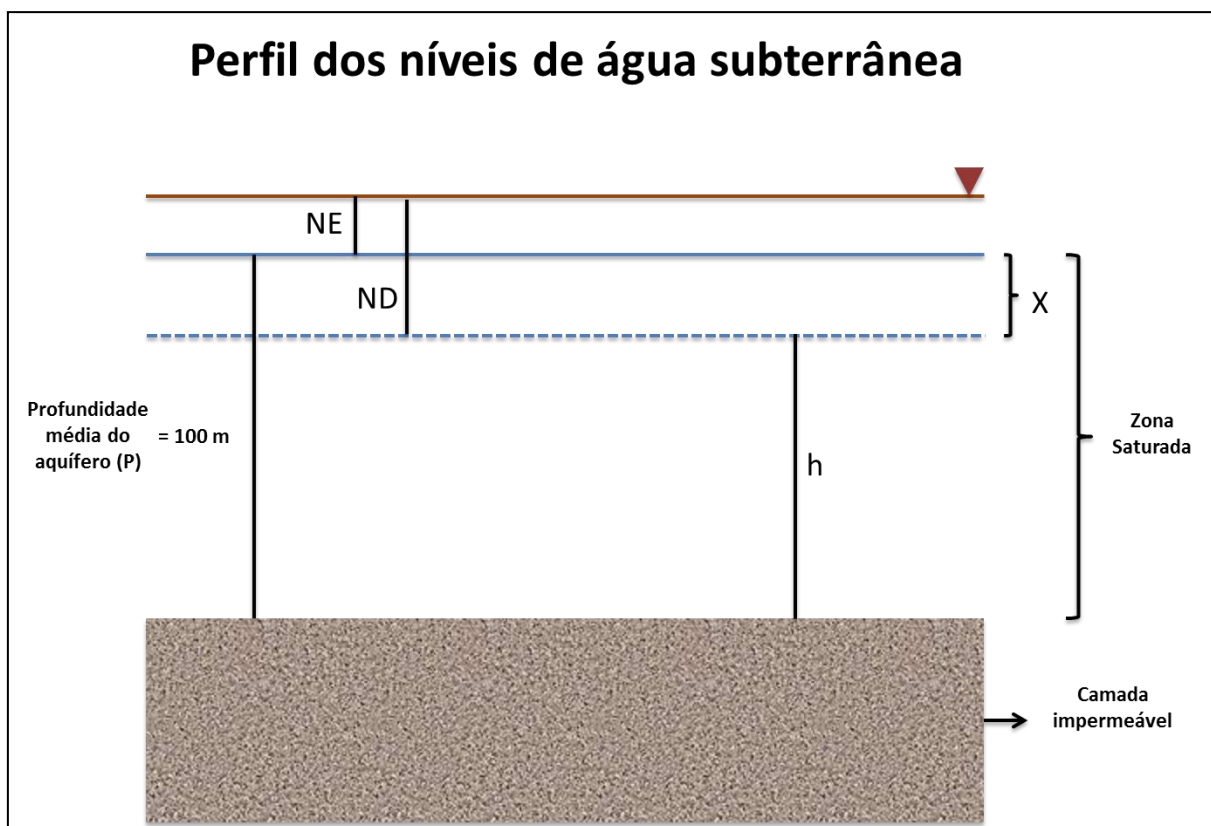


Figura 6: Perfil dos níveis da água subterrânea;

A altura h é definida, portanto, pela equação 8.

$$h = P - (ND - NE) \quad (8)$$

onde P é a profundidade média do aquífero, ND o nível dinâmico e NE é o nível estático.

Pelos dados de monitoramento periódico dos níveis estáticos e dinâmicos de cada poço da fábrica e, assumindo a profundidade média do aquífero de 100 metros, obteve-se o h para cada poço, conforme a tabela abaixo.

Tabela 4: Determinação da altura h para cada poço da fábrica;

	Profundidade (m)	ND (m)	NE (m)	h (m)
Poço 6	100	13	7	94
Poço 7	100	15	8	93
Poço 3	100	22	14	92
Poço 5/9	100	45	17	72
Poço 4/8	100	49	20	71
Poço 2	100	26	17	91
Poço 1	100	47	17	70

A partir destes dados relacionou-se a posição dos poços com a altura h , conforme a figura 7.

**Figura 7: Nível h (m) em cada poço de abastecimento da fábrica de Águas Claras do Sul;**

A partir destes dados verificou-se que o fluxo de água subterrânea (maior h para menor h) segue no sentido da direção nordeste. Com a determinação do sentido do fluxo da água subterrânea foi possível determinar o plano no qual os poços foram projetados para que a simulação unidimensional fosse realizada.

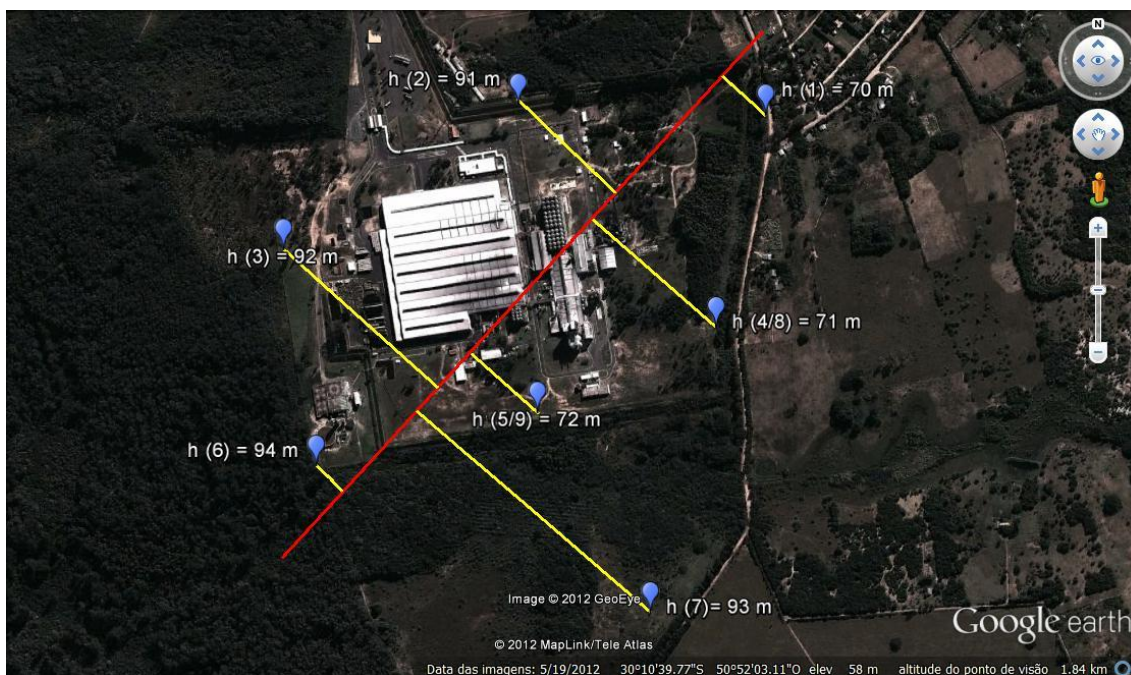


Figura 8: Plano de projeção unidimensional dos poços;

