

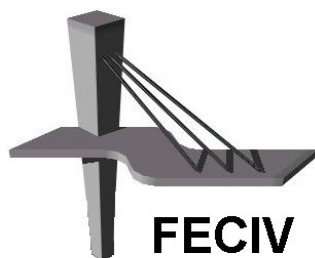
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 070

**MAPEAMENTO DO AQUÍFERO BAURU SITUADO
SOB A ZONA URBANA DE ARAGUARI, MG.**

MARÍLIA DE OLIVEIRA SEGANTINI

UBERLÂNDIA, 09 DE JULHO DE 2010



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

S454m Segantini, Marília de Oliveira, 1985-
Mapeamento do Aquífero Bauru situado sob a zona urbana de
Araguari, MG [manuscrito] / Marília de Oliveira Segantini. - 2010.
135 f. : il.

Orientador: José Eduardo Alamy Filho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Inclui bibliografia.

1. Aquíferos - Araguari (MG) - Teses. 2. Hidrogeologia - Teses.
3. Águas subterrâneas - Teses. I. Alamy Filho, José Eduardo. II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 556.33(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Marília de Oliveira Segantini

**MAPEAMENTO DO AQUÍFERO BAURU SITUADO SOB
A ZONA URBANA DE ARAGUARI, MG.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho.

Uberlândia, 09 de julho de 2010



**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ATA Nº: 070/2010

CANDIDATA: Marília de Oliveira Segantini

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

TÍTULO: "Mapeamento do Aquífero Bauru situado sob a zona urbana de Araguari, MG"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana

LINHA DE PESQUISA: Planejamento e Infraestrutura Urbana

DATA DA DEFESA: 09 de julho de 2010

LOCAL: Sala de Apoio I da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 07:50 - 10:20

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

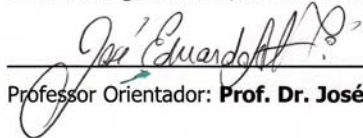
☒ APROVADA

☐ REPROVADA

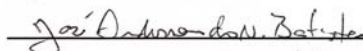
OBS:

A aluna fez uma apresentação abrangente, condizente com as temas abordados no trabalho. As arguições foram respondidas e comentadas com segurança. Em função do teor da dissertação, da relevância do assunto, da exposição oral e da resposta às arguições, a banca decidiu, por unanimidade, pela APROVAÇÃO da candidata.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:



Professor Orientador: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**



Membro externo: **Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista - UNICAMP**



Membro: **Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU**

Uberlândia, 09 de julho de 2010.

*Aos meus pais pelo carinho e apoio, pela presença
constante neste período importante de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, José Roberto e Nídia, por terem sido o meu grande esteio, pela total compreensão nos momentos de ansiedade e dúvidas, por me incentivarem nos momentos de maior dificuldade para que eu desse sempre o melhor de mim, pois sem eles, esta conquista não seria possível.

Aos meus irmãos, Marco Túlio e Mariana, muito obrigada pelo apoio e amizade, que foram de fundamental importância para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial minha irmã e amiga Mariana, pela força e paciência durante todo este período, que durante as madrugadas me ajudaram com sua companhia e com palavras de incentivo.

A todos minha eterna gratidão.

Ao meu orientador, Dr. José Eduardo Alamy Filho, que apesar de jovem, se mostra em grande excelência profissional e seriedade, pela consideração em ter aceitado a orientação desta pesquisa. Agradeço por toda confiança, paciência e disposição, pela contribuição com idéias e incentivos, pelo trabalho em equipe, pelo carinho e também pela sua amizade.

Agradeço aos professores Dr. Marcio Ricardo Salla e Dr. Luiz Nishiyama pelas excelentes sugestões, por ocasião do exame de qualificação, as quais só fizeram enriquecer esta pesquisa.

A todos os professores, funcionários e amigos do Mestrado em Engenharia Civil da UFU. Dentre estes, destaco os professores Carlos Alberto Faria, (coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da UFU), Everson José Beicher (Professor de Geotecnia da Faculdade de Engenharia Civil,UFU), Sueli Maria (secretária e madrinha da Pós-graduação em Engenharia Civil) e Josildo de Azevedo (técnico do laboratório de geotecnia da Faculdade de Engenharia Civil) por todo o apoio e amizade durante a realização desta etapa.

Agradeço à SAE (Superintendência de Água e Esgoto de Araguari) a qual conferiu prestígio e valor a meu trabalho de Mestrado. De forma especial, agradeço ao Sr. Antônio

dos Santos Rodovalho Carvalho, por sua enorme gentileza e esforço ao me auxiliar na etapa de coleta de dados, por todo empenho e aprendizado dedicados a mim.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa concedida durante os anos de curso.

Por fim, mas, não menos importante, agradeço a Deus por toda inspiração e por se fazer presente em todos os momentos de minha vida e por possibilitar mais esta conquista.

Segantini, M. O. 121 p. Mapeamento do Aquífero Bauru situado sob a zona urbana de Araguari, MG. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

RESUMO

O presente trabalho aborda os principais aspectos relacionados com o estudo do Aquífero Bauru, sua exploração e uso, bem como suas potencialidades na região do Triângulo Mineiro, em especial, na cidade de Araguari (MG), que constitui o principal foco desta pesquisa. Realizou-se um mapeamento dos parâmetros hidrogeológicos da Formação Bauru, na zona urbana de Araguari, agrupando todos os dados levantados pela literatura, os quais encontravam-se dispersos em diversos trabalhos recentes. Também foram utilizadas simulações numéricas para determinar os rebaixamentos, as linhas de fluxo e as velocidades de escoamento da água no aquífero. O conhecimento dos parâmetros e do escoamento no manancial justifica-se, uma vez que o aquífero é a principal fonte de abastecimento da cidade. Para tal, foi realizado um estudo numérico e simulações do fluxo no Aquífero Bauru, a partir do Método das Diferenças Finitas para aquíferos livres, permitindo assim, um estudo mais detalhado e preciso. Para o mapeamento dos parâmetros hidrogeológicos, foram levantados 65 poços, localizados, em sua maioria na zona urbana, onde buscou-se caracterizá-los com os valores de condutividade hidráulica, rendimento específico, transmissividade e espessura saturada. A pesquisa incluiu coletas de dados em diversos trabalhos científicos, tentando totalizar uma maior quantidade de dados a cerca de cada poço; além de trabalhos computacionais, como a interpolação de dados espaciais e a confecção de mapas dos parâmetros levantados. A importância do estudo, em termos regionais, é justificada pelo fato do Aquífero Bauru ser responsável por 100% do abastecimento público da cidade de Araguari, sendo válido como forma de auxiliar as futuras diretrizes para a gestão do sistema aquífero da região, para seu melhor aproveitamento, indicando possíveis lugares de saturação de exploração e também melhores locais de monitoramento, uma vez conhecidas as velocidades aparentes da água subterrânea do aquífero.

Palavras-chave: Mapeamento hidrogeológico, Águas Subterrâneas, Aquífero Bauru, Simulação numérica.

Segantini, M. O. Mapping of Bauru Aquifer located in the urban area of Araguari/ MG. 121 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlandia, 2010.

ABSTRACT

This paperwork approaches the main aspects related to the study of the Bauru Aquifer, its exploitation and use, as well as its potentialities in the region of Triangulo Mineiro, in special the city of Araguari, where the main focus of this research took place. The aim is to map the hydrological parameters of the Bauru formation, in the urban limits of Araguari, grouping all data raised by the literature, which were found to be spread over several recent studies. It was also used numerical simulations to determine the downgrades, the flow lines and the water flow speed in the aquifer. The knowledge of the parameters and of the flow in the water source is justified since the aquifer is the primary source of the city. Therefore, a numerical study and flow simulations in the Bauru Aquifer was carried out based on the Finite Difference Model for Unconfined Aquifers, thus allowing the study to be more detailed and precise. In order to mapping the hydrogeological parameters, it were gathered information about 65 wells, located mostly in urban areas, where it was attempted to characterize them with values of hydraulic conductivity, storage coefficient, transmissivity and saturated thickness. The survey included data collection in several scientific papers to consolidate a larger amount of data collection over each well; besides computational tasks, such as interpolation of spatial data and map building of the gathered parameters. The importance of the study, in regional terms is justified because The aquifer Bauru is responsible for 100% of public supply of the city of Araguari, being valid in order to assist future guidelines in managing the aquifer system of the region and take better advantage of its resources, pointing possible saturation places due to exploitation, and better monitoring locations, once the apparent speed of the aquifer groundwater is known.

Keywords: Hydrogeological mapping, Groundwater, Bauru Aquifer, Numerical Simulation.

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

K – Tensor de Condutividade Hidráulica do aquífero

m – Espessura Saturada do aquífero

MDF – Método de Diferenças Finitas

SAD 69 – *South American Datum 1969*

S – Coeficiente de Armazenamento do aquífero

Sy – Coeficiente de Rendimento Específico do aquífero

T – Transmissividade do aquífero

UTM - Projeção Universal Transversal de Mercator

SIGLAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

SAE - Superintendência de Água e Esgoto de Araguari (MG)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGM – Instituto Geológico Mineiro

MMA – Ministério do Meio Ambiente

ANA – Agência Nacional das Águas

FJP – Fundação João Pinheiro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	01
INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações Iniciais.....	01
1.2 Objetivos.....	03
1.3 Justificativas.....	03
1.4 Estrutura do Trabalho.....	05
CAPÍTULO 2.....	07
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
2.1 Águas Subterrâneas.....	07
2.2 Os Aquíferos	09
2.2.1 Tipos de aquíferos quanto à pressão de água.....	10
2.2.2 Tipos de aquíferos quanto à porosidade	12
2.3 Parâmetros Hidrogeológicos.....	14
2.3.1 Condutividade Hidráulica (k)	14
2.3.2 Transmissividade (T)	16
2.3.3 Coeficiente de Armazenamento (S) e Rendimento Específico (Sy)	17
2.4 Trabalhos relacionados com a coleta de dados primários do aquífero Bauru na região analisada.....	18
2.5 Simulação de Escoamento em Aquíferos.....	19
CAPÍTULO 3.....	27
RECORTE ESPACIAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
3.1 População.....	28
3.2 Clima.....	28
3.3 Geologia e Relevo.....	28
3.4 Tectonismo e Litoestratigrafia	29
3.5 Uso municipal da água subterrânea.....	31
3.6 Hidrogeologia da área de estudo.....	33
CAPÍTULO 4.....	37
METODOLOGIA.....	37
4.1 Levantamento e Seleção dos Poços de Monitoramento.....	37
4.2 Coordenadas Geo-referenciadas dos poços de monitoramento.....	40
4.3 Levantamento das Cotas do Terreno, do Topo da Formação Serra Geral e dos Níveis Estático/Dinâmico dos Poços	43

4.4	Dados Operacionais.....	49
4.5	Levantamento dos Parâmetros Hidrogeológicos do Aquífero.....	56
4.5.1	Condutividade Hidráulica (K)	57
4.5.2	Transmissividade (T)	58
4.5.3	Rendimento Específico (S_y)	60
4.6	Construções de Mapas dos parâmetros Hidrogeológicos e das características Geométricas do Aquífero	60
4.7	Cálculos de Seções	62
4.8	Simulação do escoamento no Aquífero	66
	CAPÍTULO 5.....	72
	RESULTADOS.....	72
5.1	Características Geométricas.....	72
5.2	Características Hidrogeológicas.....	88
5.3	Simulação do Escoamento no Aquífero.....	101
	CAPÍTULO 6	108
	CONCLUSÕES.....	108
	CAPÍTULO 7	110
	REFERENCIAL TEÓRICO	110
	Anexo A - Perfil dos poços	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 01-	Trabalhos realizados por diversos autores no município de Araguari (MG)	05
Tabela 02-	Porosidades para materiais comuns consolidados e não consolidados	18
Tabela 03-	Consumo de água subterrânea por tipo de uso na Bacia do Rio Araguari.....	31
Tabela 04-	Parâmetros hidrogeológicos do Aquífero Bauru na região de Araguari por Oliveira e Campos	35
Tabela 05-	Parâmetros hidrogeológicos do Aquífero Bauru na região de Araguari por Velasquez e Romano	36
Tabela 06-	Poços levantados para análise com situação de operação.....	38
Tabela 07-	Coordenadas UTM dos poços analisados.....	42
Tabela 08-	Levantamento de cotas da superfície do terreno na posição dos poços.....	44
Tabela 09-	Cota do topo do basalto na posição dos poços.....	45
Tabela 10-	Cota do nível dinâmico na posição dos poços.....	46
Tabela 11-	Cota do nível estático medido na posição dos poços.....	46
Tabela12-	Poços utilizados pela SAE, com suas respectivas vazão de operação, situação operacional e vazões de outorga.....	50
Tabela 13-	Condutividade hidráulica obtida em pontos específicos do Aquífero Bauru.....	58
Tabela 14-	Dados de transmissividade dos poços analisados.....	59
Tabela 15-	Rendimento específico do Aquífero Bauru, coletados na malha urbana de Araguari.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 01-	Hidrografia do Município de Araguari	04
Figura 02 -	Zona não saturada, zona saturada e nível de água	08
Figura 03 -	Tipos aquíferos.....	10
Figura 04-	Tipos de aquíferos quanto à pressão	11
Figura 05-	Representação esquemática do nível de pressão nos aquíferos e tipos de poços penetrantes.....	12
Figura 06 -	Tipos de aquíferos quanto à porosidade.....	14
Figura 07-	Decaimento da superfície piezométrica e velocidade média de escoamento...	15
Figura 08-	Sólidos gerados no ambiente GMS.	21
Figura 09-	Malha de discretização do modelo	21
Figura 10-	Malha de diferenças finitas para discretização do aquífero de <i>Delaware</i>	23
Figura 11-	Mapa de curva de transmissividade do aquífero de <i>Delaware</i>	24
Figura 12-	Esquema tridimensional da discretização da área do aquífero.....	25
Figura 13-	Distribuição das linhas de fluxo do aquífero.....	26
Figura 14-	Mapa de situação do município de Araguari em Minas Gerais, com destaque para a localização da zona urbana estudada.....	27
Figura 15-	Perfil esquemático do Aquífero Bauru, na região de Araguari, MG.....	35
Figura 16-	Mapa de distribuição espacial dos poços na malha urbana.....	41
Figura 17-	Pontos nos quais foram obtidas as cotas de topo da formação Serra Geral (a), cotas do nível estático (b) e dinâmico (c).....	48
Figura 18-	Pontos utilizados para a construção da superfície do lençol	49
Figura 19-	Pontos nos quais foram estimados os valores primários de condutividade hidráulica (a), transmissividade (b) e rendimento específico (c).....	57
Figura 20-	Procedimento esquemático de geração dos mapas de contorno e de armazenamento de valores na malha de interpolação pelo método de <i>Kriging</i>	62
Figura 21-	Esquema de seções transversais, longitudinais e curvilíneas genéricas, passíveis de serem realizadas pelo programa.....	63
Figura 22-	Esquema dos pontos nodais intermediados pela seção.....	64
Figura 23-	Esquema auxiliar para cálculo de seções genéricas.....	65
Figura 24-	Planilha para cálculo de seções transversais e longitudinais.....	65
Figura 25-	Planilha para cálculo de seções genéricas, formadas pelo agrupamento de segmentos de reta.....	66
Figura 26-	Coluna vertical saturada e variáveis utilizadas pela equação diferencial que governa o escoamento no aquífero-livre.....	67
Figura 27-	Esquema da malha numérica e do raio de influência da solução analítica.....	68
Figura 28-	Esquema da malha numérica e do raio de influência da solução analítica.....	71
Figura 29-	Mapa de Superfície do Terreno da Cidade de Araguari.....	73
Figura 30-	Superfície da cidade de Araguari – faixas de altitude.....	73
Figura 31-	Mapa de Curva de Nível da Cidade de Araguari – MG.....	76
Figura 32-	Mapa da Base do Aquífero Bauru.....	77

Figura 33-	Mapa de Superfície do piezométrica do Aquífero	78
Figura 34-	Mapa de Profundidade do Lençol	79
Figura 35-	Mapa de Espessura Saturada da formação Bauru	80
Figura 36-	Seções A-A' e B-B'	82
Figura 37-	Seção Transversal C-C'	83
Figura 38-	Seção D-D' e E-E'	84
Figura 39-	Seções F-F' e G-G'	85
Figura 40-	Seção 1-2	86
Figura 41-	Seção 3-4	87
Figura 42-	Seção 5-6	88
Figura 43-	Mapa de condutividade hidráulica do Aquífero.	89
Figura 44-	Módulo da velocidade de escoamento calculada pela Lei de Darcy. A superfície superior corresponde a uma superposição do relevo da cidade com contornos de velocidade.	91
Figura 45-	Mapa de transmissividade hidráulica do Aquífero.	92
Figura 46-	Mapa de rendimento específico da formação Bauru.	93
Figura 47-	Regiões onde todos os adimensionais (T' , S_y' e b') assumem valores acima de: (a) 0,50; (b) 0,40; (c) 0,30; (d) 0,20	95
Figura 48-	Regiões onde os dois adimensionais (T' , S_y') assumem valores acima de: (a) 0,70; (b) 0,50; (c) 0,40; (d) 0,20	96
Figura 49-	Faixas de variação do índice (I)	97
Figura 50-	Distribuição das vazões explotada	98
Figura 51-	Distribuição das vazões de outorga	99
Figura 52-	Esquema de variação temporal dos rebaixamentos na vizinhança de um poço ativado	100
Figura 53-	Distribuição dos poços que já estavam em operação e dos poços reativados. Localização das principais baterias de poços da cidade.	101
Figura 54-	Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança da Bateria São Sebastião	102
Figura 55-	Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança da Bateria Independência	103
Figura 56-	Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança das Baterias São Benedito e do Estadual	104
Figura 57-	Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança das Baterias Chamcia e de Fátima	105

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Existe, atualmente, um crescimento na demanda de água pelas comunidades, indústrias e agricultura, resultante do aumento da população e da busca da melhoria da qualidade de vida.

A água subterrânea é paulatinamente reconhecida como uma das alternativas viáveis aos usuários e tem apresentado uso crescente nos últimos anos, por ser mais abundante que as águas superficiais dos rios e lagos, constituindo-se importante reserva de água doce. As águas subterrâneas apresentam, em geral, elevado padrão de qualidade físico-química e biológica propiciam obras compactas e mais simples, principalmente quando comparadas à captação e ao tratamento das águas superficiais. Nesse contexto, o aproveitamento das águas subterrâneas possibilita a localização de obras de captação nas proximidades das áreas de consumo, eliminando a necessidade de se projetar grandes adutoras.

As águas subterrâneas são atualmente utilizadas por todos os países do mundo, sejam eles desenvolvidos ou não, para suprirem suas necessidades (LEAL, 1999 in BORGHETTI, BORGHETTI e ROSA FILHO, 2004). Países como a Alemanha, Áustria, Dinamarca, França, Holanda, Hungria, Itália, Marrocos, Rússia e Suíça atendem de 70 a 90% da demanda para o abastecimento público (REBOUÇAS, 2002). Segundo Rebouças (2002), a UNESCO estimava, em 1992, que mais de 50% da população mundial poderia ser abastecida por mananciais subterrâneos. Até mesmo regiões desérticas têm a demanda de água em cidades e na irrigação atendida por poços tubulares. Como exemplo disto, cita-se o Sistema Aquífero Núbia, o maior do mundo, que abastece cidades importantes do norte da África.

Estima-se em 300 milhões o número de poços perfurados no mundo nas três últimas décadas, 100 milhões dos quais estão nos Estados Unidos, onde são perfurados cerca de 400 mil poços por ano, com uma extração de mais de 120 bilhões de m³/ano, atendendo

mais de 70% do abastecimento público e das indústrias. (UNESCO, 1992 citado por REBOUÇAS, 2002)

Luckner e Shestakow (1991) afirmam que, para muitos países, a água subterrânea é a principal fonte de água potável, citando a Dinamarca e Áustria, onde 98% da água potável consumida é subterrânea; a Itália com 93%; a Alemanha e Bélgica, utilizando em torno de 70% cada; e a Holanda e antiga Tchecoslováquia utilizando 63%.

Outras considerações acerca das águas subterrâneas, levantadas por Luckner e Shestakow (1991), dizem respeito à proteção da água do solo e subterrânea contra a exaustão, o que requer a utilização apenas da quantidade que pode ser reposta por recarga natural. A segunda consideração importante é a proteção da água do solo e subterrânea contra a degradação e possível poluição. A capacidade natural dos aquíferos em purificar a água de subsuperfície não deve ser destruída pela poluição industrial, agrícola ou doméstica. Isto é especialmente importante, pois os processos subterrâneos são extremamente lentos e a poluição poderá somente ser notada após anos ou décadas, quando os poluentes já se dispersaram por grandes áreas. A recuperação de solos e aquíferos, quando possível, freqüentemente exige muitos anos ou até gerações, sendo que ainda não existem técnicas de remediação comprovadamente consagradas para extensas regiões.

As águas subterrâneas estão em armazenamento transitório nos poros e fraturas de formações rochosas profundas, sendo extraídas por poços tubulares, bem locados e construídos. Outro fator que explica o aumento do interesse pelo uso da água subterrânea relaciona-se ao desenvolvimento tecnológico, o que promoveu uma melhoria na produtividade dos poços e uma ampliação de sua vida útil (SOUSA, 2009).

A potencialidade de um aquífero, no que tange à sua reserva explotável e sua vazão de segurança, está relacionada com seus parâmetros hidrogeológicos, onde os mais importantes são representados pela porosidade total, porosidade efetiva, espessura saturada, condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento e capacidade específica. Essas grandezas não só descrevem as feições físicas dos aquíferos, como também são importantes para a sua adequada gestão, uma vez que são utilizadas para as estimativas dos campos hidrodinâmicos, referentes ao escoamento das águas dentro do manancial subterrâneo. Para aquíferos sotopostos a zonas urbanas, principalmente, o mapeamento das características do manancial constitui uma ferramenta importante para o

estabelecimento de projetos de utilização da água, como o conhecimento prévio da posição da superfície piezométrica e a previsão de futuros cenários de bombeamento. Outro aspecto que demonstra a importância do mapeamento do aquífero, principalmente em zonas urbanas, refere-se à possibilidade de se conhecer as trajetórias preferenciais assumidas por plumas de poluição. Nesse sentido, o conhecimento prévio da distribuição espacial das características do aquífero atua também como uma ferramenta para sua proteção.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem, como objetivo principal, mapear os parâmetros hidrogeológicos de transmissividade, condutividade hidráulica, espessura saturada e porosidade efetiva (rendimento específico) do Aquífero Bauru, na zona urbana de Araguari/MG, como forma de auxiliar as futuras diretrizes para a gestão do sistema aquífero da região, através de Estudo numérico e simulações de fluxo a partir do Método das Diferenças Finitas para Aquíferos Livres.

Este estudo fundamenta-se na importância de conhecer, de maneira mais detalhada, os parâmetros hidrogeológicos desse Aquífero e os padrões de escoamento das águas, com as respostas do aquífero à perturbação induzida pela reativação de poços. A importância do estudo, em termos regionais, é justificada pelo fato do Aquífero Bauru ser responsável por 100% do abastecimento público da cidade de Araguari (Superintendência de Água e Esgotos - SAE, 2009), cujo município possui 106 mil habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008).

1.3 JUSTIFICATIVAS

A cidade de Araguari, situada no Triângulo Mineiro, constitui provavelmente a maior aglomeração urbana totalmente abastecida por águas subterrâneas do Estado de Minas Gerais. Apesar da inserção geográfica do município em duas grandes unidades hidrográficas, a bacia do rio Araguari e do Paranaíba (Figura 1), o aproveitamento desses recursos para captação e adução torna-se oneroso devido à grande diferença altimétrica entre os principais rios e as áreas de abastecimento (VELASQUEZ e ROMANO, 2004).

hidrogeológicos e não somente a vazão a ser explorada. É comum, nesta cidade, ouvir falar de regiões “boas de água”, com poços de boa produção, e de regiões de baixa produção. Todos esses fatores são condicionados pela distribuição desses parâmetros no espaço. Com poços de captação disseminados na zona urbana da cidade, a superfície piezométrica sofre perturbações decorrentes dos rebaixamentos induzidos pelo bombeamento. Nesse sentido, a simulação computacional, aspecto também abordado no presente trabalho, constitui ferramenta relevante na estimativa dessas alterações, permitindo prever os padrões do escoamento subterrâneo, como campos de velocidade e vetores de fluxo. Também, a importância da simulação do escoamento está vinculada à possibilidade de acompanhar a resposta do sistema aquífero a diversas e eventuais solicitações futuras.

Tabela 1 – Trabalhos realizados por diversos autores no município de Araguari (MG)

Trabalho	Autores	Objetivos
“Relatório Final: Caracterização Hidrogeológica do Município de Araguari”	Velásquez e Romano (2004).	Definição da geologia e geometria do aquífero.
“Avaliação dos Recursos Hídricos do Sistema Aquífero Guarani no município de Araguari”	Fundo das universidades (2006)	Modelo conceitual do Sistema Aquífero Bauru.
“Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no Município de Araguari – MG”	Fiumari (2004)	Dados hidrogeológicos gerais do sistema Bauru e informações geológicas sobre o mesmo.
“Parâmetros hidrogeológicos do Sistema Aquífero Bauru na região de Araguari/MG: fundamentos para a gestão do Sistema de Abastecimento de Água.”	Oliveira e Campo (2004)	Dados coletados in loco de poços analisados.
“Vulnerabilidade à poluição das Águas Subterrâneas: um estudo do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari”,	Sousa (2009)	Dados relevantes e recentes dos poços, amostrados in loco, distribuídos espacialmente ao longo da malha urbana de Araguari.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de 7 capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – Introdução : apresenta uma noção geral do tema a ser tratado no trabalho. Destaca a importância dos recursos hídricos subterrâneos no contexto atual e também a importância de se conhecer os parâmetros hidrogeológicos dos mesmos. Nesse sentido, os comentários são paulatinamente derivados para o contexto do local de estudo, a zona urbana de Araguari. São apresentadas, também, a justificativa sobre a importância do tema e os objetivos deste trabalho;
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: apresenta uma revisão sobre águas subterrâneas e aquíferos, relacionando estes aspectos com o tema principal da pesquisa que é o mapeamento dos parâmetros hidrogeológicos do Aquífero Bauru. Nesse mesmo capítulo, são apresentadas suas propriedades e suas formas de estimativa;
- Capítulo 3 – Recorte espacial da pesquisa, no qual é feita uma caracterização da área de estudo, a cidade de Araguari, e também uma caracterização geral do Aquífero Bauru, destacando os aspectos mais relevantes, vinculados ao interesse da pesquisa;
- Capítulo 4 – Metodologia: realizou-se uma breve descrição sobre os métodos, as técnicas e os processos adotados na pesquisa, principalmente no levantamento e processamento de dados quanto na elaboração dos mapas de curvas dos parâmetros hidrogeológicos, na implementação de um algoritmo que calcula seções diversas e nos fundamentos do programa de simulação computacional;
- Capítulo 5 – Resultados: são apresentados de forma objetiva. Estes dados são apresentados na forma de mapas, seções e gráficos. É realizada, também, uma análise e discussão teórica dos resultados encontrados, relacionando-os com aqueles descritos no referencial teórico;

-
- Capítulo 6 – Conclusão: são apresentadas as conclusões a cerca da análise dos resultados realizada na pesquisa;
 - Capítulo 7 – Referencial Teórico: são apresentados os autores citados, cujos trabalhos deram suporte à pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas podem ser definidas como toda água existente abaixo da superfície da Terra, preenchendo tanto os poros vazios das rochas sedimentares quanto as fraturas, falhas ou fissuras das rochas cristalinas.

Segundo Rebouças (2002), a água subterrânea da zona de saturação do subsolo circula lentamente. Uma parcela desses fluxos deságua nas superfícies dos terrenos em forma de fontes e olhos de água e, também, abastece poços e outras obras de captação. Outra parcela deságua nos rios, tornando-os perenes durante os períodos em que as precipitações atmosféricas são escassas, ou descarrega nos lagos e oceanos. Nota-se que, a rigor, as águas subterrâneas não ficam armazenadas, mas escoam lentamente, em um processo que pode ser chamado de armazenamento transitório.

A zona saturada, onde todos os poros são preenchidos por água, constitui o manancial subterrâneo propriamente dito. Na zona não saturada, também chamada de vadosa, os poros contêm ar, além de água. O nível freático, ou nível de água, limita inferiormente a zona vadosa e corresponde ao topo da zona saturada. A figura 2 mostra a caracterização ilustrativa das zonas não saturada e saturada, bem como o posicionamento do nível de água.

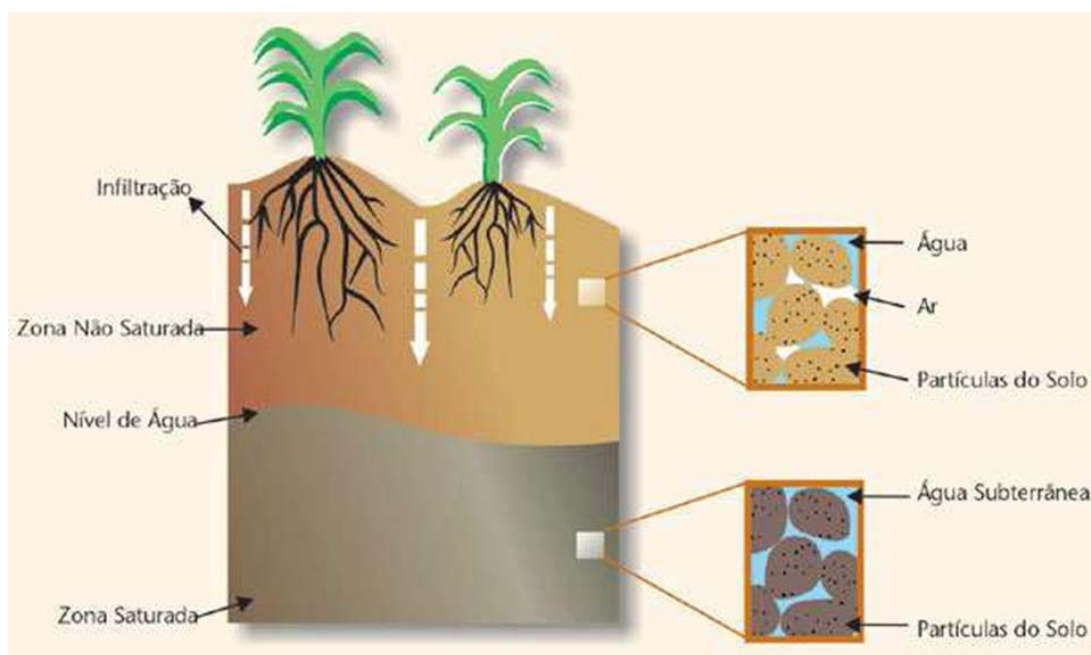


Figura 2: Zona não saturada, zona saturada e nível de água

Fonte: Instituto Geológico Mineiro (2001)

A despeito da existência de uma zona saturada, nem toda água subterrânea está presente nos aquíferos, pois, para ser denominada como tal, a formação rochosa (consolidada ou não) deve armazenar água e permitir a transmissão dessa água entre dois pontos. Um aquífero deve ter, portanto, vazios interconectados, além de estar saturado de água.

Outros corpos rochosos também desempenham importantes funções na dinâmica das águas subterrâneas, como os aquícludes e os aquítarde. Batalha (1986) define aquítarde como formação que é capaz de absorver água, mas que não a transmite em velocidade suficiente para proporcionar o escoamento apreciável em direção a um poço ou uma fonte. O mesmo autor considera aquíclude como uma formação geológica de natureza relativamente impermeável e semiconfinante, em que a velocidade de transmissão de água é muito reduzida ou inexistente. Assim, um aquíclude corresponde à camada ou unidade geológica relativamente menos permeável numa determinada seqüência estratigráfica (Feitosa e Manuel Filho, 2000). Existem ainda unidades geológicas impermeáveis, que não armazenam nem transmitem água, são os denominados aquífugos.

2.2 Os AQUÍFEROS

De acordo com Capucci *et. al.* (2001), aquíferos ou reservatórios naturais de água subterrânea são formações rochosas ou camadas geológicas que armazenam e transmitem água em quantidades economicamente viáveis de extração. E segundo Linsley e Franzini (1972), aquíferos são formações geológicas, formadas por rochas permeáveis seja pela porosidade granular ou pela porosidade fissural, capazes de armazenar e transmitir quantidades significativas de água.

Quando a unidade aquífera é formada por mais de uma formação geológica, com características hidrogeológicas semelhantes, ocorre a classificação de um sistema aquífero.

Os aquíferos podem ser livres ou confinados. Nessa classificação, as formações geológicas portadoras de água e subjacentes a camadas impermeáveis são denominadas aquíferos confinados. Assim, a entrada de água (recarga) ocorre por infiltração direta da água das chuvas, quando a formação aflora à superfície, em regiões muitas vezes distantes daquela analisada. Outras formas de recarga podem ocorrer em regiões onde a formação confinante superior apresenta uma rede de fissuras conectadas. Nos aquíferos confinados, a pressão exercida pela água no topo da formação é maior do que a atmosférica. Em outras palavras, as camadas confinantes superior e inferior são pressionadas pela água armazenada na formação intermediária, causando artesianismo nos poços que captam suas águas. Já os aquíferos livres são demarcados por uma camada permeável, acima do nível freático, e por uma camada impermeável na sua base. Deste modo, a pressão que a água exerce no topo da zona saturada é igual à pressão atmosférica. Assim a recarga é feita no próprio local, em toda a extensão da formação – recarga direta. No aquífero livre, o nível piezométrico corresponde ao chamado nível freático, pois, no topo do sistema, a água está à mesma pressão atmosférica.

A Figura 3 ilustra os diferentes tipos de aquíferos existentes.

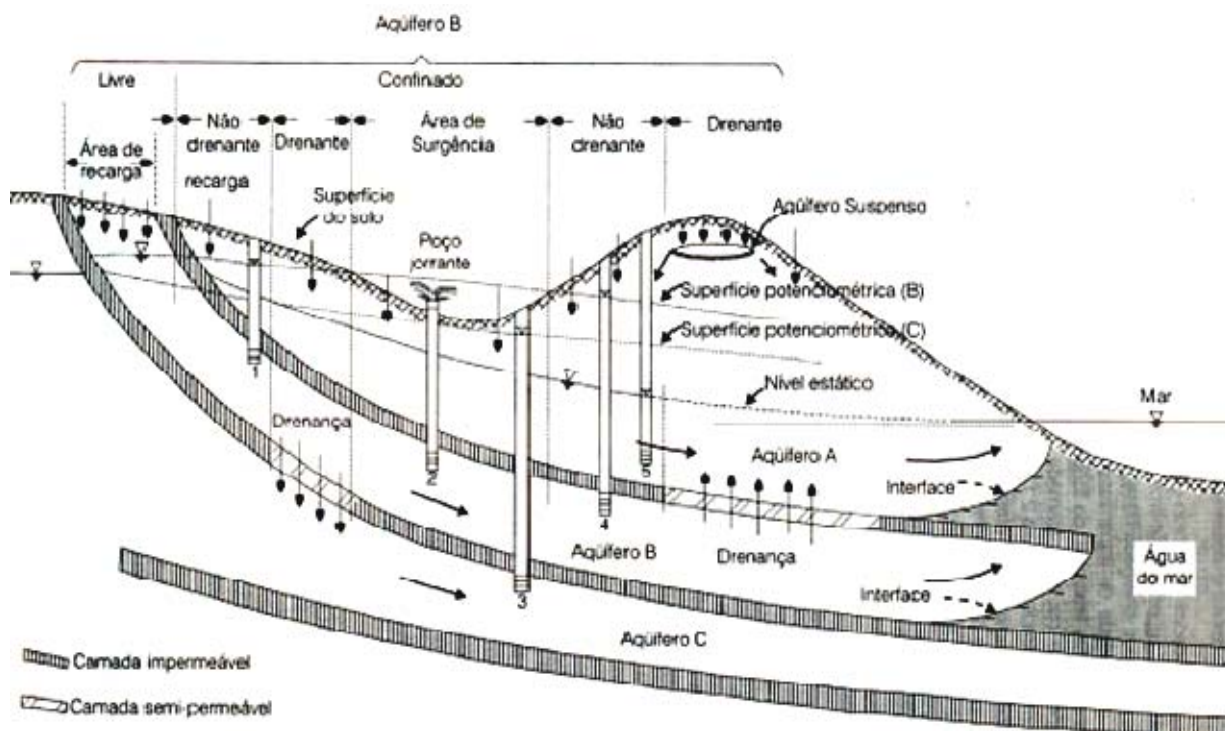


Figura 3: Tipos de aquíferos

Fonte: Modificado de Instituto Geológico Mineiro (2001)

2.2.1 TIPOS DE AQUÍFEROS QUANTO À PRESSÃO DA ÁGUA

Conforme o Instituto Geológico Mineiro – IGM (2001), dentre os diversos tipos de aquíferos quanto à classificação por pressão da água, há o aquífero livre, cuja formação geológica é permeável, parcialmente saturada de água e limitada na base por uma camada impermeável, conforme é ilustrado na figura 4. Nesse caso, o aquífero corresponde à região totalmente saturada de água, conforme já foi dito. O nível da água, ou nível freático, nesse tipo de aquífero, está submetido à pressão atmosférica. O Aquífero Bauru, no recorte espacial estudado pelo presente trabalho, é classificado como livre ou não confinado.