Percebe-se um gradiente na altura h , indicando a direção do fluxo. Importante ressaltar que para o poço 2 a altura h é igual a 92 metros, caracterizando uma exceção no sentido do fluxo de água subterrânea. Uma explicação plausível para isto é que o poço em questão está localizado sobre dois taludes de altura não definida, o que altera o referencial dos níveis hidráulicos. Desta forma, o poço 2 representa um “ponto fora da curva” na determinação do fluxo, o que não influencia em nada o estudo.

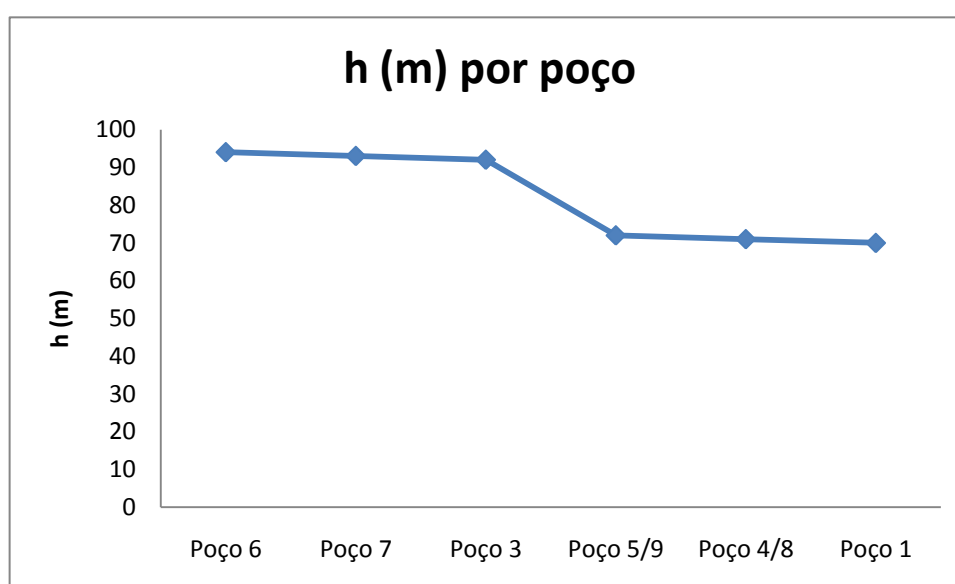


Figura 9: Nível hidráulico nos poços;

5.2 Formulações matemática do objeto de estudo

A premissa básica deste trabalho é considerar que a otimização se dará em estado estacionário e com o fluxo unidimensional da água subterrânea em um aquífero livre. Após a definição da direção do fluxo e do plano onde os poços foram projetados, determinou-se a seção longitudinal que define o problema, conforme a figura 10.

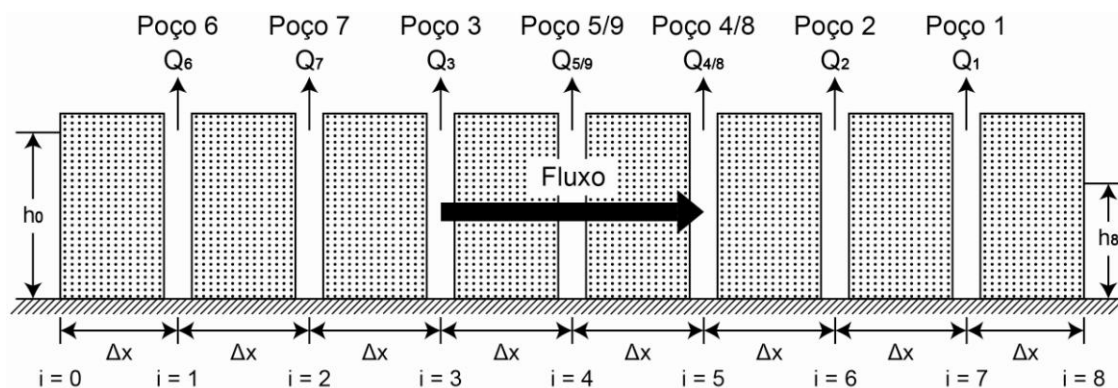


Figura 10: Seção longitudinal do aquífero livre unidimensional;

Neste trabalho considerou-se a distância média entre os poços projetados no plano (Δx) igual a 50 metros.

A pergunta fundamental deste estudo é: quais as vazões que se deve bombear em cada poço ($Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_7$) para que a demanda da fábrica seja suprida mas com a maximização da soma das cargas hidráulicas em cada poço durante o regime de operação (atenuação dos cones de depressão)?

Para um aquífero livre e unidimensional, a partir da Lei de Darcy, a equação governante para o problema proposto é

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) = Q \quad (9)$$

onde T é a transmissividade hidráulica (m^2/dia) e $Q(x)$ ($m^3/dia/m^2 = m/dia$) é a taxa de bombeamento por unidade de área do aquífero. Logo, o modelo matemático entende como demanda, ou vazão de água bombeada, o quanto foi rebaixado o nível de água em um poço em certo período de tempo.