Outro tipo é o aquífero confinado ou artesiano, com formação geológica permeável completamente saturada de água que é limitado, no topo e na base, por camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água nesse tipo de aquífero é superior à pressão atmosférica. O seu reabastecimento ou recarga, através das chuvas, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Os aquíferos confinados têm a camada de recarga indireta e quase sempre estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas – bacias sedimentares (IGM, 2001).



Figura 4 – Tipos de aquíferos quanto à pressão.

Fonte: Adaptado de IGM (2001).

Já o aquífero semiconfinado é aquele que se encontra limitado na base, no topo, ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do aquífero em si. O fluxo preferencial da água ocorre ao longo da camada aquífera. Secundariamente, esse fluxo desenvolve-se através das camadas semi-confinantes, à medida que haja uma diferença de pressão hidrostática entre a camada aquífera e as camadas subjacentes ou sobrejacentes. Em certas circunstâncias, um aquífero livre poderá ser abastecido por água oriunda de camadas semiconfinadas subjacentes, ou vice-versa. As zonas de fraturas ou falhas geológicas constituem-se também em pontos de fuga ou recarga da água da camada confinada (BOSCARDIN BORGHETTI, et al, 2004).

A Figura 5 ilustra os tipos de aquíferos, descritos em relação às camadas impermeáveis do subsolo e às condições de pressão a que estão submetidas suas águas.

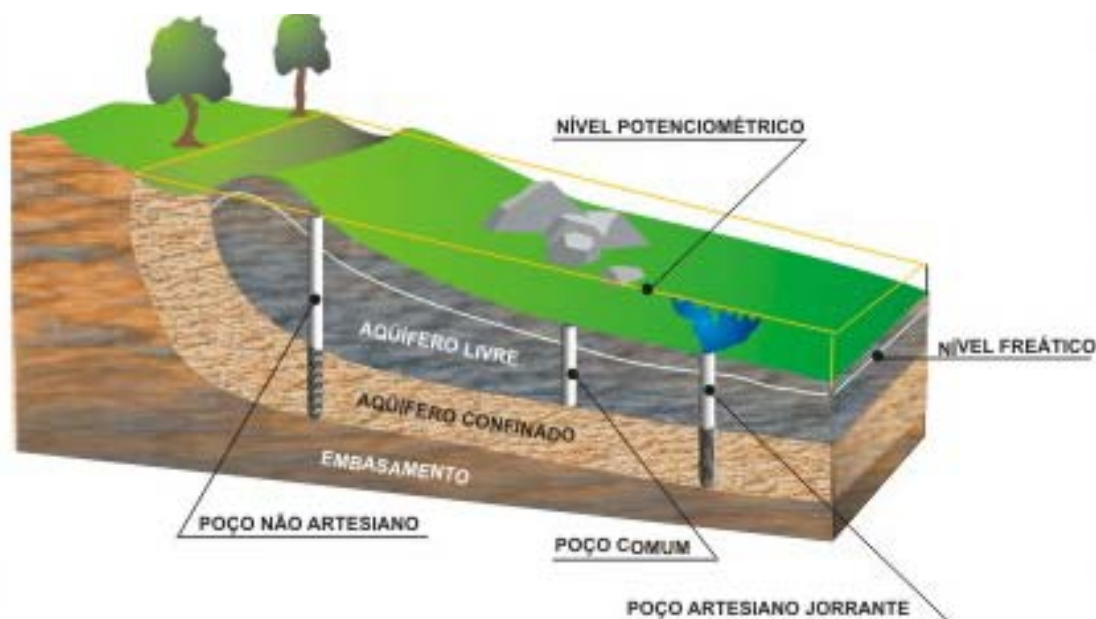


Figura 5 – Representação esquemática do nível de pressão nos aquíferos e tipos de poços penetrantes

Fonte: BOSCARDIN BORGHETTI et al (2004)

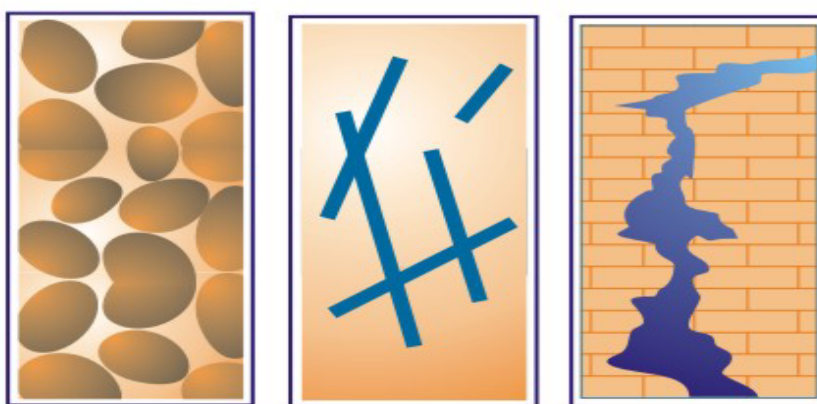
2.2.2 TIPOS DE AQUÍFEROS QUANTO À POROSIDADE

De acordo com os autores Boscardin Borghetti, et al (2004), existem essencialmente três tipos de aquíferos, classificados quanto à porosidade e assim descritos:

- **Poroso ou sedimentar:** nesse tipo de aquífero, a água circula através de poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. É constituído por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, que armazenam grande volume de água e ocorrem nas bacias sedimentares e em várzeas, onde há deposição de sedimentos arenosos. A porosidade presente, quase sempre homogeneamente distribuída, principalmente quando comparada com outros aquíferos, permite que a água flua para qualquer direção, em função tão somente dos diferenciais de pressão hidrostática existentes. Essa propriedade é conhecida como isotropia. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, MMA (2007), pode-se dizer que a formação rochosa apresenta porosidade primária, por armazenar a água nos espaços entre os grãos criados durante a formação da rocha. Os aquíferos porosos funcionam como esponjas onde os espaços vazios são ocupados por água. Exemplos desse tipo de aquífero são os arenitos (como o Bauru e Botucatu, por exemplo), além de formações arenosa não

consolidadas (Figura 6-a). O Aquífero Bauru, analisado neste trabalho, apresenta porosidade primária;

- **Fraturado ou fissural:** nesse tipo de aquífero, a água circula através de fraturas, fendas e falhas, abertas em função do movimento tectônico. É formado em rochas ígneas e metamórficas, duras e maciças, e armazena água devido à quantidade de fraturas abertas e intercomunicações dessas rochas, que permitem a infiltração e o fluxo. Um caso particular de aquífero fraturado é representado pelos derrames de rochas vulcânicas basálticas nas grandes bacias sedimentares brasileiras. Ressalta-se que, dependendo da diminuição do grau de fraturas intercomunicantes, esse sistema pode se comportar também como aquitarde, quando apresentam certa interconexão entre as fraturas, mesmo não apresentando porosidade primária; ou como aquíclode, quando não apresenta interconexão entre fraturas (Figura 6-b). Modelos matemáticos de escoamento nesse tipo de aquífero levam em consideração sondagens em campo, com levantamento da densidade de fraturas em cada perfil, além do ângulo de inclinação dessas fraturas;
- **Aquífero Cárstico:** nesse tipo de aquífero, a circulação da água ocorre nas fraturas e vazios que resultaram da dissolução do carbonato pela água. É formado em rochas calcárias ou carbonáticas, com águas duras e com fluxo em canais. Como são aquíferos heterogêneos e descontínuos, apresentando canais que formam-se em função de processos de dissolução, torna-se difícil a construção de modelos matemáticos para simular o escoamento subterrâneo nesses sistemas (Figura 6-c).



a) Poroso/sedimentar b) Fraturado/fissural c) Cárstico

Figura 6: Tipos de aquíferos quanto à porosidade.

Fonte: BOSCARDIN BORGHETTI et al. (2004)

2.3 PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Neste item são relacionados os principais parâmetros hidrogeológicos dos aquíferos, destacando suas definições e sua influência no escoamento e armazenamento da água.

2.3.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)

O nascimento da hidrologia subterrânea como uma ciência quantitativa pode ser considerado a partir 1856. Foi neste ano que o engenheiro hidráulico francês, Henry Darcy, publicou um artigo que descreveu um experimento de laboratório feito para analisar o fluxo de água através de areias. O resultado experimental foi generalizado em uma lei empírica que hoje leva seu nome. A chamada Lei de Darcy que, associada ao princípio de conservação de massa, permite a construção da equação diferencial que governa o escoamento subterrâneo, estabelece a relação entre a velocidade aparente de propagação de água e a perda de carga (dissipação de energia) sofrida durante seu percurso. Notadamente, durante sua passagem pelos poros de uma formação rochosa, a água sofre grande resistência ao seu escoamento em função do cisalhamento oferecido pela matriz do solo. Em meios porosos, a dissipação de energia resulta no decaimento da carga hidráulica entre dois pontos (ver figura 7), refletida na queda da pressão ao longo do escoamento principal. A velocidade média do escoamento é diretamente proporcional ao gradiente de carga hidráulica (declividade da superfície piezométrica). (Figura 7)

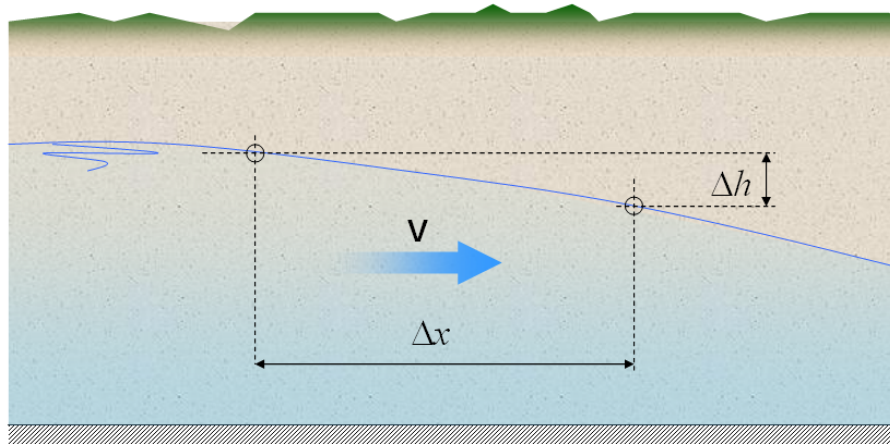


Figura 7: Decaimento da superfície piezométrica e velocidade média do escoamento.

A Lei de Darcy pode ser generalizada, para deslocamentos infinitesimais e em várias dimensões, como:

$$\vec{V} = -K \cdot \nabla h = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad \text{equação (1)}$$

Na equação (1), $\vec{V}$ é o vetor velocidade aparente formado por componentes nas três direções do espaço (x, y, z), K é o tensor de condutividade hidráulica [L/T] e $\frac{\partial h}{\partial x_i}$ é o gradiente de carga hidráulica, que indica como essa grandeza varia ao longo de cada uma das três direções. O sinal negativo da equação (1) indica que o fluxo da água ocorre no sentido contrário ao gradiente de h . Em outras palavras, a água sempre escoar dos locais de maior para os locais de menor energia (carga hidráulica). O coeficiente de proporcionalidade K , da Lei de Darcy, chamado de condutividade hidráulica, depende da quantidade e conexão dos espaços vazios dentro do aquífero, que podem ser poros, fraturas, cavidades ou planos de estratificações. Este parâmetro controla o fluxo de água subterrânea, estando diretamente vinculado com a velocidade média do escoamento, além de levar em consideração as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma e arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando, como viscosidade e massa específica. Desta forma, a condutividade hidráulica pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido, da seguinte forma:

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} = \frac{k \cdot g}{\nu} \quad \text{equação (2)}$$

Na equação (2), k é a permeabilidade intrínseca do meio poroso [L²]; ν , a viscosidade cinemática do fluido [L²/T] e g , a aceleração gravitacional [LT²]. Nota-se que, condutividade hidráulica e permeabilidade são grandezas distintas, haja vista que a segunda é uma característica intrínseca do meio.

O parâmetro condutividade hidráulica é uma das principais características utilizadas para indicar a facilidade da água subterrânea percolar entre dois pontos.

As determinações de condutividade hidráulica (K) feitas em campo são extraídas de dados de testes de bombeamento em poços (testes de aquíferos) ou testes de infiltração. No primeiro caso, bombeia-se a água de um poço e, ao obter uma vazão uniforme, mede-se o rebaixamento no poço e em poços de observações vizinhos. Em função do rebaixamento ao longo do tempo, a condutividade hidráulica pode ser estimada através de formulações empíricas. Em termos de representação do escoamento em aquíferos, os testes de campo fornecem valores mais representativos da condutividade hidráulica. Esta afirmação também se aplica aos valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento, que são definidos nos itens seguintes.

2.3.2 TRANSMISSIVIDADE (T)

A transmissividade (T) é definida como uma medida da quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por unidade de largura de uma camada saturada de um aquífero, sob um gradiente hidráulico unitário. A transmissividade é obtida pelo produto da condutividade hidráulica do aquífero pela sua espessura saturada (b), segundo denota a equação (3):

$$T = K \cdot b \quad \text{equação (3)}$$

Nota-se que a transmissividade é um parâmetro importante na análise regional de um aquífero, uma vez que relaciona a condutividade hidráulica com uma característica geométrica, a espessura da zona saturada, que é um indicador da quantidade de água armazenada. Em linhas gerais, é interessante o bombeamento de poços em regiões com grande transmissividade, haja vista que, nessas circunstâncias, os rebaixamentos induzidos na superfície piezométrica tendem a ser menores.

2.3.3 COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO (S) E RENDIMENTO ESPECÍFICO (S_y)

O coeficiente de armazenamento (S) pode ser definido como o volume de água absorvido ou expelido pelo aquífero, por unidade de área superficial, quando submetido a uma variação unitária da carga piezométrica. Tal parâmetro é um indicador da quantidade de água que pode ser removida da formação por bombeamento ou por drenagem. Com definição bastante semelhante, o rendimento específico (S_y) é o volume de água que um

aquífero livre libera, por unidade de área superficial, por unidade de declínio da superfície do lençol.

Nos aquíferos livres, a água é liberada basicamente em função da drenagem dos poros. Nesses casos, os vazios passam a ser ocupados pelo ar e o nível freático fica mais baixo. Nesse tipo de formação, o volume derivado da expulsão de água e compressão do aquífero é negligível, ocorrendo apenas nos instantes iniciais após uma perturbação, como o bombeamento de um poço, por exemplo.

Nos aquíferos confinados, ao liberar água, os poros não são esvaziados, ocorrendo alívio na pressão hidrostática, o que provoca uma compactação no aquífero. Esta é a causa para que o coeficiente de armazenamento assuma valores com ordens de grandeza bem distintas nos aquíferos confinados e livres. Desta forma, devido às diferenças na origem do armazenamento, o coeficiente de aquíferos não-confinados (S_y) é de 100 a 10000 vezes maior que o coeficiente de aquíferos confinados (S). Portanto, para a mesma redução de carga hidráulica, o aquífero livre libera mais água que o aquífero confinado.

Nos aquíferos não-confinados ou livres, o coeficiente de armazenamento é virtualmente igual ao rendimento específico, o qual assume valores da ordem da porosidade efetiva do meio. A porosidade efetiva corresponde ao volume de água que consegue ser drenado por gravidade dos poros, em relação ao volume total do meio. Assim, poros muito pequenos não contribuem para a porosidade efetiva, haja vista que a força de retenção da água nesses interstícios são maiores do que o peso da água. Enfim, a porosidade efetiva é menor do que a porosidade total do meio, pois, em função das forças coesivas e de adesão, nem toda água consegue ser drenada dos poros.

A Tabela 2 sintetiza as porosidades (relação entre o volume de vazios e o volume total) para materiais consolidados e não consolidados em geral. Note-se que nem sempre elevadas porosidades condicionam boa transmissão de água. Um exemplo é o caso das argilas que, embora com grande porosidade (η), apresentam baixas condutividades hidráulicas e baixas porosidades efetivas.

Tabela 2 - Porosidades para materiais comuns consolidados e não consolidados

Sedimentos não consolidados	$\eta(\%)$	Sedimentos Consolidados	$\eta(\%)$
Argila	45-55	Arenito	5-30
Sedimento	35-50	Calcário / dolomita	1-20
Areia	25-40	Xisto	0-10
Cascalho	25-40	Rocha cristalina fraturada	0-10
Mistura de areia e cascalho	10-35	Basalto vesicular	10-50
Areia e argila	10-35	Rocha sólida, densa	<1

Fonte: ABGE, 1996

2.4 TRABALHOS RELACIONADOS COM A COLETA DE DADOS PRIMÁRIOS DO AQUIFERO BAURU NA REGIÃO ANALISADA

Para a análise dos parâmetros hidrogeológicos e das características geométricas do Aquífero Bauru sotoposto à zona urbana de Araguari, foi necessária a busca de dados em diversos trabalhos que analisaram a região. Os trabalhos de maior relevância e que foram utilizados na presente pesquisa são apresentados neste item:

- “Relatório Final: Caracterização Hidrogeológica do Município de Araguari”, realizado pelo Fundep, de autoria de Velásquez e Romano (2004). O citado trabalho traz a definição da geologia e geometria do aquífero, os quais foram de fundamental importância para a presente pesquisa, uma vez que não foram encontrados muitos trabalhos que abordassem o assunto;
- “Avaliação dos Recursos Hídricos do Sistema Aquífero Guarani no município de Araguari, Minas Gerais, Brasil”, que foi desenvolvido pelo Fundo das Universidades (2006) e traz um modelo conceitual do Sistema Aquífero Bauru;
- “Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no Município de Araguari – MG”, do autor Fiumari (2004). O referido trabalho apresenta dados hidrogeológicos gerais do sistema Bauru e informações geológicas sobre o mesmo;

-
- “Parâmetros hidrogeológicos do Sistema Aquífero Bauru na região de Araguari/MG: fundamentos para a gestão do Sistema de Abastecimento de Água.” O trabalho, desenvolvido pelos autores Oliveira e Campo (2004) apresenta dados coletados *in loco* de poços analisados, agregando, ao presente trabalho, maior quantidade de poços analisados, possibilitando que o mapeamento das características do aquífero, objeto da presente pesquisa, se aproximasse mais da realidade;
 - “Vulnerabilidade à poluição das Águas Subterrâneas: um estudo do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari”, desenvolvido por Sousa (2009), que apresenta dados relevantes e recentes dos poços, amostrados *in loco*, distribuídos espacialmente ao longo da malha urbana de Araguari;

A análise dos diversos trabalhos foi de fundamental importância devido à escassez de dados e também de trabalhos feitos na cidade. Um mérito da presente pesquisa refere-se à reunião, em forma de mapas, das informações contidas nesses diferentes trabalhos.