Quando a transmissividade hidráulica é homogênea e aplicamos a aproximação por diferenças finitas, a partir do uso da segunda derivada da equação governante, definimos matematicamente as equações base para o modelo matemático. Assim,

$$\frac{\left(T \frac{\partial h}{\partial x}\right)_{i+1/2,j} - \left(T \frac{\partial h}{\partial x}\right)_{i-1/2,j}}{\Delta x} - Q_{i,j} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\left(T \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x}\right)_{i+1/2,j} - \left(T \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x}\right)_{i-1/2,j}}{\Delta x} - Q_{i,j} = 0 \quad (11)$$

$$A_{i,j}(h_{i+1,j} - h_{i,j}) + B_{i,j}(h_{i,j} - h_{i-1,j}) - Q_{i,j} = 0 \quad (12)$$

onde

$$A_{i,j} = \frac{T}{\Delta x^2}, B_{i,j} = \frac{-T}{\Delta x^2} \quad (13)$$

e Q_i é a taxa de rebaixamento da carga hidráulica em um nó específico. Esta equação, baseada nas diferenças finitas, é aplicada em cada nó na qual a carga hidráulica é desconhecida (Q6, Q7, Q3, Q5/9, Q4/8, Q2, Q1).

Para cada simulação proposta, a demanda mínima de água deve ser expressa em metros de rebaixamento por dia. Para fazer esta conversão utilizou-se a equação 14.

$$Q(m/d) = \frac{Q(m^3/d)}{T(m^2/d)} \cdot (i-1) \quad (14)$$

onde i é o número de nós (número de poços mais condições de contorno).

Por exemplo: para uma demanda de 6000 m³/dia, assumindo a transmissividade hidráulica de 1200 m²/dia e 7 poços (i=9), teremos

$$Q(m/d) = \frac{6000m^3/d}{1200m^2/d} \cdot (9-1) = 40m$$

5.3 Modelo matemático aplicado ao estudo de caso – Fábrica de Águas Claras do Sul da Ambev.

Na aplicação do modelo matemático para o estudo de caso em questão, considerou-se a transmissividade hidráulica igual a 1200 m²/dia, sete poços, nível hidráulico esquerdo de 96 m, nível hidráulico direito de 68 m, distância entre os poços de 50 m e a demanda de água de acordo com o histórico de consumo de água da fábrica.

O nível hidráulico esquerdo foi definido como 96 m para garantir um gradiente hidráulico em relação ao nível hidráulico do primeiro poço projetado no plano da direção do fluxo da água subterrânea. Da mesma forma, o nível hidráulico direito foi definido como 68 m para garantir um gradiente hidráulico com o último poço do plano.

Tabela 5: Níveis hidráulicos para cada nó;

Nós	Níveis hidráulicos – h (m)
0	96
Poço 6	94
Poço 7	93
Poço 3	92
Poço 5/9	72
Poço 4/8	71
Poço 2	91
Poço 1	70
8	68

As vazões mínimas foram determinadas a partir dos consumos diários de água pela fábrica nos anos de 2009 e 2010. A partir do histórico de vazões determinou-se o consumo médio mensal de água da fábrica nos anos de 2009 e 2010, conforme a tabela 6 e figura 11.

Tabela 6: Consumo médio mensal de água da fábrica nos anos de 2009 e 2010;

Demanda média mensal de água (m ³)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2009	5967	7505	6251	6284	5327	4243	4922	5426	6649	6439	6777	7515
2010	7308	7505	7484	6691	5832	5717	6349	6168	7078	8168	8384	9012

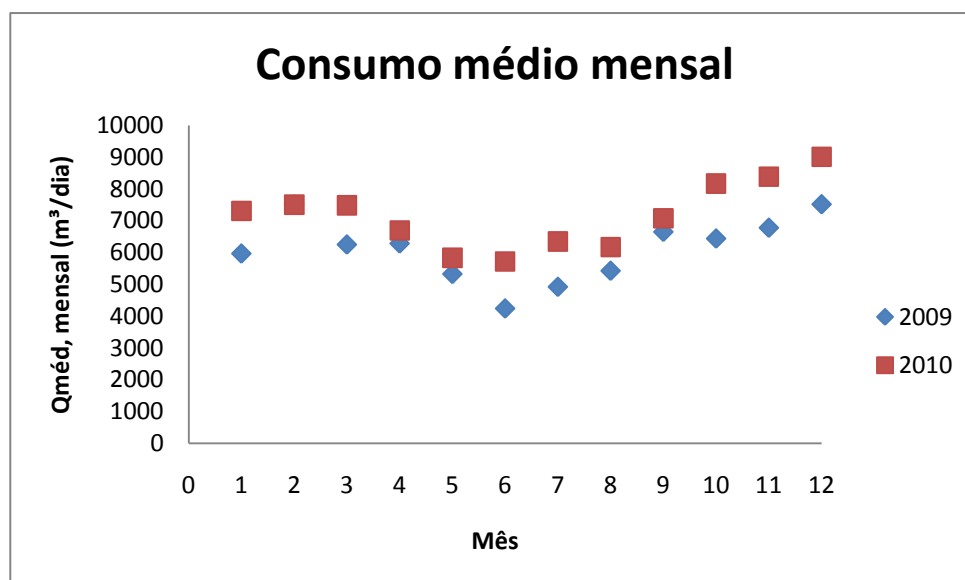


Figura 11: Gráfico do consumo médio mensal para os anos de 2009 e 2010.

Para executar o modelo matemático com as vazões estipuladas, foi necessário realizar uma mudança de unidades, de acordo com a equação acima descrita, para transformar m³/dia para m/dia. Isso foi feito para os 24 meses dos anos de 2009 e 2010, conforme tabela abaixo.

Tabela 7: Demanda média de água, nos anos de 2009 e 2010, expressa em m/d.

Demanda média mensal de água, após a conversão de unidades (m/dia)												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2009	39,78	50,03	41,67	41,89	35,51	28,28	32,81	36,17	44,32	42,92	45,18	50,10
2010	48,72	50,03	49,89	44,61	38,88	38,11	42,32	41,12	47,19	54,45	55,89	60,08

Com todos os dados de entrada definidos (transmissividade, níveis estáticos, número de poços, vazão, expressa em metros de rebaixamento por dia, e propondo a distância entre os poços igual a 50 metros) foi possível executar o modelo matemático para as 24 demandas de água, baseadas na média mensal e apresentadas na tabela 7, e avaliar o uso

dos poços da fábrica, de forma a garantir a maximização das cargas hidráulicas durante o regime de operação (menor cone de depressão para a situação proposta).

Considerando então a situação onde a transmissividade hidráulica do aquífero igual a 1200 m²/dia, a distância entre os poços (Δx) igual a 50 metros, as cargas a esquerda e a direita dos poços constantes e iguais a 96 e 68 metros, respectivamente, cuja função objetivo busca maximizar a distribuição das cargas em um aquífero durante o bombeamento, realizou-se 24 simulações com o modelo de otimização descrito pelas equações 15, 16 e 17.

$$\text{Maximizar} \rightarrow \sum_{i=1}^7 h_i \quad (15)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^7 Q_i \geq Q_{\text{mín}} \quad (16)$$

$$A_i(h_{i+1} - h_i) + B_i(h_{i-1} - h_i) - Q_i = 0 \quad (17)$$

$$h_0 = 96m$$

$$h_8 = 68m$$

$$i = 0,1,2,3,4,5,6,7,8$$

onde h são as cargas hidráulicas, i os nós, Q_i a vazão em cada nó, $Q_{\text{mín}}$ a demanda mínima a ser suprida e A e B constantes que relacionam a transmissividade e a distância entre os poços.

Com as equações definidas foi possível executar o modelo matemático no GAMS, conforme interface apresentada na figura 12.

```

SET
    I /1*7/;
SCALAR
    T transmissividade /1200/
    DX largura celula /50/
    QMIN bombeamento minimo /55.897/
    H0 carga piezometrica esquerda /96/
    H8 carga piezometrica direita /68/
    a constante ;
    a=T/(DX*DX);
VARIABLES
    OBJ funcao objetivo;
POSITIVE VARIABLE
    H(I) carga hidráulica nos poços I
    Q(I) taxa de produção nos poços I;
EQUATIONS
    FD(I) Equação da diferença finita,
    PRODRATE Soma das taxas de bombeamento,
    TOTALHEAD Soma das cargas hidráulicas;
    FD(I).. a*H(I-1)$ (ORD(I) gt 1)
            - 2*a*H(I)
            + a*H(I+1)$ (ORD(I) lt 7)
            - Q(I)
    =E= - a*H0$ (ORD(I) = 1)
        - a*H8$ (ORD(I) = 7);
    PRODRATE.. sum(I,Q(I)) =G= QMIN;
    TOTALHEAD.. sum(I,H(I)) =E= OBJ
MODEL GW1 /ALL/ ;
SOLVE GW1 USING LP MAXIMIZING OBJ ;
file GW1_Out /GW1.txt/
put GW1_Out
put '          Carga    Bombeamento', put /
    loop( I,
put I.tl,

```

Figura 12: Interface de programação do GAMS;

onde SET são dados de entrada (7 poços), SCALAR as condições de restrição, VARIABLES a descrição da função objetivo e EQUATIONS as equações que definem o problema. Os resultados das 24 simulações estão descritos no capítulo 6.

6 Apresentação e análises dos resultados

O modelo matemático de otimização foi executado em 24 simulações nas quais alterou-se a vazão mínima a ser retirada do aquífero, de acordo com o histórico de consumo da fábrica nos anos de 2009 e 2010. Com a aplicação do modelo determinou-se o regime ótimo de operação dos poços de forma a suprir a demanda volumétrica da fábrica com o menor cone de depressão para o cenário estudado.

A matriz de resposta do modelo matemático determina qual a carga hidráulica (expressa em metros) e qual a vazão a ser bombeada em cada um dos poços (expressa em metros de rebaixamento por dia) de forma a atender certa demanda causando o menor impacto possível, ou seja, maximizando a soma das cargas dos poços.

A seguir serão apresentados as simulações realizadas para o mês de junho de 2009 e dezembro de 2010, que representam os meses com menor e maior consumo de água, respectivamente, para o período estudado.

Tabela 8: Resultado da simulação realizada para o mês de junho de 2009, considerando a vazão média de 4243 m³/dia.

Junho 2009 (Q _{méd} = 4243 m ³ /dia)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m ³ /d)
0	96		
Poço 6	85,13	0	0
Poço 7	74,27	0	0
Poço 3	63,4	0	0
Poço 5/9	52,53	0	0
Poço 4/8	41,67	0	0
Poço 2	30,8	0	0
Poço 1	19,93	28,29	4243,5
8	68		
Σh =	367,73		

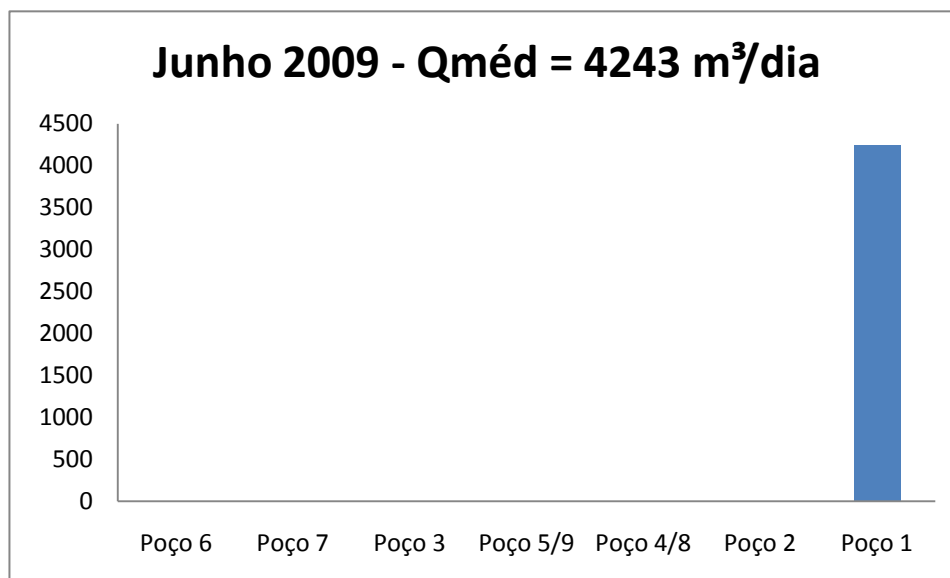


Figura 13: Resultado gráfico da exploração dos poços, suprindo a demanda média do mês de junho de 2009 e com a maximização da soma das cargas hidráulicas em cada poço.

A simulação realizada para a demanda de água do mês de junho de 2009 indica que a maximização da função objetivo (soma das cargas hidráulicas de cada poço) se dá com 367,73 metros de carga hidráulica. Para a vazão de 4243 m³/dia, que também pode ser escrita como 28,29 metros de rebaixamento por dia, garante-se a maximização da função objetivo com a exploração apenas do poço 1.