2.5 SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM AQUÍFEROS

Os modelos matemáticos são ferramentas que representam uma aproximação de determinado processo. A aplicação da modelação aos aquíferos constitui uma poderosa ferramenta de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, permitindo otimizar os sistemas produtivos e a localização de captações. A integração de modelos de escoamento e transporte auxilia na identificação e resolução de problemas de poluição e na delimitação de perímetros de proteção de captações.

Os modelos matemáticos computacionais são extremamente úteis na realização de análises complexas dos aquíferos. O uso de modelos ajuda a sistematizar as informações coletadas em campo e a projetar cenários futuros de exploração do manancial subterrâneo. Na área da hidrogeologia, vários modelos podem ser encontrados, sendo que, em geral, estes utilizam o Método de Diferenças Finitas, o Método de Volumes Finitos ou o Método dos Elementos Finitos, para resolver equações diferenciais.

Em termos de revisão de literatura, este texto apresenta três estudos de caso. No entanto, os diversos artigos analisados fazem uso de programas fechados, como o *MODFLOW*, os quais não permitem acesso ao código.

O primeiro caso estudado foi o artigo intitulado “Modelo Numérico de Fluxo em Regime Transitório: o caso do aquífero Moura-Ficalho”, (COSTA, 2006) em Portugal, o qual apresenta a modelação numérica do escoamento subterrâneo na zona saturada em regime transitório do aquífero Moura-Ficalho, fazendo uso do código *MODFLOW*.

Para a referida simulação, foram levantados, inicialmente, os parâmetros físicos, como condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, sendo este um aquífero do tipo cárstico-fissurado. A condutividade hidráulica na referida formação diminui com a profundidade e varia espacialmente, sendo maior nas zonas de descarga do aquífero e menor nas zonas de recarga. O fluxo subterrâneo ocorre essencialmente de SE para NW. A recarga do aquífero é feita exclusivamente a partir da precipitação ocorrida sobre o mesmo, uma vez que, os contornos do aquífero são impermeáveis.

Ainda no trabalho desenvolvido por Cosa (2006) a recarga do aquífero foi determinada por piezômetros e através de modelos unidimensionais também fechados, os quais usam métodos determinísticos que representam os fenômenos físicos no solo. A partir do programa *Goundwater Modeling System* (GSM), articulado com o ArcGis, gerou-se uma malha de células de diferenças finitas (figuras 8 e 9) para o *MODFLOW*, para ser feita a discretização tridimensional do aquífero.

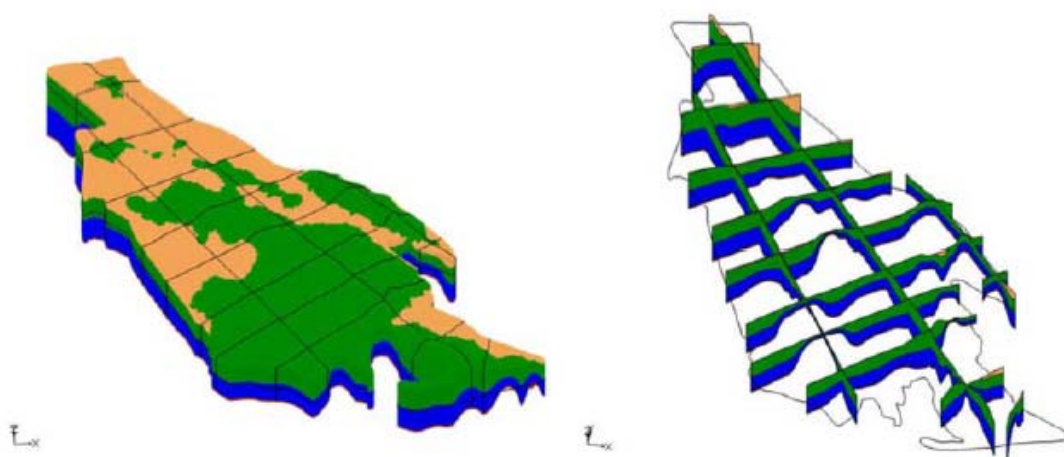


Figura 8– Sólidos gerados no ambiente GMS.

Fonte: COSTA, 2006.

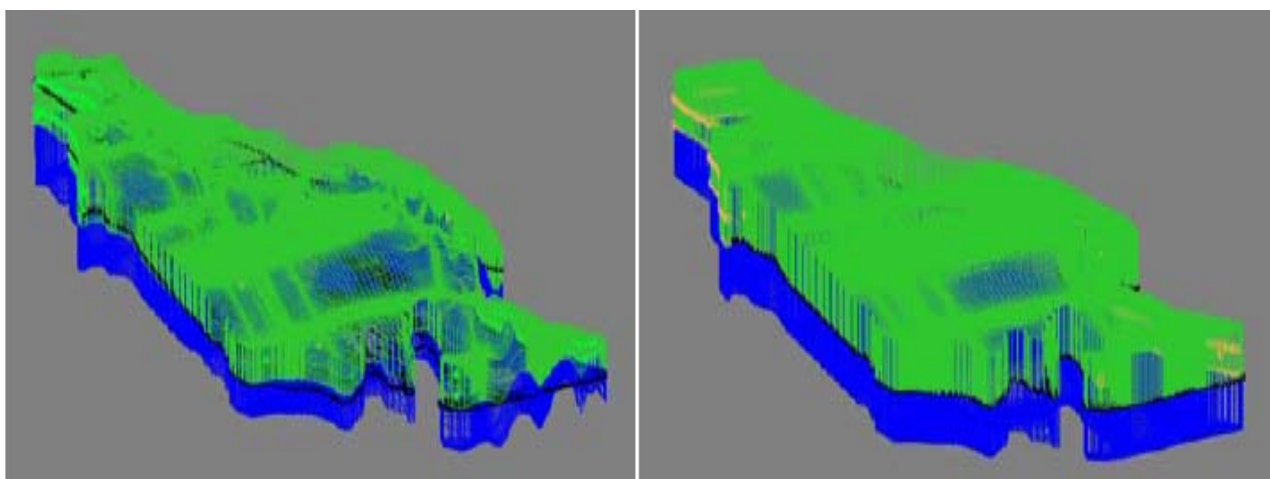


Figura 9 – Malha de discretização do modelo

Fonte: COSTA, 2006.

De acordo com Costa (2006) não foi possível minimizar os erros, uma vez que o programa não aceita modificar parâmetros regionais. De fato, o uso de faixas restritas de parâmetros, as quais não podem ser modificadas, constituem um aspecto negativo dos modelos fechados. Adiciona-se a isto, o elevado custo de aquisição desses programas.

O segundo artigo estudado intitulou-se “*Digital model of the unconfined aquifer in central and southeastern Delaware*”(JHORSTON, 1977), o qual descreve a realização de um modelo digital para aquíferos livres na região central e sudeste de Delaware City, nos Estados Unidos.

O aquífero livre da região de Delaware aparece na forma de um cobertor que se alarga rumo ao sul, sendo sua litologia de areia fina a grossa. O modelo digital foi usado para simular o fluxo num sentido aproximado, no qual apenas o abastecimento por precipitação e o escoamento da água foi representado. Foram simuladas condições de inverno para que a evapotranspiração pudesse ser ignorada. O modelo é uma representação bidimensional do sistema de fluxo que emprega o Método de Diferenças Finitas para resolver a equação do escoamento subterrâneo. A calibração foi feita através do ajuste dos valores de condutividade hidráulica, utilizando o próprio modelo, até que os contornos de nível de água e as correntes de fluxo fossem aproximados.

O modelo digital foi usado para avaliar os efeitos do aumento substancial do consumo de água em diversas áreas. A redução dos níveis de água e a diminuição do fluxo de base

foram projetadas para um período de 30 anos, utilizando diferentes taxas de consumo. A espessura saturada do aquífero variava de 8 a 52 m, a transmissividade (T) era variável, refletindo mudanças na litologia e o aumento da espessura saturada. Esses dados foram determinados por testes de bombeamento, juntamente com a condutividade hidráulica (K) e o coeficiente de armazenamento (S). Fazendo uma comparação, a presente pesquisa utilizou preceitos semelhantes, simulando um aquífero também livre (o Bauru) com parâmetros espacialmente variáveis (distribuição heterogênea), estimados por interpolação de dados obtidos a partir de testes de campo, conforme ilustram os mapas de propriedades hidrogeológicas regionais, construídos no âmbito da presente pesquisa.

O propósito do modelo de Jhorston (1977) era a simulação dos efeitos produzidos no aquífero pela exploração feita através dos poços, considerando as diversas variáveis. Comparando com a presente pesquisa, o cenário utilizado também foi feito com introdução de novos poços no sistema.

No trabalho de Jhorston (1977), o Método de Diferenças Finitas foi utilizado para resolver as equações de fluxo, discretizando os valores numa malha tridimensional. A transmissividade foi calculada para cada passo de tempo da simulação como o produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada em cada nó da malha discretizada (ver figura 10). Dentre os métodos numéricos de solução, é importante salientar que a presente pesquisa também utilizou um modelo com Método de Diferenças Finitas.

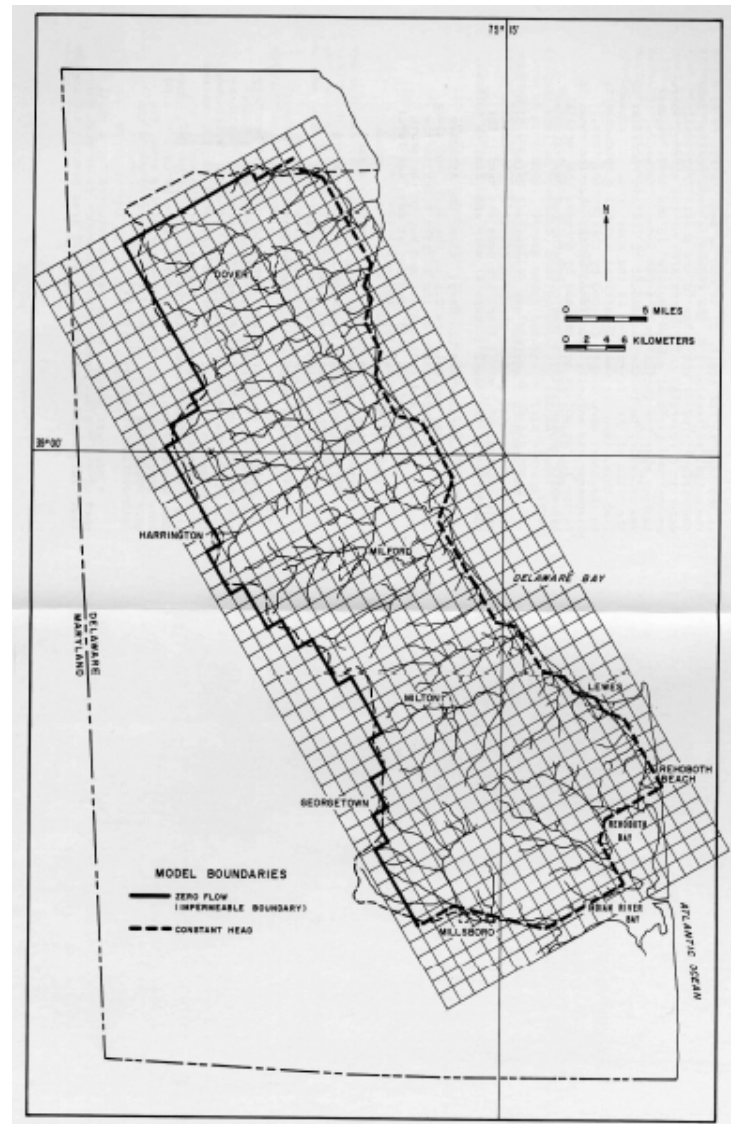


Figura 10 – Malha de diferenças finitas para discretização do aquífero de Delaware

Fonte: JHORSTON, 1977

Os resultados de Jhorston (1977) foram satisfatórios de acordo com os propósitos do modelo, gerando mapas de curvas dos diversos parâmetros (como o ilustrado pela Figura 11), e também gráficos comparativos do nível de água do aquífero. Na presente pesquisa, geraram-se mapas semelhantes para o aquífero Bauru na zona urbana de Araguari.

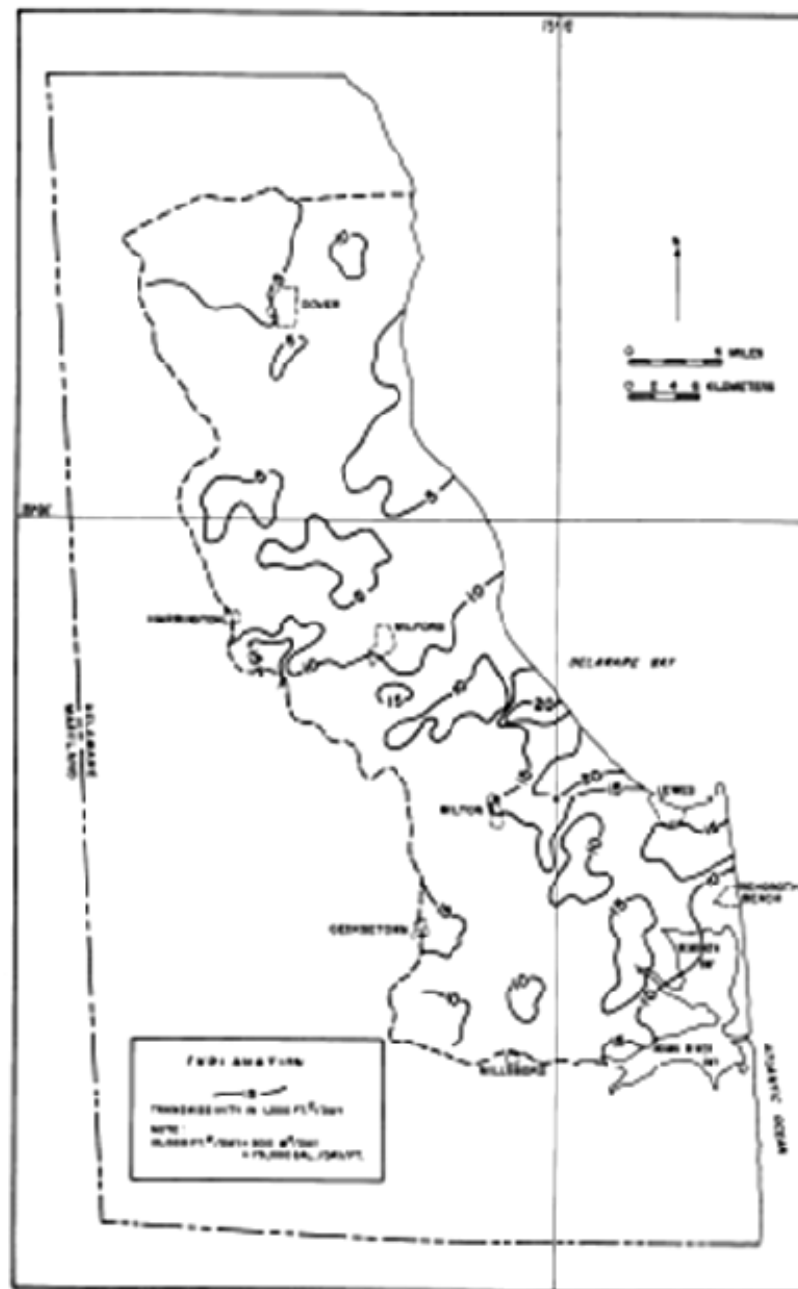


Figura 11 – Mapa de curva de transmissividade do aquífero de Delaware

Fonte: JHORSTON, 1977

Ainda em termos de revisão de literatura, cita-se o artigo intitulado “*Three-dimensional numerical simulation of fully coupled groundwater flow and land deformation due to groundwater pumping in an unsaturated fluvial aquifer system*” (KIHM, et al. 2007), o qual descreve a realização da simulação numérica tridimensional do fluxo subterrâneo e da deformação do solo por bombeamento das águas subterrâneas.

Esse artigo utiliza uma série numérica tridimensional para o modelo do fluxo. É realizada também uma simulação numérica no estado transiente, a partir das equações gerais de escoamento, da Lei de Darcy, utilizando os parâmetros físicos do aquífero, como condutividade hidráulica, transmissividade e o coeficiente de armazenamento, discretizados na malha. Salienta-se que, no caso da presente pesquisa, a obtenção desses parâmetros hidrogeológicos, em cada nó da malha de diferenças finitas, foi um dos principais objetivos da interpolação descrita no capítulo 4.

O modelo numérico utilizado por Kihm et al. (2007) foi o *COWADE123D*, o qual transforma as equações em matrizes para obter soluções numéricas. Nesse caso, foram adotados, também, métodos não lineares para incrementar os parâmetros, para resolver problemas associados com as mudanças nas propriedades hidráulicas, como grau de saturação e condutividade hidráulica e porosidade. O sistema aquífero foi discretizado em uma malha de 6840 hexaedros, com 8294 nós e em duas camadas de acordo com o solo encontrado (ver figura 12). Tem-se, no exemplo, uma malha não estruturada de elementos finitos. A simulação da presente pesquisa não utilizou esse tipo de discretização espacial do domínio de escoamento, mas sim, uma malha estruturada de diferenças finitas, com elementos retangulares, semelhante àquela ilustrada pela Figura 10.

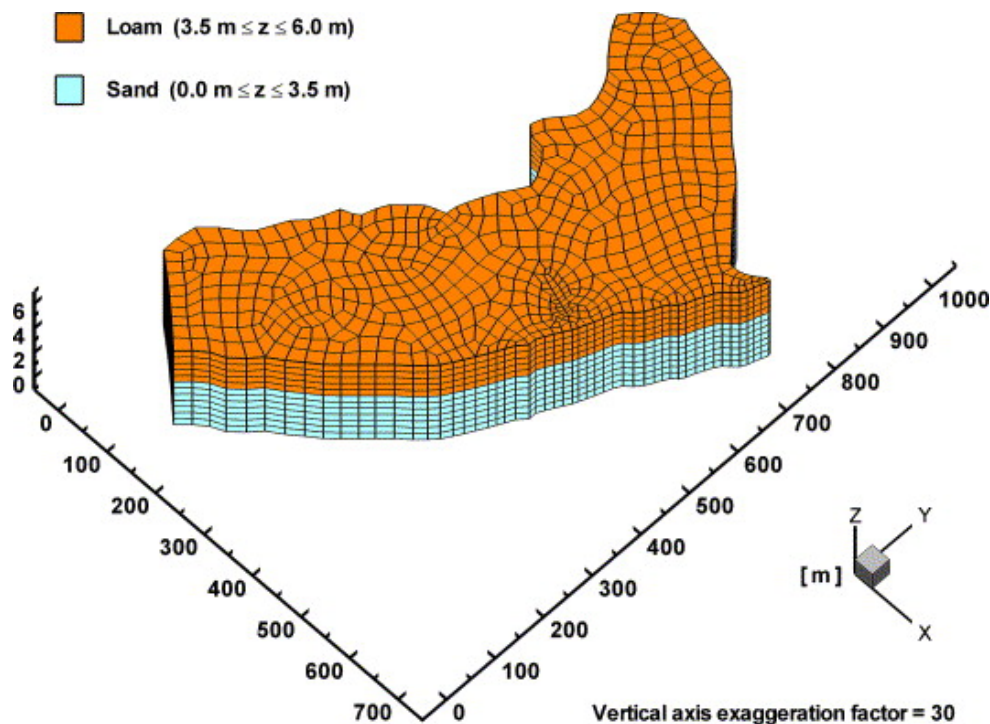


Figura 12 – Esquema tridimensional da discretização da área do aquífero

Fonte: KIHM, 2007.

O modelo proposto no artigo de Kihm et al. (2007) teve a finalidade de estabelecer as linhas de vetores do fluxo do aquífero, conforme pode ser observado na Figura 13.

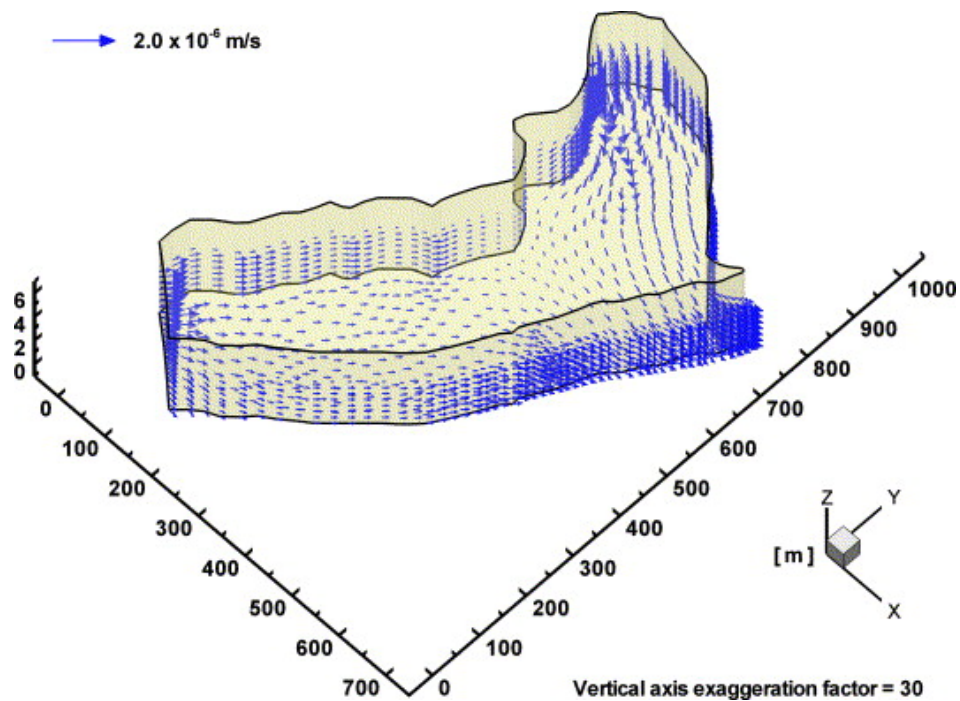


Figura 13 – Distribuição das linhas de fluxo do aquífero

Fonte: KIHM, 2007.

CAPÍTULO 3

RECORTE ESPACIAL DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Araguari está localizado na região do Triângulo Mineiro, a 600 km de Belo Horizonte, a 380 km de Brasília e a 610 km de São Paulo. O município possui uma área total de 2.732 km², IBGE (2009), da qual 54 km² são ocupados pelo perímetro urbano, estando localizado entre as coordenadas geográficas de referência S 18°19'15" - 18°54'00" e W 48°40'50" - 47°49'50" - (ver localização na Figura 14).

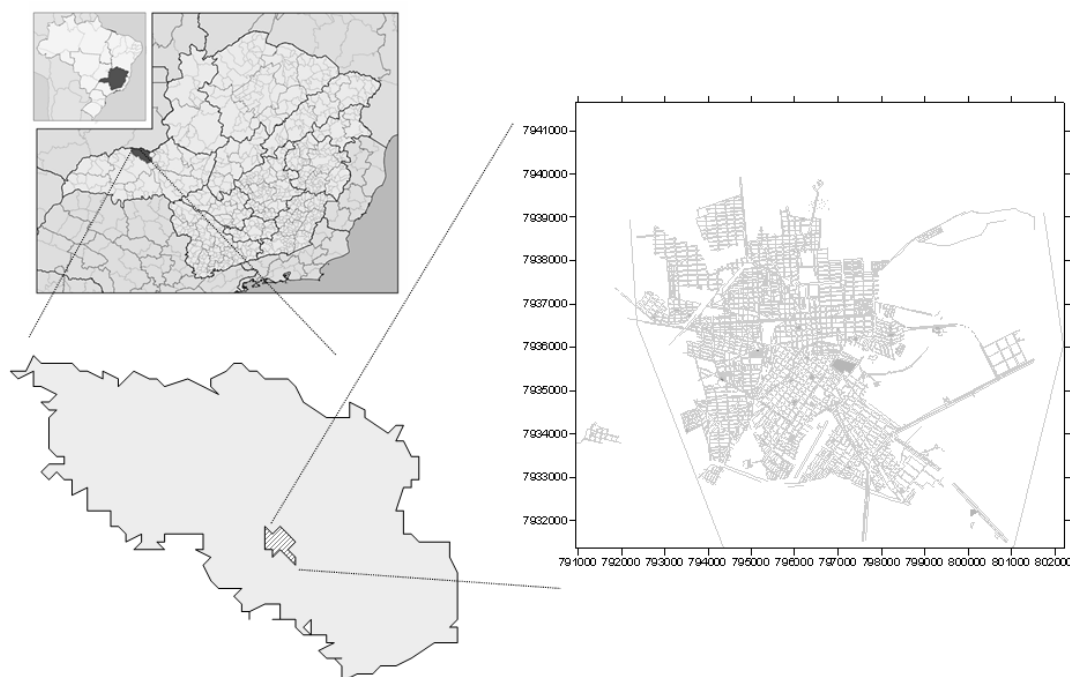


Figura 14 – Mapa de situação do município de Araguari em Minas Gerais, com destaque para a localização da zona urbana estudada.

O abastecimento de água da população da cidade de Araguari (cerca de 106 mil habitantes) é feito exclusivamente por água subterrânea. O sistema de abastecimento é composto por 120 poços, 96 dos quais estão em operação, 21 inoperantes e 5 recém-perfurados (SAE, 2009). Estes últimos ainda não foram incorporados ao sistema de captação de águas para abastecimento público. Os 96 poços em funcionamento produzem uma vazão aproximada

de 1.874 m³/h. Todos os poços pertencentes ao sistema público de abastecimento de água de Araguari exploram água do Aquífero Bauru (OLIVEIRA e CAMPOS, 2004).

3.1 POPULAÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2007), a cidade de Araguari apresenta uma população total 106.409 habitantes, sendo 91% urbana e 9% rural. A taxa de crescimento demográfico vem caindo desde a década de 1960, variando de 4,89% entre 1950/60 a 1,16% entre 1990/00. A previsão de crescimento populacional, para um horizonte de 20 anos é que o município atinja 120.600 habitantes, de acordo com a projeção que considera a taxa de crescimento verificada no período de 1996-2000.

Segundo a Fundação João Pinheiro, FJP (2007), o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) da cidade de Araguari, no período de 1970 a 1991, foi de 0,814; o que classifica a cidade na categoria de alto nível de desenvolvimento urbano.

3.2 CLIMA

O regime pluviométrico da região de Araguari é típico de áreas tropicais, com precipitações máximas no verão e mínimas no inverno, com índice médio pluviométrico anual de 1.589,4 mm (IBGE, 2000 *in* www.almg.gov.br). Segundo a Superintendência de Água e Esgoto de Araguari, SAE/Araguari (2007), o clima da região é caracterizado pelo predomínio de temperaturas amenas durante todo o ano, com média mensal sempre inferior a 22°C. As médias mensais mínimas no inverno são da ordem de 12,2°C, e no verão apresenta temperaturas médias de 23,4°C e temperatura média anual de 21,9°C. O período de chuva concentra-se entre os meses de outubro a março, enquanto que os meses mais secos correspondem ao período de abril a setembro.

3.3 GEOLOGIA E RELEVO

Trabalhos pioneiros sobre a geologia da região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba foram elaborados por Barbosa, segundo Velásquez e Romano (2004). Assim, de acordo com esses trabalhos, ocorrem, na área, rochas do embasamento pré-cambriano, o qual é constituído, em ordem de ocorrência, pelas rochas metassedimentares do Grupo Araxá, de idade Neoproterozóico (DARDENNE, *apud* VELÁSQUEZ e ROMANO, 2004),

Complexo gnáissico-granulítico, de idade do Neoproterozóico e Granitóides pós-tectônicos.

Sobre essas rochas repousam os estratos mesozóicos da Bacia Sedimentar do Paraná, constituído de seqüências arenosas e vulcânicas do Grupo São Bento, de idade jurássica, sobreposto pelos sedimentos areno-siltosos e argilosos do Grupo Bauru, de idade cretácea. (VELÁSQUEZ e ROMANO, 2004)

Segundo Velásquez e Romano (2004), o subsolo do município de Araguari, correspondente à bacia sedimentar do Paraná, é caracterizado por duas feições bem distintas decorrentes das variações litológicas:

- Uma superfície superior, acima de 900 m, aplainada, homogênea e contínua, estabelecida sobre os sedimentos arenosos do Grupo Bauru, caracteriza-se pela elevada taxa de infiltração e baixa taxa de drenagem. As principais drenagens instaladas nessa superfície, que conduzem águas para o rio Paranaíba, são os ribeirões Araras, o Amanhece, e o Piçarrão;
- Uma segunda feição é caracterizada por um relevo estruturado em degraus, de acordo com o número de derrames basálticos. É nessa morfoestrutura que ocorrem as maiores concentrações das descargas subterrâneas, com nascentes que surgem no contato entre os sedimentos de topo e o basalto.

Os contatos no topo dos basaltos correspondem aos pontos de descarga do Aquífero Serra Geral, onde formam-se as principais nascentes de topo, entre as cotas 880 m e 900 m. Há também, no município, nascentes formadas na base dos derrames basálticos, entre as cotas 750 m e 700 m (VELÁSQUEZ e ROMANO, 2004)

3.4 TECTONISMO E LITOESTRATIGRAFIA

O município de Araguari está situado na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, representada por rochas sedimentares e vulcânicas de idade juro-cretácea. Durante o cretáceo, essa porção nordeste da bacia foi submetida a deformações rúpteis que provocaram a geração de movimentos ascensionais, resultando no soerguimento do Alto

Paranaíba e na subsidência de áreas laterais. Isso gerou as Depressões Uberaba, a oeste do soerguimento, e a Depressão de Abaeté, a leste (HASUI, *et al*, 1975, *apud* IGAM, 2001).

Ocorrem, no município de Araguari, três unidades litológicas (VELASQUEZ e ROMANO, 2004):

- **Unidades pré-cambrianas:** Complexo Gnáissico-granulítico, Grupo Araxá e Granitóides intrusivos;
- **Unidades mesozóicas:** Grupo São Bento (juro-cretáceo) e Grupo Bauru (Cretáceo Superior);
- **Unidades cenozóicas:** Coberturas detrito-lateríticas coluvionares e eluvionares, depósitos aluviais recentes.

As unidades de maior importância para o estudo das águas subterrâneas no município de Araguari, no qual, a unidades pré-cambriana compõem-se principalmente de micaxistos de origem sedimentar e vulcânica, tais como xistos de diferentes graus de metaformismo. Além dos xistos, ocorrem lentes e camadas quartzíticas puras e de quartzitos micáceos (VELASQUEZ e ROMANO, 2004).

Já as unidades mesozóicas, na área de estudo, pertencentes à bacia sedimentar do Paraná, são correlacionadas ao Grupo São Bento, representados pelas Formações Botucatu e Serra Geral, e ao Grupo Bauru representado pela Formação Marília. As rochas do grupo São Bento segundo Velásquez e Romano (2004), correspondem às mais representativas no município devido aos extensos e espessos derrames basálticos da Formação Serra Geral.

O Grupo Bauru ocorre em cerca de 42% do município, cerca de 1152 km², correspondendo à unidade mais significativa em extensão e produção de água (VELASQUEZ e ROMANO, 2004). Ocorre geralmente em cotas de 880 m a 900 m, com espessura média de 55 m, com tendência ao aumento no sentido da porção sudeste do município. Na sede municipal de Araguari (zona urbana), a espessura da unidade Bauru situa-se entre 50 m e 55 m, conforme mostra o cadastro dos poços tubulares (SAE, 2009).

Por fim, as unidades cenozóicas constituem, juntamente com os arenitos da Formação Marília, uma expressiva unidade inconsolidada para a formação das chapadas, principal

conformação morfológica de Araguari. Nessas superfícies, aplainadas pela erosão terciária, os depósitos são de natureza areno-argilosa a siltosa, avermelhada e castanho-avermelhada. Esses sedimentos resultam da ação direta de intempéries, sem transporte de sedimentos (VELASQUEZ e ROMANO, 2004).

Os depósitos aluvionares, de formação recente, são pouco expressivos. Porém, são importantes sob o ponto de vista hidrogeológico, pois constituem zonas de intercâmbio ativo com as águas superficiais, recebendo recarga dos rios nos períodos de cheia e contribuindo para o escoamento de fluxo de base dos mesmos nos períodos de estiagem (VELASQUEZ e ROMANO, 2004).

3.5 USO MUNICIPAL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O desenvolvimento sócio-econômico do município de Araguari é interdependente da água subterrânea, pois, além do abastecimento público, ela é amplamente utilizada na irrigação do café, sendo esta a principal atividade agrícola, seguida pela sojicultura, milho e trigo.

A agricultura, segundo Velásquez (2004), demanda a irrigação de 20 mil hectares, sendo que os principais métodos praticados são: aspersão localizada – 75% da área irrigada, gotejamento – 20% e outros – 5%.

A Tabela 3 resume o consumo de água subterrânea na bacia do rio Araguari. É importante comentar que tais dados não se referem exclusivamente à cidade de Araguari, haja vista que tal bacia compreende vários outros municípios. Todavia, seus dados são regionalmente interessantes, na medida em que apresentam um cenário relativamente atual de utilização das águas subterrâneas nessa bacia.

Tabela 3 – Consumo de água subterrânea por tipo de uso na Bacia do Rio Araguari.

Tipo de uso	Nº de poços	m³/ano	Percentual (%)
Agrícola	299	10.488.372	47
Doméstico	120	925.525	4
Público	98	8.922.481	40
Pecuário	26	339.220	1,5
Comercial	17	152.334	0,7
Industrial	20	1.322.112	6
Recreação	3	159.840	0,8
Total	585	223.028.980	100

Fonte: IGAM, 2001

O município de Araguari, como dito anteriormente, é abastecido em sua totalidade por água subterrânea, constituindo o único município da bacia do Rio Araguari que utiliza exclusivamente água subterrânea para abastecimento público.

A água dos lençóis subterrâneos é extraída por intermédio de poços tubulares, sendo que a concessionária local de água dispõe de 120 poços distribuídos na zona urbana, seja em baterias, conduzindo a água a reservatórios de distribuição, ou isoladamente, injetando água diretamente na rede. Destes, 12 estão desativados, 66 estão localizados em 9 baterias (áreas com poços concentrados) e 48 poços são isolados. Na maioria dos poços, a água não é injetada diretamente na rede de distribuição, sendo conduzida, através de tubulações, até uma caixa de areia e, em seguida, aos reservatórios. A vazão média de cada poço é de 20 m³/h e a concessionária opera diariamente com 96 poços (SAE Araguari, 2009).

O Sistema Aquífero Bauru é o de maior potencial em fornecimento de água, concentrando mais de 90% dos poços responsáveis pelo abastecimento de água de Araguari (OLIVEIRA e CAMPOS, 2004). Dado que o aquífero Bauru é o mais explorado do município, é elevada a densidade de poços em algumas áreas, como na zona urbana e em determinadas localidades agrícolas, como na região do distrito de Amanhece. A natureza pouco profunda desse aquífero e seu material litológico facilitam a perfuração indiscriminada de poços, o que tende a comprometer sua produtividade.

Atualmente, a SAE/Araguari enfrenta dois problemas relacionados à qualidade da água para abastecimento. O primeiro é a presença de areia na água, devido ao dimensionamento incorreto de camadas de pré-filtro, comprometendo a eficiência e a durabilidade das bombas submersas. O segundo, é a correção do pH da água bruta que, segundo a SAE (2009) fica em torno de 5,0. Nesse contexto, seria necessária a correção para que o pH ficasse entre 6,0 e 9,5 para atender à Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde. Apenas os poços localizados nas baterias e alguns poços solteiros (isolados) bombeiam a água para uma caixa de areia. Apesar disto, pouca manutenção é dada nessas caixas, o que as tornam ineficientes. Nesse sentido, os reservatórios de distribuição acabam por atuarem, também, como tanques de sedimentação de areia, sofrendo um processo de assoreamento paulatino. A correção do pH da água não é realizada atualmente.

3.6 HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O Aquífero Bauru, na região, é constituído pela seqüência areno-siltosa da Formação Marília. O sistema é caracterizado como um aquífero livre, isto é, a superfície que limita a zona saturada do aquífero coincide com a superfície do lençol freático, não apresentando camadas impermeáveis confinantes superiores. A formação possui alta a média porosidade e permeabilidade e também uma alta capacidade de armazenamento, segundo Velásquez e Romano (2004).

A espessura da camada saturada desse sistema é variável, podendo chegar a 55 m. Em termos regionais, a superfície freática está entre as cotas de 880 e 900 m (VELASQUEZ e ROMANO, 2004). Considerando que a zona urbana da cidade apresenta cota altimétrica média de 935 m, é possível perceber que o manancial subterrâneo, responsável pelo abastecimento de água não apresenta profundidades consideráveis, fato que potencialmente aumenta sua vulnerabilidade à poluição (SOUZA, 2009).

De acordo com o Fundo das Universidades (2006), estima-se que as águas subterrâneas na região são geologicamente recentes, podendo ser classificadas como águas meteóricas, com tempos de renovação inferiores a 30 anos. Também, segundo o mesmo estudo, a larga utilização das águas subterrâneas na região deve-se ao grande potencial dos aquíferos Bauru e Serra Geral fraturado, proporcionado pela elevada taxa de infiltração pluviométrica, a qual é favorecida pelo relevo de chapada e pela textura do solo laterítico (OLIVEIRA e CAMPOS, 2004). O baixo custo dos poços perfurados no aquífero Bauru, com profundidades médias de 55 m, é também um fator que contribui largamente para a elevada utilização desse manancial.