Já para a simulação realizada para uma demanda maior que a anterior, como é o caso do mês de dezembro de 2010, o cenário é diferente, conforme indicadores abaixo.

Tabela 9: Resultado da simulação realizada para o mês de dezembro de 2010, considerando a vazão média de 9012 m³/dia.

Dezembro 2010 (Qméd = 9012 m ³ /dia)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m ³ /d)
0	96		
Poço 6	38,83	24,34	3651
Poço 7	32,36	0	0
Poço 3	25,89	0	0
Poço 5/9	19,41	0	0
Poço 4/8	12,94	0	0
Poço 2	6,47	0	0
Poço 1	0	35,75	5362,5
8	68		
Σh =	135,9		

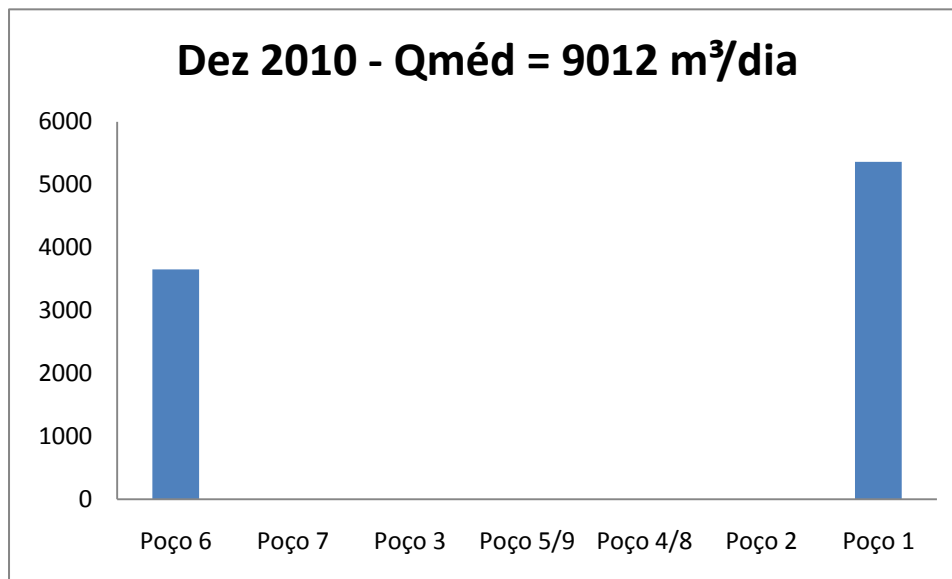


Figura 14: Resultado gráfico da exploração dos poços, suprindo a demanda média do mês de dezembro de 2010 e com a maximização da soma das cargas hidráulicas em cada poço.

Nesta simulação, realizada para a demanda de água do mês de dezembro de 2010, a maximização da função objetivo (soma das cargas hidráulicas de cada poço) se dá com 135,9 metros de carga hidráulica. Para a vazão de 9012 m³/dia, ou 60,09 metros de rebaixamento por dia, garante-se a maximização da função objetivo com a exploração de 5362,5 m³ no poço 1 e 3651 m³ no poço 6.

Todas as demais simulações apresentaram resultados similares aos dois exemplos anteriores. Para demandas menores de água, normalmente associadas ao período de inverno, a otimização acontece utilizando apenas o poço 1 e, para vazões maiores, associadas ao verão, a máxima carga hidráulica se dá com a utilização dos poços 1 e 6, simultaneamente.

Os resultados de todas as simulações realizadas encontram-se nos anexos deste trabalho.

7 Conclusões e recomendações

Durante a realização das simulações que visaram garantir o melhor regime de operação dos poços da fábrica, garantindo o abastecimento da unidade e causando o menor impacto ambiental ao aquífero, considerando as premissas e restrições do modelo, conclui-se que os menores cones de depressão acontecem ao utilizarmos apenas o poço 1 para menores demandas e, nas situações de maior demanda, deve-se explorar o poço 1 juntamente com o poço 6.

A fábrica de Águas Claras do Sul apresenta uma sazonalidade importante na operação. Durante os meses de inverno o consumo de água é consideravelmente menor que nos meses de verão. Obviamente este cenário impacta na exploração da água subterrânea da fábrica. Este estudo mostrou que para consumos menores que 6000 m³ de água por dia, buscando-se causar o menor impacto ao aquífero, deve-se utilizar apenas o poço 1 para abastecimento da fábrica. Já para consumos maiores que 6000 m³ por dia, para o mesmo objetivo, deve-se utilizar os poços 1 e 6 simultaneamente. Porém, é importante salientar que as outorgas de uso da água dos poços da Ambev, emitidas pelo Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria Municipal do Meio Ambiente (DRH – SEMA/RS) determinam que as vazões máximas a serem exploradas no poço 1 e no poço 6 são, respectivamente, 1440 m³/dia e 1900 m³/dia em 12 horas de operação. Portanto este estudo determina qual o regime de operação dos poços que gera o menor cone de depressão no aquífero, porém tal regime se mostra não aplicável quando se avaliam as restrições de operação impostas pelas outorgas de uso da água.

É sempre importante ressaltar que este modelo matemático de otimização é aplicado para uma situação unidimensional e em um regime estacionário. Os resultados das simulações são válidos, concretos e coerentes considerando as restrições e premissas do modelo proposto. Para uma melhor compreensão da realidade hidráulica do aquífero durante a operação dos poços deve-se realizar um estudo bidimensional, em regime transiente e com restrições do modelo que levem em consideração as outorgas de uso da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. 2001. **Água Subterrânea – curiosidades.** Disponível online em <http://www.abas.org.br/curioso.html>.

AGUA E SOLO. 1996. **Construção e Condições de Exploração do Poço Tubular Profundo ACGL-1.** P.9.

AGUA E SOLO. 1998. **Projeto executivo do sistema de bombeamento para exploração do manancial subterrâneo.** P.8.

AGUADO, E.; REMSON, I. 1974. **Groundwater hydraulics in aquifer management.** Journal Hydraulics Division, American Society Civil Engineers. V. 100, no HY1, Proc. Paper 10287, pp. 103 – 118.