Velásquez e Romano (2004), com base nas tipologias das rochas que ocorrem no município e, a partir de informações levantadas na perfuração de poços tubulares, individualizaram três grandes sistemas hidrogeológicos os quais são do tipo livre. De cotas menores para cotas maiores, tem-se:

- **Sistema Aquífero Cristalino**, de natureza fissural, associado às unidades litológicas pré-cambrianas do embasamento cristalino, constituído por granitos, gnaisses, migmatitos, granulitos, quartzitos e xistos;

- **Sistema Aquífero Serra Geral**, de natureza predominantemente fissural, composto pelos derrames basálticos e pelos arenitos intertrapeanos;
- **Sistema Aquífero Bauru**, de natureza intergranular, associado aos sedimentos arenosos do Grupo Bauru e às coberturas Terciárias, subjacente a cerca de 42 % da área municipal.

A espessura média saturada explotada do sistema Serra Geral é de 50 m e a do Sistema Bauru é de aproximadamente 40 m (VELÁSQUEZ e ROMANO, 2004). Vale ressaltar que o aquífero mais utilizado é o Bauru, dada à facilidade de perfuração e à satisfatória produção. Alguns poços explotam água dos dois sistemas (Serra Geral e Bauru), os quais são considerados poços mistos (SAE, apud SOUZA, 2009). Os poços do Sistema Bauru produzem uma vazão média de 21,8 m³/h e os poços mistos, 23,8 m³/h. Em Araguari, o sistema Serra Geral é de baixa produtividade, entre 5 m³/h e 10 m³/h (SOUZA, 2009).

Oliveira e Campos (2004) dividem o Sistema Aquífero Bauru em dois subsistemas, em função do aquífero mostrar-se heterogêneo ao longo da direção vertical, apesar do caráter intergranular da porosidade, pois as fácies que o compõem são distintas quanto à granulometria, porosidade, condutividade hidráulica e litotipo. Nesse contexto, os referidos autores ilustram distribuição aproximada do aquífero Bauru na região, conforme Figura 15.



Figura 15- Perfil esquemático do Aquífero Bauru, na região de Araguari, MG.

Fonte: OLIVEIRA e CAMPOS (2004).

Segundo Oliveira e Campos (2004), o Subsistema Bauru Superior é formado pelos solos profundos e pelas couraças lateríticas degradadas que formam os latossolos. Esses latossolos alcançam espessura máxima de 45 m e compõem a porção superior deste subsistema. Na base dos latossolos, pode ocorrer uma camada de couraça laterítica, em diferentes graus de degradação e, também, pode conter concreções ferruginosas. Devido às suas condições de porosidade e de condutividade hidráulica, os latossolos assumem importante papel na recarga dos aquíferos poroso e fraturado. Ainda, de acordo com os mesmos autores, o Subsistema Bauru Inferior é o principal aquífero da região, sendo formado pelos sedimentos do membro Araguari. As fácies arenítica e conglomerática do membro Araguari estão assentadas discordantemente sobre os basaltos da Formação Serra Geral e compõem a base do Sistema Aquífero Bauru. A camada desse subsistema é variável, podendo chegar a 20 m (OLIVEIRA e CAMPOS, 2004), situados entre as cotas de 880 e 900 m. A maioria das nascentes que alimentam as drenagens superficiais, na área do município, localiza-se na discordância entre os conglomerados e os basaltos.

Oliveira e Campos (2004) indicam, na Tabela 4, os parâmetros hidrogeológicos médios, levantados no Sistema Aquífero Bauru, na cidade de Araguari. Já Velásquez e Romano (2004), na Tabela 5, listam os parâmetros hidrogeológicos médios, levantados, para o Sistema Bauru, na mesma região.

Tabela 4 – Parâmetros hidrogeológicos do Aquífero Bauru na região de Araguari para Oliveira e Campos

Parâmetros hidrogeológicos	Valor
Espessura saturada	33 m
Espessura da zona vadosa	7 a 36 m
Porosidade efetiva média	15%
Condutividade hidráulica	de 5×10^{-6} a $1,6 \times 10^{-4}$ m/s – média de $3,1 \times 10^{-5}$ m/s
Transmissividade média	$9,6 \times 10^{-4}$ m ² /s
Vazões médias	19,5 m ³ /h
Capacidade específica média	1,3 m ³ /m

Fonte: OLIVEIRA e CAMPOS *apud* SOUZA (2009)

Tabela 5 - Parâmetros hidrogeológicos do Aquífero Bauru na região de Araguari para Velasquez e Romano

Parâmetros hidrogeológicos	Valor
Espessura saturada	40 m
Condutividade hidráulica média	$2,27 \times 10^{-3}$ cm/s
Transmissividade média	76,35 m ² /dia
Vazões médias	21,8 m ³ /h
Capacidade específica média	0,9 m ³ /m

Fonte: VELÁSQUEZ e ROMANO apud SOUZA (2004).

Segundo Bertol (2007), as recargas anuais do aquífero Bauru, estimadas pela análise da curva do hidrograma, correspondente aos anos hidrológicos de 2003/2004, foram de 398 mm, para sub-bacia Córrego Amanhece, e 422 mm, para a sub-bacia Ribeirão das Araras. No ano hidrológico de 2004/2005, os valores foram de 515 mm, para a sub-bacia Córrego Amanhece, e 543 mm, para a sub-bacia Ribeirão das Araras. A recarga aquífera anual, estimada por meio da variação do nível da água, utilizando a média da somatória dos incrementos de nível de água, foi de 470 mm, correspondente ao período de mar/2005 a fev/2006. Já no estudo realizado pelo Fundo das Universidades (2006), a recarga do Aquífero Bauru foi estimada para o período de 2004/2005. Segundo o método de balanço hídrico, o valor foi de 744 mm/ano. Segundo o método de aplicação do traçador radioativo, este valor varia da ordem de 389 a 807 mm/ano.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Os métodos e procedimentos que foram utilizados na realização deste trabalho são descritos nos sub-itens seguintes. Procurou-se elucidar uma seqüência para montar a estrutura metodológica da pesquisa.

A etapa de levantamento de informações correspondeu à primeira fase da pesquisa. Nesta etapa, o objetivo foi reunir as informações acerca dos dados contidos em diversos trabalhos científicos recentes sobre o Aquífero Bauru, no município de Araguari. Esses trabalhos científicos levantaram, em campo, valores pontuais de algumas características e parâmetros do aquífero. Nesse contexto, foram agrupados dados como: coordenadas geográficas dos pontos de coleta, cotas do nível do terreno, cotas do topo do basalto, cota dos níveis dinâmico e estático, dados operacionais dos poços e, principalmente, os parâmetros hidrogeológicos do aquífero, como condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e rendimento específico (S_y). Esses dados primários possibilitaram estabelecer outros aspectos geométricos, como a espessura saturada do aquífero (b) e a distribuição de profundidade do lençol. A partir dessas distribuições, uma importante variável hidrodinâmica pôde ser estimada, a velocidade média do escoamento, calculada pela Lei de Darcy.

4.1 LEVANTAMENTO E SELEÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO

Conforme já foi comentado, os poços utilizados pela SAE e que visam ao abastecimento público, podem ser divididos em poços isolados e poços de bateria. Nesse contexto, vale salientar que as baterias consistem em locais com poços concentrados em áreas relativamente pequenas, utilizadas pelo serviço municipal de água e esgoto, para captação de água subterrânea.

A definição e seleção dos pontos que foram analisados, no que diz respeito à coleta de dados da literatura, ocorreram em razão da disponibilidade da maior concentração de dados, levantados em testes de campo, em cada poço. Considerou-se, também, o critério de distribuição espacial, pois poços bem distribuídos na área urbana contribuem para uma melhor interpolação dos resultados no espaço analisado e, conseqüentemente, para a confecção de um mapeamento mais preciso das características do aquífero.

A listagem dos poços utilizados, com sua devida situação de operação, encontra-se na Tabela 6. A situação “ativo” corresponde ao poço em operação regular, já os poços “parados” são os que não estão sendo utilizados por sua vazão não ser necessitada até o presente momento (SAE, 2009) e os “inoperantes”, são os que apresentam problemas construtivos que não possibilitam a exploração de água do aquífero.

A partir desse levantamento dos poços, foi possível estabelecer o uso de uma rede de 65 poços com dados a serem analisados, sendo que 23 poços encontram-se em 6 baterias. Apesar da quantidade relativamente grande de pontos amostrais, é conveniente citar que nem todos dispunham de todos os dados hidrogeológicos citados no início deste capítulo.

Tabela 6 – Poços levantados para análise com situação de operação

Ponto	Localização	Situação
P1	Bateria Industrial SAE	Parado
P1a	Poço Observação	Parado
P2	Poço Isolado São Sebastião	Ativo
P3	Distrito Industrial SAE	Ativo
P4	Av Minas Gerais 2619	Ativo
P5	Av Minas Gerais 1515	Ativo
P6	Av. Benedito Theodoro Naves - Vieno	Ativo
P7	R. Jornalista Líbano Galant	Parado
P8A	Bateria Cachoeirinha	Ativo
P8B	Bateria Cachoeirinha	Ativo
P8C	Bateria Cachoeirinha	Ativo
P8D	Bateria Cachoeirinha	Ativo
P9	Contingente	Ativo
P10	Industrial	Ativo
P11	Rua Walter Santiago	Ativo
P12	Pç Padre Eloi	Ativo
P13A	Bateria São Benedito	Inoperante

P13B	Bateria São Benedito	Inoperante
P13C	Bateria São Benedito	Inoperante
P14	Bateria São Benedito	Inoperante
P15	Poço novo S. Sebastião	Ativo
P16A	Bateria de Chamcia	Ativo
P16B	Bateria de Chamcia	Ativo
P16C	Bateria de Chamcia	Ativo
P16D	Bateria de Chamcia	Ativo
P17	R Citacilio Pinto de Oliveira	Ativo
P18A	Bateria Estadual	Ativo
P18B	Bateria Estadual	Ativo
P18C	Bateria Estadual	Ativo
P18D	Bateria Estadual	Ativo
P19	R Jose Belem Miguel 2990	Inoperante
P20	R das Araras	Ativo
P21	R das Oitis	Ativo
P22	Av Brasil	Ativo
P23A	Bateria Fátima	Parado
P23B	Bateria Fátima	Ativo
P23C	Bateria Fátima	Ativo
P23D	Bateria Fátima	Ativo
P24	Bateria de Gutierrez	Ativo
P25A	Bateria Independência	Ativo
P25B	Bateria Independência	Ativo
P25C	Bateria Independência	Ativo
P26	Bateria São Sebastião	Ativo
P27	Creche M de Castro	Ativo
P28	Av. Minas Gerais 3535	Ativo
P29	Poço da Av. Coronel Belchior	Parado
P30	Poço Rua Goiás	Ativo
P31	Poço Miranda	Ativo
P32	Poço novo da Passarela	Ativo
P33	Poço da R. 21	Parado
P34	Poço novo da Minas Gerais	Parado
P35	Poço Madri	Ativo
P36	Poço da Theodoretto	Ativo
P37	Praça Getúlio Vargas	Ativo
P38	Ginásio	Ativo
P39	Araras	Ativo
P40	R. Tupaciguara	Ativo
P41	Poço da Jaca P31	Ativo
P42	Chácara Fernando	Ativo

P43A	Faz Cavalaro 1	Ativo
P43B	Faz Cavalaro 2	Ativo
P44	Faz Cachoeirinha	Ativo
P45	Pç Benito Felice	Ativo
P46	Poço da Exposição	Ativo
P47	Poço Fazenda Flor Amanhecer	Ativo

Fonte: SAE (2009)

4.2 COORDENADAS GEO-REFERENCIADAS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO

As coordenadas geográficas foram levantadas dos trabalhos científicos dos autores Velásquez e Romano (2004), Oliveira e Campos (2004), Souza (2009) e do relatório do Fundo das Universidades (2006), sendo necessária a conversão desses dados para o sistema de coordenadas cartesianas UTM. Com este intuito, foi utilizado o programa computacional *Data Geosis* (2005). O motivo desta transformação é o fato de que coordenadas cartesianas, como as UTM, propiciam um estudo espacial mais direto do que as coordenadas geográficas, principalmente quando a distância entre os diferentes pontos é uma variável de interesse. Após a transformação das coordenadas, os pontos foram distribuídos no mapa geo-referenciado da malha urbana da cidade, sendo possível, a partir desta etapa, reunir o máximo de informações acerca de cada poço.

Nesta etapa, os poços selecionados foram identificados segundo sua localização geo-referenciada em sistema cartesiano UTM. O *datum* usado foi o SAD 69 (*South American*, 1969). Para os poços que não constavam de localizações geo-referenciadas, estas foram identificadas no mapa geo-referenciado fornecido pela SAE, o qual fornece todos os poços de abastecimento da cidade de Araguari. Outros pontos tiveram as coordenadas coletadas em campo, com GPS. Na Figura 16, é ilustrada a distribuição espacial dos poços na malha urbana da cidade.

Figura 16 – Distribuição Espacial dos Poços na Malha Urbana da Cidade

A listagem de todos os poços, com suas devidas coordenadas UTM, encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Coordenadas UTM dos poços analisados

Ponto	EW (m)	SN (m)	Fonte
P1	795542,0111	7937551,5688	Fundo das Universidades (2006)
P1a	795542,0111	7937551,5688	Fundo das Universidades (2006)
P2	794043,5976	7937873,4034	Fundo das Universidades (2006)
P3	798657,5674	7933226,7404	Fundo das Universidades (2006)
P4	796212,2510	7934485,6219	Oliveira (2004)
P5	796806,0000	7935281,0000	Oliveira (2004)
P6	794166,9845	7938854,7000	Oliveira (2004)
P7	795115,0000	7935358,0000	Oliveira (2004)
P8A	793855,0000	7935946,0000	Oliveira (2004)
P8B	793796,7015	7935984,1705	Oliveira (2004)
P8C	793807,0000	7936018,0000	Oliveira (2004)
P8D	793791,0000	7935959,0000	Oliveira (2004)
P9	796162,0000	7934026,0000	Oliveira (2004)
P10	798732,8200	7933042,7996	Oliveira (2004)
P11	796154,0000	7938562,0000	Oliveira (2004)
P12	796915,0000	7934770,0000	Souza (2009)
P13A	795912,0000	7933817,0000	Souza (2009)
P13B	796030,1900	7933986,0000	Souza (2009)
P13C	795907,4206	7933912,3536	Fundo das Universidades (2006)
P14	794111,0000	7937368,0000	Oliveira (2004)
P15	794132,0000	7938039,0000	Oliveira (2004)
P16A	794467,4668	7935484,7547	Oliveira (2004)
P16B	794493,3997	7935341,9147	Fundo das Universidades (2006)
P16C	794540,5471	7935390,9284	Souza (2009)
P16D	794507,4200	7935430,1000	Souza (2009)
P17	798316,0000	7932658,0000	Souza (2009)
P18A	796476,2480	7934609,5759	Souza (2009)
P18B	796528,7740	7934612,8114	Fundo das Universidades (2006)
P18C	796374,2500	7935588,7000	Fundo das Universidades (2006)
P18D	796495,2963	7934633,7344	Souza (2009)
P19	798141,3884	7934124,9740	Fundo das Universidades (2006)
P20	794927,8010	7936972,8143	Fundo das Universidades (2006)
P21	793595,0000	7937776,0000	Fundo das Universidades (2006)
P22	794089,4800	7933933,2700	Fundo das Universidades (2006)
P23A	795339,3800	7935808,1400	Fundo das Universidades (2006)
P23B	795370,7300	7935940,4774	Fundo das Universidades (2006)

P23C	795325,7900	7935916,6700	Souza (2009)
P23D	795169,9500	7935808,8400	Souza (2009)
P24	796927,3500	7933676,0700	Fundo das Universidades (2006)
P25A	795592,0891	7937452,3176	Fundo das Universidades (2006)
P25B	795508,7983	7937453,6197	Fundo das Universidades (2006)
P25C	795668,7400	7937560,8400	Souza (2009)
P26	794233,4698	7937406,4299	Souza (2009)
P27	796964,5704	7934360,8892	Oliveira (2004)
P28	795551,9100	7933642,8700	Souza (2009)
P29	794120,9600	7936597,2109	Souza (2009)
P30	796783,7647	7933579,0800	Souza (2009)
P31	797399,2426	7937157,4433	Souza (2009)
P32	794614,0000	7937386,0000	Souza (2009)
P33	795345,0000	7937878,0000	Souza (2009)
P34	795907,0000	7934140,0000	Souza (2009)
P35	793720,0000	7934624,0000	Souza (2009)
P36	798126,4624	7936579,6080	Souza (2009)
P37	796617,6400	7935243,0376	Souza (2009)
P38	796299,1900	7936000,0000	Souza (2009)
P39	794949,5000	7936916,1183	Souza (2009)
P40	797146,1400	7937628,3500	Souza (2009)
P41	793597,8000	7937681,7000	Souza (2009)
P42	797669,4380	7935470,4049	Souza (2009)
P43A	792280,7331	7938149,3663	Fundo das Universidades (2006)
P43B	792462,2743	7938146,5598	Fundo das Universidades (2006)
P44	799803,0982	7936426,2227	Fundo das Universidades (2006)
P45	797999,2784	7933990,2157	Fundo das Universidades (2006)
P46	796511,7330	7937419,3718	Souza (2009)
P47	789701,7173	7932672,4668	Souza (2009)

4.3 LEVANTAMENTO DAS COTAS DO TERRENO, DO TOPO DA FORMAÇÃO SERRA GERAL E DOS NÍVEIS ESTÁTICO/DINÂMICO DOS POÇOS

As cotas da superfície do terreno, na região dos poços de monitoramento, foram tomadas a partir do mapa de curvas de nível da cidade de Araguari. Este mapa, fornecido pela SAE, consta de curvas de nível espaçadas de 1,0 m, de toda a cidade de Araguari. A Tabela 8 apresenta as cotas do terreno, obtidas a partir de diversas fontes, na posição dos poços monitorados, em 49 poços.