AGUADO, E.; REMSON, I., REMSON, K.A. 1974. **Test of groundwater Optimization Technique.** Journal Hydraulics Division, American Society Civil Engineers. V. 91, no HY3, Proc. Paper 4330, pp. 133 – 147.

AGUADO, E.; REMSON, I.; PIKUL, M. F.; THOMAS, W. A. 1974 **Optimal pumping for aquifer dewatering.** Journal Hydraulics Division, American Society Civil Engineers. V. 100, no HY7, Proc. Paper 10639, pp. 869 – 877.

ANA. 2002. **A Evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil.** Brasília.

BONGANHA, C.A. 2005. **A utilização da modelagem matemática como ferramenta para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos: uma proposta para o município de Araraquara, São Paulo.** Dissertação de Mestrado. UNIARA. 124 p.

CETESB. 2004. **Hidrogeologia – Noções e Definições em Hidrogeologia**. P. 1 – 6

CETESB. 2004. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo, 2001 - 2003**.

COSTA, A.F.U. 1997. **Estudo Geofísico no Município de Viamão, RS, Área de Águas Clara**.

FREIRE, C. C. 2002. **Modelo de Gestão para a Água Subterrânea**. Tese de Doutorado. IPH/UFRGS. 140 p.

GORELICK, S. M.; REMSON, I. 1982. **Optimal location and management of waste disposal facilities affecting groundwater quality**. Water. Resour. Bull. 18: 43–51

GORELICK, S.M. 1983. **A review of distributed parameter groundwater management modeling methods**. Water Resour. Res. 19: 305–319

HEATH, R.C. 1983. **Basic Groundwater Hydrology** - Geological Survey water-supply paper; 2220 - Bibliography: p. 81

HEIDARI, M. 1982. **Application of linear systems theory and linear programming to groundwater management in Kansas**. Water Resour. Bull. 18: 1003–1012

LEÃO, M.I.; GREHS, S.A. 1996. **O impacto do bombeamento de água subterrânea na área de implantação da fábrica da cervejaria Brahma, em Águas Claras – Viamão/RS**.

LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; HOFFMEISTER, T. 1984. **Mapa Geológico das Folhas Passo do Vigário e Lagoa Capivari**. Centro de Estudos Costeiros e Oceanográficos, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LOURENCETTI, C. 2006. **Herbicidas mais empregados no cultivo de cana de açúcar no município de Araraquara (SP): desenvolvimento e validação de método de quantificação e avaliação do potencial de lixiviação em solos argiloso e arenoso (área de recarga do sistema aquífero Guarani)**. Tese de Doutorado. UNESP – Instituto de Química de Araraquara. 155 p.

MAYS, L.W.; TUNG, Y. 1983. **Hydrosystems Engineering and Management**. Softcover, P. 550.

MISIRLI, F.; YAZICIGIL, H. 1997. **Optimal ground-water pollution containment with fixed charges**. Journal Water Res. Planning Manage. Am. Soc. Civ. Eng. 123: P. 2–12

MISIRLI, F.; BASAGAOGLU, H., YAZICIGIL, H. 1995. **A comparison of two groundwater management models for optimal waste containment**. Journal Water Res. Planning Manage. Am. Soc. Civ. Eng. 233: P. 277 - 285

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

TODD, D.K. 1980. **Groundwater Hydrology** – Third Edition. John Wiley & Sons. Inc. New York. 552 p.

WENDLAND, E. 2003. **Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Águas Subterrâneas** - São Carlos, SP : SBMAC, 2003 xii, 95 p. - (Notas em Matemática Aplicada; 3)

WILLIS, R. 1983. **A unified approach to regional groundwater management, in groundwater hydraulics**. Water resources monograph series (eds) J.S Rosenshein, GD Bennett (Washington, DC: Am. Geophys. Union)

**ANEXO 1 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES FEITAS
PARA AS DEMANDAS DO ANO DE 2009**

Janeiro 2009 (Qméd = 5968 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	81,11	0,66	99
Poço 7	67,6	0	0
Poço 3	54,08	0	0
Poço 5/9	40,56	0	0
Poço 4/8	27,04	0	0
Poço 2	13,52	0	0
Poço 1	0	39,13	5869,5
8	68		
Σh =	283,91		

Março 2009 (Qméd = 6251 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	77,18	2,86	429
Poço 7	64,31	0	0
Poço 3	51,45	0	0
Poço 5/9	38,59	0	0
Poço 4/8	25,73	0	0
Poço 2	12,86	0	0
Poço 1	0	38,81	5821,5
8	68		
Σh =	270,12		

Maio 2009 (Qméd = 5327 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	83,25	0	0
Poço 7	70,5	0	0
Poço 3	57,75	0	0
Poço 5/9	45,01	0	0
Poço 4/8	32,26	0	0
Poço 2	19,51	0	0
Poço 1	6,76	35,51	5326,5
8	68		
Σh =	315,04		

Julho 2009 (Qméd = 4922 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	83,95	0	0
Poço 7	71,91	0	0
Poço 3	59,86	0	0
Poço 5/9	47,82	0	0
Poço 4/8	35,77	0	0
Poço 2	23,72	0	0
Poço 1	11,68	32,82	4923
8	68		
Σh =	334,71		

Setembro 2009 (Qméd = 6649 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	71,65	5,96	894
Poço 7	59,71	0	0
Poço 3	47,77	0	0
Poço 5/9	35,83	0	0
Poço 4/8	23,88	0	0
Poço 2	11,94	0	0
Poço 1	0	38,37	5755,5
8	68		
Σh =	250,78		

Novembro 2009 (Qméd = 6777 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	69,87	6,95	1042,5
Poço 7	58,23	0	0
Poço 3	46,58	0	0
Poço 5/9	34,94	0	0
Poço 4/8	23,29	0	0
Poço 2	11,65	0	0
Poço 1	0	38,23	5734,5
8	68		
Σh =	244,56		

Fevereiro 2009 (Qméd = 7505 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	59,76	12,61	1891,5
Poço 7	49,8	0	0
Poço 3	39,84	0	0
Poço 5/9	29,88	0	0
Poço 4/8	19,92	0	0
Poço 2	9,96	0	0
Poço 1	0	37,42	5613
8	68		
Σh =	209,16		

Abril 2009 (Qméd = 6284 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	76,72	3,12	468
Poço 7	63,93	0	0
Poço 3	51,15	0	0
Poço 5/9	38,36	0	0
Poço 4/8	25,57	0	0
Poço 2	12,79	0	0
Poço 1	0	38,78	5817
8	68		
Σh =	268,52		

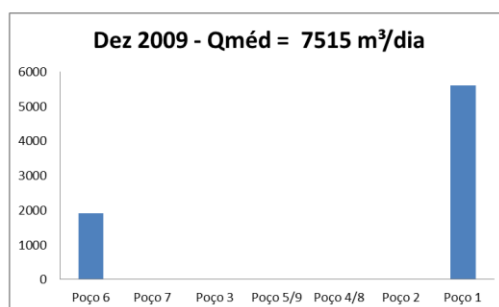
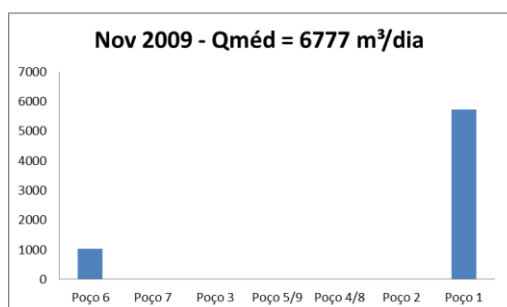
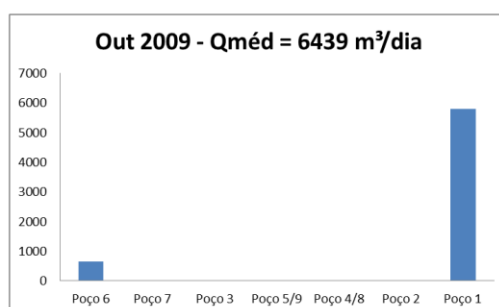
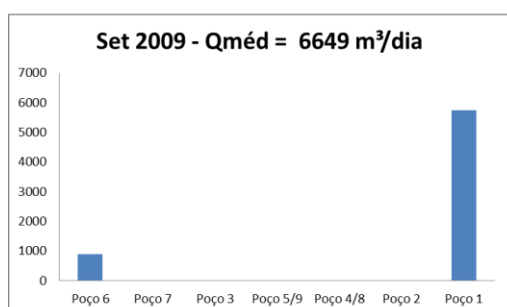
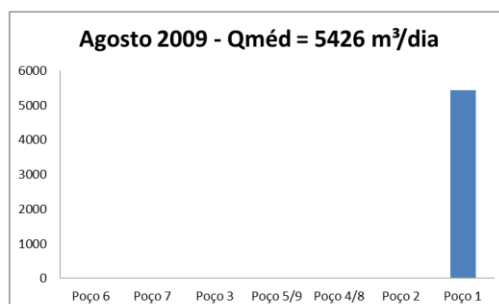
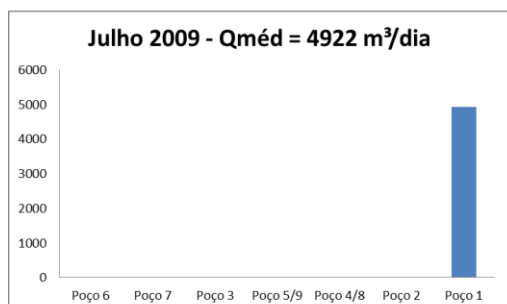
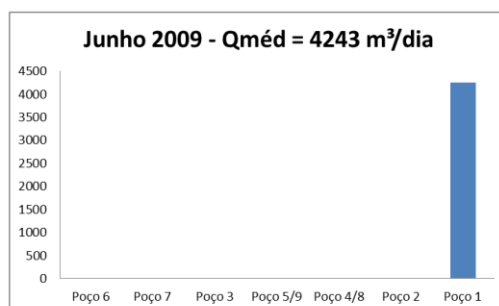
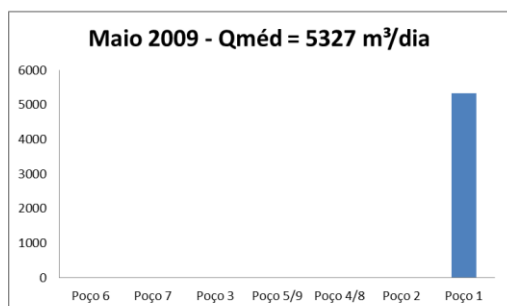
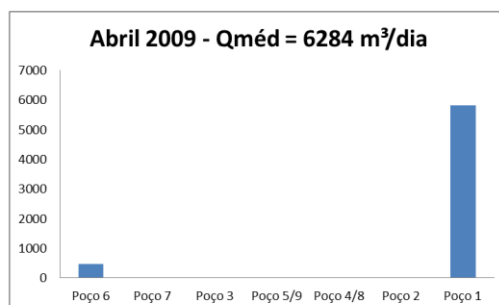
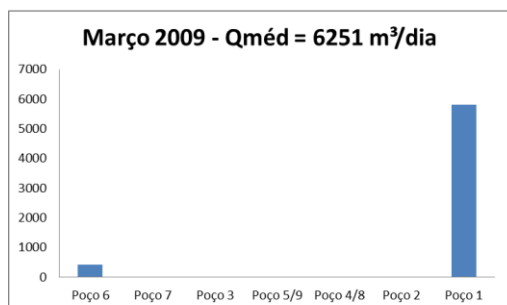
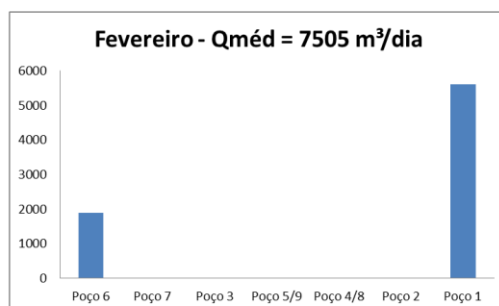
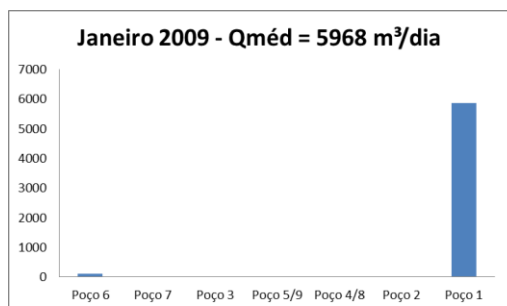
Junho 2009 (Qméd = 4243 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	85,13	0	0
Poço 7	74,27	0	0
Poço 3	63,4	0	0
Poço 5/9	52,53	0	0
Poço 4/8	41,67	0	0
Poço 2	30,8	0	0
Poço 1	19,93	28,29	4243,5
8	68		
Σh =	367,73		