Tabela 8 – Levantamento de cotas da superfície do terreno na posição dos poços

Ponto	EW (m)	SN (m)	Cota do Terreno (m)	Fonte
P3	798657,5674	7933226,7404	946,15	Fundo das Universidades (2006)
P6	794166,9845	7938854,7000	951,49	Fundo das Universidades (2006)
P11	796154,0000	7938562,0000	952,06	Fundo das Universidades (2006)
P12	796915,0000	7934770,0000	940,50	Mapa SAE (2009)
P13A	795912,0000	7933817,0000	940,90	Mapa SAE (2009)
P13B	796030,1900	7933986,0000	941,10	Mapa SAE (2009)
P13C	795907,4206	7933912,3536	950,83	Mapa SAE (2009)
P15	794132,0000	7938039,0000	950,50	Mapa SAE (2009)
P16A	794467,4668	7935484,7547	949,39	Fundo das Universidades (2006)
P16B	794493,3997	7935341,9147	949,39	Fundo das Universidades (2006)
P16C	794540,5471	7935390,9284	948,80	Mapa SAE (2009)
P16D	794507,4200	7935430,1000	945,50	Mapa SAE (2009)
P17	798316,0000	7932658,0000	947,09	Fundo das Universidades (2006)
P18A	796476,2480	7934609,5759	940,50	Mapa SAE (2009)
P18B	796528,7740	7934612,8114	947,20	Fundo das Universidades (2006)
P18D	796495,2963	7934633,7344	940,50	Mapa SAE (2009)
P19	798141,3884	7934124,9740	932,50	Mapa SAE (2009)
P20	794927,8010	7936972,8143	953,74	Fundo das Universidades (2006)
P21	793595,0000	7937776,0000	953,21	Fundo das Universidades (2006)
P22	794089,4800	7933933,2700	942,45	Fundo das Universidades (2006)
P23A	795339,3800	7935808,1400	945,10	Fundo das Universidades (2006)
P23B	795370,7300	7935940,4774	949,51	Fundo das Universidades (2006)
P23C	795325,7900	7935916,6700	942,50	Mapa SAE (2009)
P23D	795169,9500	7935808,8400	943,50	Mapa SAE (2009)
P24	796927,3500	7933676,0700	950,02	Fundo das Universidades (2006)
P25A	795592,0891	7937452,3176	951,03	Fundo das Universidades (2006)
P25B	795508,7983	7937453,6197	952,43	Fundo das Universidades (2006)
P25C	795668,7400	7937560,8400	946,30	Mapa SAE (2009)
P26	794233,4698	7937406,4299	956,03	Fundo das Universidades (2006)
P28	795551,9100	7933642,8700	939,34	Fundo das Universidades (2006)
P29	794120,9600	7936597,2109	952,50	Mapa SAE (2009)
P30	796783,7647	7933579,0800	942,40	Mapa SAE (2009)
P31	797399,2426	7937157,4433	944,20	Mapa SAE (2009)
P32	794614,0000	7937386,0000	950,50	Mapa SAE (2009)
P33	795345,0000	7937878,0000	943,80	Mapa SAE (2009)
P34	795907,0000	7934140,0000	940,90	Mapa SAE (2009)
P35	793720,0000	7934624,0000	941,50	Mapa SAE (2009)
P36	798126,4624	7936579,6080	938,50	Mapa SAE (2009)
P37	796617,6400	7935243,0376	934,50	Mapa SAE (2009)
P38	796299,1900	7936000,0000	908,00	Mapa SAE (2009)

P39	794949,5000	7936916,1183	949,50	Mapa SAE (2009)
P40	797146,1400	7937628,3500	945,20	Mapa SAE (2009)
P41	793597,8000	7937681,7000	951,00	Mapa SAE (2009)
P42	797669,4380	7935470,4049	902,00	Mapa SAE (2009)
P43A	792280,7331	7938149,3663	950,87	Fundo das Universidades (2006)
P43B	792462,2743	7938146,5598	949,69	Fundo das Universidades (2006)
P44	799803,0982	7936426,2227	927,74	Fundo das Universidades (2006)
P45	797999,2784	7933990,2157	952,34	Fundo das Universidades (2006)
P46	796511,7330	7937419,3718	946,80	Mapa SAE (2009)

Foram coletados, também dos trabalhos científicos encontrados na literatura, as cotas do topo do basalto, do nível dinâmico e estático de alguns poços. A Tabela 9 apresenta as cotas do topo da formação Serra Geral, que corresponde à base do Aquífero Bauru, obtidas em 21 pontos.

Tabela 9 – Cota do topo do basalto na posição dos poços, em 21 pontos.

Ponto	EW (m)	SN (m)	Cota do topo do basalto (m)
P11	796154,0000	7938562,0000	895,06
P13A	795912,0000	7933817,0000	898,54
P13C	795907,4206	7933912,3536	891,83
P16A	794467,4668	7935484,7547	893,39
P16B	794493,3997	7935341,9147	893,39
P17	798316,0000	7932658,0000	887,09
P18B	796528,7740	7934612,8114	899,20
P19	798141,3884	7934124,9740	886,06
P20	794927,8010	7936972,8143	890,74
P21	793595,0000	7937776,0000	898,21
P22	794089,4800	7933933,2700	877,45
P23A	795339,3800	7935808,1400	886,10
P23B	795370,7300	7935940,4774	898,51
P24	796927,3500	7933676,0700	890,02
P25A	795592,0891	7937452,3176	897,27
P25B	795508,7983	7937453,6197	898,43
P26	794233,4698	7937406,4299	896,03
P28	795551,9100	7933642,8700	899,20
P43A	792280,7331	7938149,3663	890,87
P43B	792462,2743	7938146,5598	898,69
P44	799803,0982	7936426,2227	887,74

Fonte: Fundo das Universidades (2006).

O sistema Bauru possui uma profundidade média do nível estático de 16 m, o que implica numa espessura média saturada de aproximadamente 40m. Já a profundidade média do nível dinâmico é de 41 m (VELÁSQUEZ e ROMANO, 2004). As Tabelas 10 e 11 apresentam as cotas de nível dinâmico em 18 pontos e estático em 37 pontos, respectivamente.

Tabela 10 – Cota do nível dinâmico na posição dos poços, em 18 pontos.

Ponto	EW (m)	SN (m)	cota do ND (m)
P6	794166,9845	7938854,7000	936,83
P11	796154,0000	7938562,0000	915,96
P12	796915,0000	7934770,0000	905,30
P16C	794540,5471	7935390,9284	909,38
P16D	794507,4200	7935430,1000	898,29
P17	798316,0000	7932658,0000	907,16
P20	794927,8010	7936972,8143	914,24
P25A	795592,0891	7937452,3176	909,49
P25C	795668,7400	7937560,8400	907,00
P31	797399,2426	7937157,4433	923,01
P35	793720,0000	7934624,0000	914,23
P36	798126,4624	7936579,6080	902,00
P37	796617,6400	7935243,0376	914,58
P38	796299,1900	7936000,0000	905,90
P39	794949,5000	7936916,1183	919,04
P40	797146,1400	7937628,3500	922,57
P41	793597,8000	7937681,7000	908,80
P46	796511,7330	7937419,3718	923,04

Tabela 11 – Cota do nível estático medido na posição dos poços, em 37 pontos.

Ponto	EW (m)	SN (m)	Cota do NE (m)
P3	798657,5674	7933226,7404	914,15
P6	794166,9845	7938854,7000	944,49
P11	796154,0000	7938562,0000	937,06
P13A	795912,0000	7933817,0000	915,78
P13B	796030,1900	7933986,0000	916,72
P13C	795907,4206	7933912,3536	920,35
P15	794132,0000	7938039,0000	933,21
P16A	794467,4668	7935484,7547	927,39
P16B	794493,3997	7935341,9147	927,39
P17	798316,0000	7932658,0000	917,09

P18A	796476,2480	7934609,5759	926,92
P18B	796528,7740	7934612,8114	915,20
P18D	796495,2963	7934633,7344	901,42
P19	798141,3884	7934124,9740	914,06
P20	794927,8010	7936972,8143	938,74
P21	793595,0000	7937776,0000	935,21
P22	794089,4800	7933933,2700	910,45
P23A	795339,3800	7935808,1400	915,10
P23B	795370,7300	7935940,4774	919,51
P23C	795325,7900	7935916,6700	914,54
P23D	795169,9500	7935808,8400	909,68
P24	796927,3500	7933676,0700	920,02
P25A	795592,0891	7937452,3176	923,27
P25B	795508,7983	7937453,6197	924,43
P25C	795668,7400	7937560,8400	923,85
P26	794233,4698	7937406,4299	941,03
P28	795551,9100	7933642,8700	916,34
P29	794120,9600	7936597,2109	933,54
P30	796783,7647	7933579,0800	920,06
P32	794614,0000	7937386,0000	930,86
P33	795345,0000	7937878,0000	934,21
P34	795907,0000	7934140,0000	916,78
P42	797669,4380	7935470,4049	897,34
P43A	792280,7331	7938149,3663	944,87
P43B	792462,2743	7938146,5598	944,69
P44	799803,0982	7936426,2227	910,74
P45	797999,2784	7933990,2157	927,34

É conveniente citar que nem todos os poços da rede, ilustrada pela Figura 16, dispõem de todos os dados. Assim, para permitir uma visualização espacial mais esclarecedora, a Figura 17 ilustra os pontos nos quais foi obtido cada parâmetro.

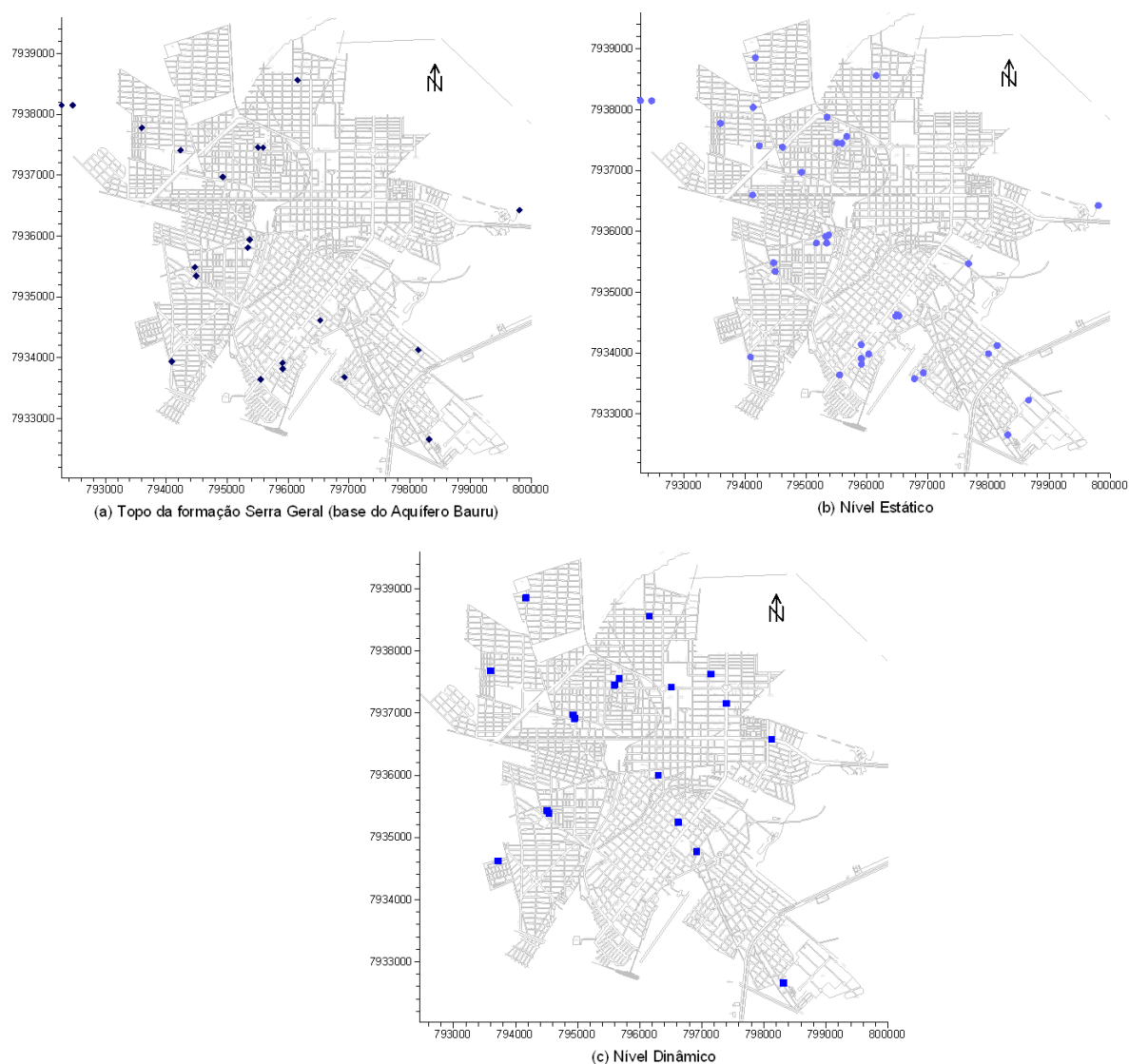


Figura 17 – Pontos nos quais foram obtidas as cotas de topo da formação Serra Geral (a), cotas do nível estático (b) e dinâmico (c)

Para obtenção da superfície do lençol (superfície piezométrica do Aquífero), foi necessário realizar uma filtragem dos dados originais (listados nas Tabelas 10 e 11), além da inserção de pontos nos talvegues principais da cidade, os quais correspondem a setores de drenagem lateral das águas do Aquífero. No caso da filtragem, em pontos onde se dispunha de dados de nível dinâmico e nível estático, optou-se por utilizar o nível dinâmico, pelo fato dele representar com mais verossimilhança a situação do lençol durante a operação dos poços. A Figura 18 ilustra a rede de pontos utilizados para a construção da superfície freática, via interpolação espacial.

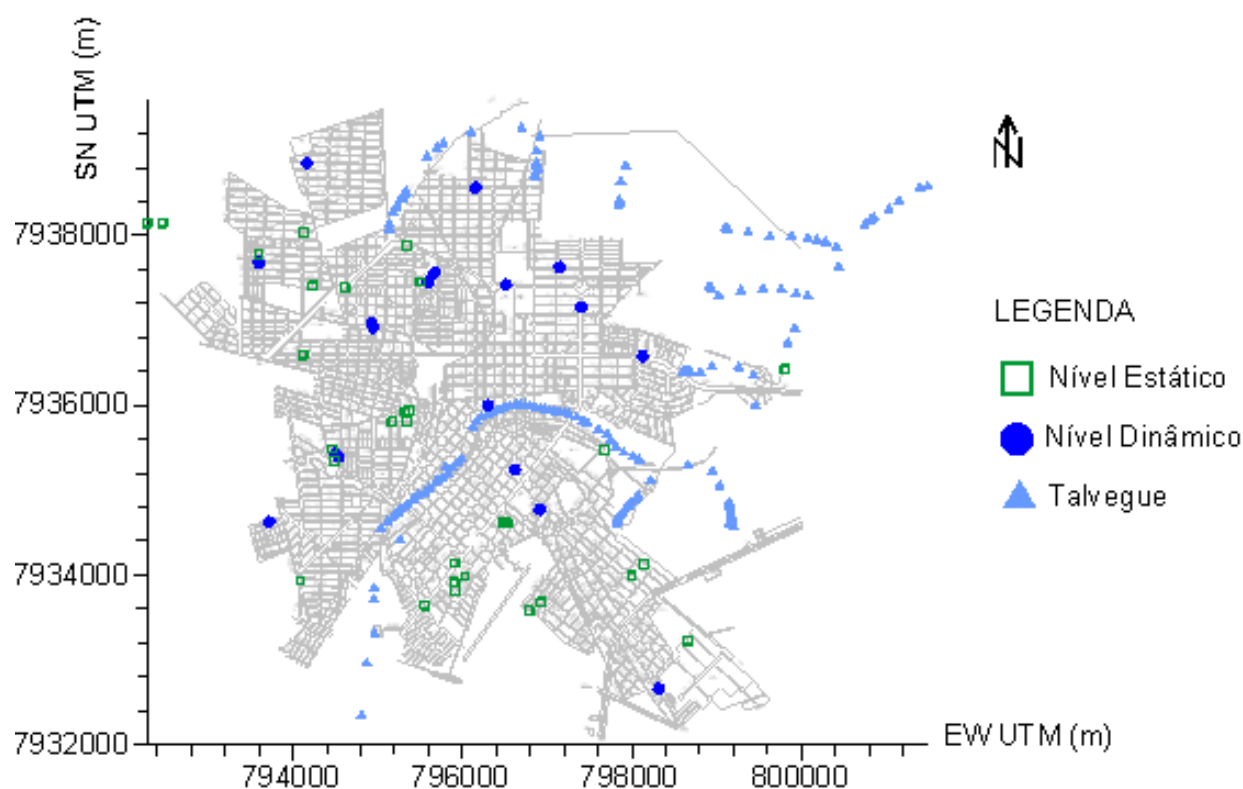


Figura 18 – Pontos utilizados para a construção da superfície do lençol

4.4 DADOS OPERACIONAIS

Os poços analisados apresentam vazão de operação média de 20 m³/h. Os poços que apresentam maior vazão são os que se localizam em setores de maior espessura saturada. Além disto, esses poços apresentam material litológico coerente com a vazão encontrada – areia fina a média, até silte, conferindo maior porosidade e condutividade hidráulica. Embora a concessionária de água local não disponha do perfil da maioria dos poços, principalmente daqueles mais antigos, perfis mais recentes têm sido arquivados e alguns deles são apresentados no Anexo A. Tal anexo propicia uma caracterização generalizada dos poços construídos na cidade. Nesse contexto, verifica-se que suas profundidades estão na ordem de 70 m. A Tabela 12 indica os poços utilizados pela SAE, com suas respectivas vazão de operação, situação operacional e vazões de outorga.