Agosto 2009 (Qméd = 5426 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	83,08	0	0
Poço 7	70,16	0	0
Poço 3	57,24	0	0
Poço 5/9	44,32	0	0
Poço 4/8	31,4	0	0
Poço 2	18,48	0	0
Poço 1	5,56	36,17	5425,5
8	68		
Σh =	310,24		

Outubro 2009 (Qméd = 6439 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	74,56	4,32	648
Poço 7	62,14	0	0
Poço 3	49,71	0	0
Poço 5/9	37,28	0	0
Poço 4/8	24,85	0	0
Poço 2	12,43	0	0
Poço 1	0	38,61	5791,5
8	68		
Σh =	260,97		

Dezembro 2009 (Qméd = 7515 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	59,62	12,69	1903,5
Poço 7	49,68	0	0
Poço 3	39,75	0	0
Poço 5/9	29,81	0	0
Poço 4/8	19,87	0	0
Poço 2	9,94	0	0
Poço 1	0	37,41	5611,5
8	68		
Σh =	208,67		

ANEXO 2 – RESULTADOS GRÁFICOS DA EXPLORAÇÃO
DOS POÇOS, SUPRINDO AS DEMANDAS MÉDIAS
MENSAIS DO ANO DE 2009 COM A MAXIMIZAÇÃO DA
SOMA DAS CARGAS HIDRÁULICAS EM CADA POÇO



**ANEXO 3 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES FEITAS
PARA AS DEMANDAS DO ANO DE 2010**

Janeiro 2010 (Qméd = 7308 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	62,5	11,08	1662
Poço 7	52,08	0	0
Poço 3	41,67	0	0
Poço 5/9	31,25	0	0
Poço 4/8	20,83	0	0
Poço 2	10,42	0	0
Poço 1	0	37,64	5646
8	68		
Σh =	218,75		

Março 2010 (Qméd = 7485 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	60,04	12,46	1869
Poço 7	50,04	0	0
Poço 3	40,03	0	0
Poço 5/9	30,02	0	0
Poço 4/8	20,01	0	0
Poço 2	10,01	0	0
Poço 1	0	37,44	5616
8	68		
Σh =	210,15		

Maio 2010 (Qméd = 5832 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	82,37	0	0
Poço 7	68,75	0	0
Poço 3	55,12	0	0
Poço 5/9	41,5	0	0
Poço 4/8	27,87	0	0
Poço 2	14,24	0	0
Poço 1	0,62	38,88	5832
8	68		
Σh =	290,47		

Julho 2010 (Qméd = 6349 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	75,82	3,62	543
Poço 7	63,18	0	0
Poço 3	50,55	0	0
Poço 5/9	37,91	0	0
Poço 4/8	25,27	0	0
Poço 2	12,64	0	0
Poço 1	0	38,71	5806,5
8	68		
Σh =	265,37		

Setembro 2010 (Qméd = 7079 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	65,68	9,3	1395
Poço 7	54,73	0	0
Poço 3	43,79	0	0
Poço 5/9	32,84	0	0
Poço 4/8	21,89	0	0
Poço 2	10,95	0	0
Poço 1	0	37,89	5683,5
8	68		
Σh =	229,88		

Novembro 2010 (Qméd = 8384 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	47,55	19,45	2917,5
Poço 7	39,62	0	0
Poço 3	31,7	0	0
Poço 5/9	23,77	0	0
Poço 4/8	15,85	0	0
Poço 2	7,92	0	0
Poço 1	0	36,44	5466
8	68		
Σh =	166,41		

Fevereiro 2010 (Qméd = 7505 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	59,76	12,61	1891,5
Poço 7	49,8	0	0
Poço 3	39,84	0	0
Poço 5/9	29,88	0	0
Poço 4/8	19,92	0	0
Poço 2	9,96	0	0
Poço 1	0	37,42	5613
8	68		
Σh =	209,16		

Abril 2010 (Qméd = 6692 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	71,06	6,29	943,5
Poço 7	59,22	0	0
Poço 3	47,37	0	0
Poço 5/9	35,53	0	0
Poço 4/8	23,69	0	0
Poço 2	11,84	0	0
Poço 1	0	38,32	5748
8	68		
Σh =	248,71		

Junho 2010 (Qméd = 5717 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		0
Poço 6	82,57	0	0
Poço 7	69,15	0	0
Poço 3	55,72	0	0
Poço 5/9	42,3	0	0
Poço 4/8	28,87	0	0
Poço 2	15,45	0	0
Poço 1	2,02	38,11	5716,5
8	68		
Σh =	296,08		

Agosto 2010 (Qméd = 6169 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	78,34	2,21	331,5
Poço 7	65,29	0	0
Poço 3	52,23	0	0
Poço 5/9	39,17	0	0
Poço 4/8	26,11	0	0
Poço 2	13,06	0	0
Poço 1	0	38,91	5836,5
8	68		
Σh =	274,2		

Outubro 2010 (Qméd = 8168 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	50,55	17,77	2665,5
Poço 7	42,13	0	0
Poço 3	33,7	0	0
Poço 5/9	25,28	0	0
Poço 4/8	16,85	0	0
Poço 2	8,43	0	0
Poço 1	0	36,68	5502
8	68		
Σh =	176,94		

Dezembro 2010 (Qméd = 9012 m³)			
Nós	Carga (m)	Bombeamento (m/d)	Q (m³/d)
0	96		
Poço 6	38,83	24,34	3651
Poço 7	32,36	0	0
Poço 3	25,89	0	0
Poço 5/9	19,41	0	0
Poço 4/8	12,94	0	0
Poço 2	6,47	0	0
Poço 1	0	35,75	5362,5
8	68		
Σh =	135,9		

**ANEXO 4 – RESULTADOS GRÁFICOS DA EXPLORAÇÃO
DOS POÇOS, SUPRINDO AS DEMANDAS MÉDIAS
MENSAIS DO ANO DE 2010 COM A MAXIMIZAÇÃO DA
SOMA DAS CARGAS HIDRÁULICAS EM CADA POÇO**