Tabela 12 – Poços utilizados pela SAE, com suas respectivas vazão de operação, situação operacional e vazões de outorga

DESIGNAÇÃO MAPA SAE	LOCALIZAÇÃO	WE UTM (M)	SN UTM (M)	SITUAÇÃO	VAZÃO DE OPERAÇÃO (m³/h)	VAZÃO OUTORGADA (m³/h)
PI1	Bateria de Independência	795665,0000	7937418,9800	ATIVADO	15,0000	15,0000
PI2	Bateria de Independência	795666,2400	7937483,6800	ATIVADO	13,0000	13,0000
PI3	Bateria de Independência	795596,0000	7937493,6400	ATIVADO	12,0000	12,0000
PI4	Bateria de Independência	795592,0891	7937452,3176	ATIVADO	18,0000	18,0000
PI5	Bateria de Independência	795508,7983	7937453,6197	ATIVADO	35,0000	35,0000
PI6	Bateria industrial SAE	795542,0111	7937551,5688	ATIVADO	28,0000	30,0000
PI6	Poço observação	795542,0111	7937551,5688	ATIVADO	28,0000	30,0000
PI7	Bateria de Independência	795598,0000	7937620,5600	ATIVADO	14,0000	15,0000
PI8	Bateria de Independência	795668,7400	7937560,8400	ATIVADO	15,0000	18,0000
PI9	Bateria de Independência	795676,0000	7937648,7700	ATIVADO	12,0000	15,0000
PI10	Bateria de Independência	795668,0000	7937717,6200	ATIVADO	35,0000	35,0000
PI11	Bateria de Independência	795668,7300	7937717,6000	ATIVADO	8,0000	15,0000
P27	Poço isolado São Sebastião do Campo	794043,5976	7937873,4034	ATIVADO	20,0000	18,0000
P15	Distrito industrial SAE	798657,5674	7933226,7404	ATIVADO	18,0000	NI
P5	Av Minas Gerais 2619	796212,2510	7934485,6219	ATIVADO	10,0000	8,0000
P3	Av Minas Gerais 1515 Agroara	796806,0000	7935281,0000	ATIVADO	16,0000	16,0000
P47	Av. Benedito Theodoro Naves Vieno	794166,9845	7938854,7000	ATIVADO	12,0000	NI
P17	R. Jornalista Libano Galant	795115,0000	7935358,0000	ATIVADO	15,0000	NI
PH01	Bateria Cachoeirinha	793855,0000	7935946,0000	ATIVADO	22,0000	NI
PH02	Bateria Cachoeirinha	793796,7015	7935984,1705	ATIVADO	12,0000	NI
PH03	Bateria Cachoeirinha	793807,0000	7936018,0000	ATIVADO	28,0000	NI

PH04	Bateria Cachoeirinha	793791,0000	7935959,0000	ATIVADO	28,0000	NI
P8	Contingente	796162,0000	7934026,0000	ATIVADO	10,0000	NI
P51	Industrial	798732,8200	7933042,7996	ATIVADO	22,0000	NI
P24	Panorama (rua Walter Santiago 920)	796154,0000	7938562,0000	ATIVADO	22,0000	15,0000
P11	Jardim Regina (Pç Padre Eloi)	796915,0000	7934770,0000	ATIVADO	12,0000	10,0000
PSB05	Bateria São Benedito	795912,0000	7933817,0000	ATIVADO	12,0000	NI
PSB01	Bateria São Benedito	796030,1900	7933986,0000	DESATIVADO	28,0000	15,0000
PSB03	Bateria São Benedito	795907,4206	7933912,3536	DESATIVADO	18,0000	5,0000
PSB02	Bateria São Benedito	796088,6400	7933948,0600	DESATIVADO	18,0000	15,0000
PSB04	Bateria São Benedito	796008,5400	7933775,0700	DESATIVADO	30,0000	NI
PSB06	Bateria São Benedito	795889,9990	7933910,9900	ATIVADO	43,0000	NI
PSB07	Bateria São Benedito	796047,9600	7933928,7600	ATIVADO	25,0000	NI
PSB08	Bateria São Benedito	796050,2800	7933972,7800	ATIVADO	45,0000	NI
	Poço novo S. Sebastião av das Palmeiras	794132,0000	7938039,0000	PARADO	16,0000	20,0000
PC5	Bateria de Chamcia	794467,4668	7935484,7547	ATIVADO	25,0000	42,0000
PC3	Bateria de Chamcia	794493,3997	7935341,9147	ATIVADO	30,0000	45,0000
PC1	Bateria de Chamcia	794540,5471	7935390,9284	ATIVADO	16,0000	15,0000
PC2	Bateria de Chamcia	794558,3300	7935293,4000	ATIVADO	35,0000	35,0000
PC4	Bateria de Chamcia	794507,4200	7935430,1000	ATIVADO	16,0000	15,0000
PC6	Bateria de Chamcia	794446,6200	7935382,5200	ATIVADO	30,0000	45,0000
PC7	Bateria de Chamcia	794428,4000	7935452,5400	ATIVADO	30,0000	32,0000
P14	R Citacilio Pinto de Oliveira	798316,0000	7932658,0000	ATIVADO	16,0000	20,0000
PE01	Bateria Estadual	796480,5100	7934678,3500	PARADO	10,0000	7,0000
PE02	Bateria Estadual	796518,7600	7934705,3500	ATIVADO	10,0000	7,0000
PE03	Bateria Estadual	796537,6300	7934676,8200	ATIVADO	8,0000	NI
PE04	Bateria Estadual	796561,0900	7934643,7100	ATIVADO	10,0000	10,0000

PE05	Bateria Estadual	796537,1200	7934602,4400	DESATIVADO	0,0000	NI
PE06	Bateria Estadual	796516,7200	7934575,4300	ATIVADO	15,0000	5,0000
PE07	Bateria Estadual	796476,4300	7934609,5750	DESATIVADO	0,0000	NI
PE08	Bateria Estadual	796416,7600	7934658,9900	ATIVADO	10,0000	10,0000
PE09	Bateria Estadual	796428,0000	7934700,7700	ATIVADO	10,0000	8,0000
PE10	Bateria Estadual	796471,3300	7934509,7100	ATIVADO	15,0000	8,0000
PE11	Bateria Estadual	796374,2500	7935588,7000	ATIVADO	10,0000	15,0000
PE12	Bateria Estadual	796495,2963	7934633,7344	ATIVADO	18,0000	9,0000
P16	R José Belém Miguel 2990	798141,3884	7934124,9740	ATIVADO	11,0000	NI
P26	R das Araras	794927,8010	7936972,8143	ATIVADO	16,0000	NI
P32	R das Oitis com Angicos	793595,0000	7937776,0000	ATIVADO	32,0000	NI
P41	Av. Brasil- bairro Brasília	794089,4800	7933933,2700	ATIVADO	22,0000	NI
PF06	Bateria de Fátima	795339,3800	7935808,1400	ATIVADO	15,0000	NI
PF13	Bateria de Fátima	795370,7300	7935940,4774	ATIVADO	22,0000	18,0000
PF01	Bateria de Fátima	795325,7900	7935916,6700	DESATIVADO	0,0000	5,0000
PF02	Bateria de Fátima	795268,7700	7935869,7500	DESATIVADO	0,0000	5,0000
PF03	Bateria de Fátima	793583,7200	7935877,4500	ATIVADO	11,0000	5,0000
PF05	Bateria de Fátima	795282,0900	7935911,0600	DESATIVADO	0,0000	NI
PF07	Bateria de Fátima	795281,3900	7935816,5400	DESATIVADO	0,0000	7,0000
PF08	Bateria de Fátima	795448,9000	7935883,0600	DESATIVADO	0,0000	7,0000
PF09	Bateria de Fátima	795400,5400	7935807,4400	DESATIVADO	0,0000	10,0000
PF10	Bateria de Fátima	795427,8700	7935927,1700	ATIVADO	21,0000	10,0000
PF11	Bateria de Fátima	795472,0300	7935910,3600	ATIVADO	14,0000	18,0000
PF12	Bateria de Fátima	795482,5400	7935831,9400	DESATIVADO	0,0000	NI
PF14	Bateria de Fátima	795443,9000	7935969,8800	ATIVADO	18,0000	18,0000
PF16	Bateria de Fátima	795169,0000	7935887,2600	ATIVADO	15,0000	7,0000

PF17	Bateria de Fátima	795240,7400	7935808,8400	ATIVADO	15,0000	15,0000
PF18	Bateria de Fátima	795222,1100	7935850,8500	ATIVADO	12,0000	11,0000
PF19	Bateria de Fátima	795216,9000	7935901,9600	ATIVADO	12,0000	11,0000
PF15	Bateria de Fátima	795169,9500	7935808,8400	ATIVADO	12,0000	5,0000
PG01	Bateria de Gutierrez	796946,0000	7933763,9800	ATIVADO	14,0000	10,0000
PG02	Bateria de Gutierrez	796976,4500	7933740,7600	ATIVADO	18,0000	10,0000
PG03	Bateria de Gutierrez	796927,3500	7933676,0700	ATIVADO	15,0000	15,0000
PG04	Bateria de Gutierrez			ATIVADO	12,0000	5,0000
PG05	Bateria de Gutierrez			ATIVADO	12,0000	15,0000
PG06	Bateria de Gutierrez			ATIVADO	14,0000	10,0000
PG07	Bateria de Gutierrez			DESATIVADO	0,0000	NI
PS01	Bateria são Sebastião	794233,7300	7937463,2600	ATIVADO	28,0000	40,0000
PS02	Bateria são Sebastião	794137,3800	7937468,6850	ATIVADO	18,0000	60,0000
PS03	Bateria são Sebastião	794233,4698	7937406,4299	ATIVADO	18,0000	60,0000
PS04	Bateria são Sebastião	794111,0000	7937368,0000	ATIVADO	30,0000	50,0000
P45	Creche M. de Castro - Cerea	796964,5704	7934360,8892	ATIVADO	14,0000	10,0000
P6	Av. Minas Gerais 3535 - formigão	795551,9100	7933642,8700	ATIVADO	16,0000	8,0000
P25	R. Coronel Belchior	794120,9600	7936597,2109	DESATIVADO	0,0000	MONITORAM ENTO
P5	R. Goiás	796783,7647	7933579,0800	ATIVADO	10,0000	NI
P43	Poço Miranda Av. minas gerais	797399,2426	7937157,4433	ATIVADO	12,0000	NI
	Poço novo da passarela	794614,0000	7937386,0000	ATIVADO	16,0000	18,0000
	R. 21 Independência	795345,0000	7937878,0000	PARADO	20,0000	20,0000
	Poço novo da minas gerais	795907,0000	7934140,0000	PARADO	0,0000	18,0000
P34	Poço Madri	793720,0000	7934624,0000	ATIVADO	18,0000	20,0000
P46	Poço da Theodoretto	798126,4624	7936579,6080	ATIVADO	14,0000	NI
P18	Praça Getúlio Vargas	796617,6400	7935243,0376	ATIVADO	10,0000	NI

P19	Ginásio	796299,1900	7936000,0000	ATIVADO	5,0000	7,0000
P26	Araras	794949,5000	7936916,1183	ATIVADO	30,0000	NI
P22	R. Tupaciguara	797146,1400	7937628,3500	ATIVADO	30,0000	NI
P31	Poço da jaca	793597,8000	7937681,7000	ATIVADO	16,0000	NI
	Chácara Fernando	797669,4380	7935470,4049	ATIVADO	1,2000	2,0000
	Faz Cavalaro 1	792280,7331	7938149,3663	ATIVADO	80,0000	100,000 0
	Faz Cavalaro 2	792462,2743	7938146,5598	ATIVADO	100,0000	100,000 0
	Faz cachoeirinha	799803,0982	7936426,2227	ATIVADO	6,0000	6,0000
P21	Pç Benito Felice rodoviária	797999,2784	7933990,2157	ATIVADO	22,0000	22,0000
P23	Poço da exposição	796511,733	7937419,372	ATIVADO	35,0000	35,0000
PA-33	Poço Fazenda Flor Amanhecer	789701,7173	7932672,4668	ATIVADO	30,0000	NI
P30	Rua dos Tamborins com Oitis	793596,8500	7937591,6900	ATIVADO	30,0000	NI
P29	Oitis com Buritis	793593,3400	7937501,6800	ATIVADO	40,0000	NI
P33	Oitis com Perobas	793595,0000	7937868,0000	ATIVADO	40,0000	NI
P1	Bosque	797126,1561	7935425,9577	ATIVADO	6,0000	NI
P4	Av. Minas Gerais - Rivalino	796505,0000	7934863,0373	ATIVADO	12,0000	NI
P7	Av. Batalhão Mauá c/ Hortência	795960,5759	7933176,2866	ATIVADO	6,0000	NI
P9	Av. Santos Dumont c/ Pe Feijó	796276,3918	7934085,8032	ATIVADO	8,0000	NI
P12	Escola Eleonora	797394,0000	7933721,5200	ATIVADO	16,0000	NI
P13	Rua Coromandel	797498,0000	7933417,3700	ATIVADO	10,0000	NI
P18	Pç Getulio Vargas	796617,9533	7935243,0376	ATIVADO	15,0000	NI
P28	Rua das Perobas	793961,0000	7937878,0000	ATIVADO	8,0000	NI
P35	Rua Elias Peixoto - Paulo Nascimento	795701,0800	7934304,6700	ATIVADO	10,0000	10,0000
P36	Av. Batalhão Mauá - Cesac	795245,1900	7933924,9100	ATIVADO	6,0000	10,0000
P37	Pç Artur Bernardes - Pç Tereza F	796144,4246	7934665,7129	ATIVADO	15,0000	15,0000

	Lima					
P38	R Ituiutaba c/ Minas Gerais - Conj Ouro Verde	797356,6807	7937757,6900	ATIVADO	16,0000	NI
P39	Rua 8 Conjunto Ouro Verde	797887,4900	7937631,3200	ATIVADO	22,0000	NI
P42	Creche Elias Peixoto B. Santa helena	795794,8663	7933954,8000	ATIVADO	15,0000	NI
P44	Av Porto Alegre n 16	796859,0100	7933591,2700	ATIVADO	23,0000	NI
P48	Rua Coromandel	798123,4624	7936578,6080	ATIVADO	10,0000	NI
P49	Av Porto Alegre n 733	797192,7210	7933848,7700	ATIVADO	15,0000	NI
PP1	Bateria Paraiso	797910,2900	7936754,6500	ATIVADO	14,0000	20,0000
PP2	Bateria Paraiso	797945,4900	7936781,8800	ATIVADO	18,0000	20,0000

NI – Não Informado

4.5 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS DO AQUÍFERO

A determinação da distribuição espacial dos parâmetros hidrogeológicos do Aquífero Bauru constitui um dos principais dados para análise e formulação deste trabalho. Os parâmetros levantados, após a coleta de dados espaciais e dados operacionais dos poços analisados, foram, conforme já comentado, a condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e o rendimento específico (S_y).

Os dados relativos aos parâmetros hidrogeológicos foram levantados principalmente a partir dos trabalhos de Oliveira e Campos (2004), que realizaram ensaios de bombeamento de poços tubulares profundos. A técnica de ensaio de bombeamento consiste em acompanhar, por meio de medidas seqüenciais, a vazão e o rebaixamento do nível da água no interior de um poço, num determinado tempo. Oliveira e Campos (2004) optaram pelo ensaio de bombeamento de 24 horas, com vazão constante em alguns poços e vazão escalonada em outros, localizados na área urbana de Araguari. Nesses testes, os referidos autores relacionaram os valores de condutividade hidráulica e transmissividade do aquífero.

Velásquez e Romano (2004), para obtenção dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero Bauru, realizaram quatro testes de aquífero. Para interpretação dos dados, a referida autora baseou-se no método de recuperação de Theis (1935), adaptado para aquíferos livres e semi-confinados. Este método é indicado para testes de aquífero em poço único, no qual os dados de recuperação são medidos no próprio poço de bombeamento e relacionados com o tempo. Com os resultados, os referidos autores relacionaram os dados de condutividade hidráulica, transmissividade e rendimento específico. A Figura 19 ilustra a distribuição espacial dos pontos onde foram obtidos valores primários desses parâmetros.

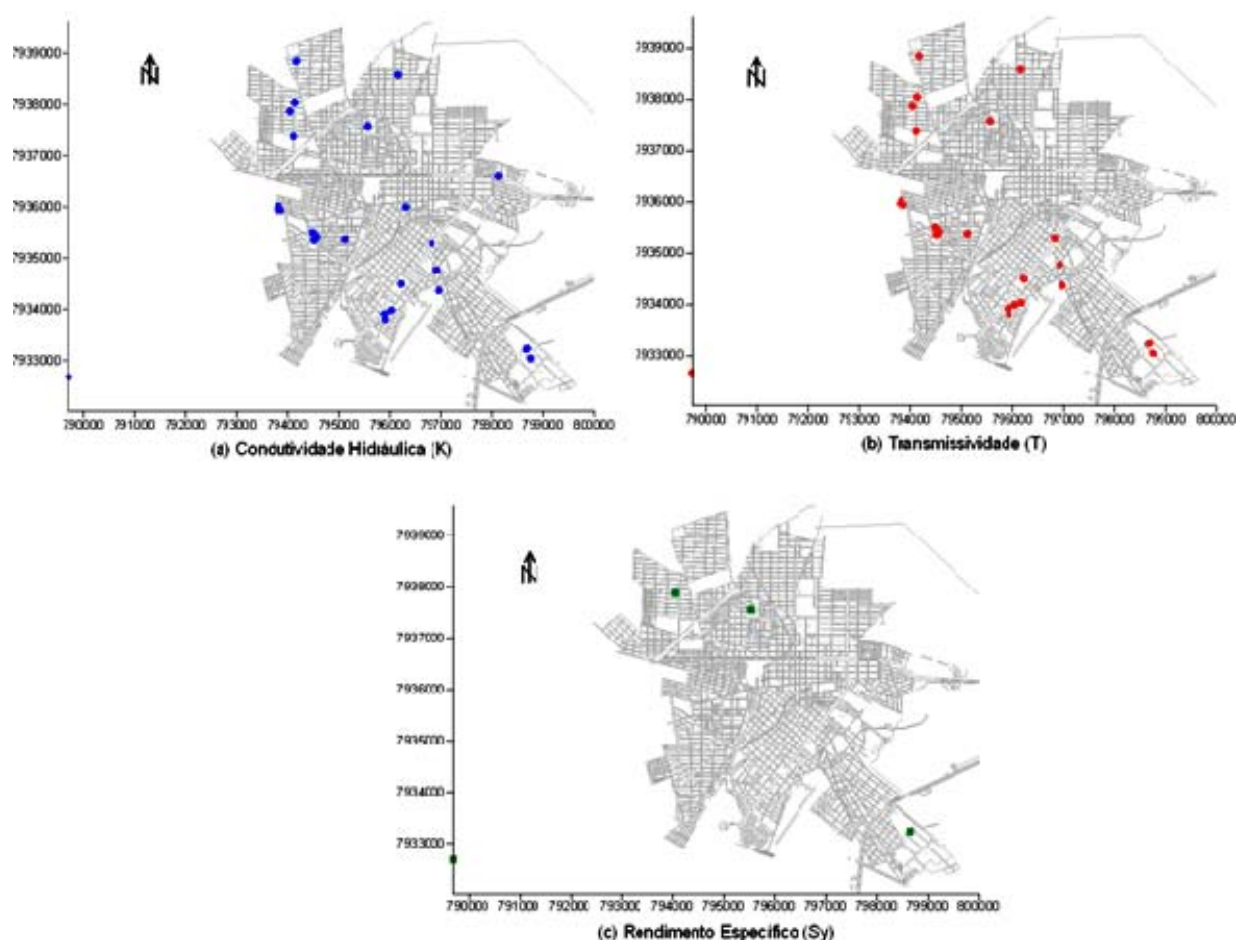


Figura 19 – Pontos nos quais foram estimados os valores primários de condutividade hidráulica (a), transmissividade (b) e rendimento específico (c)

4.5.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)

Oliveira e Campos (2004) apresentaram a variação granulométrica do solo ao longo do perfil vertical. Em superfície e nas porções rasas, a maior atividade orgânica e estruturação resultam em uma textura média e condutividade hidráulica entre 10^{-4} e 10^{-6} cm/s. Abaixo do horizonte superficial, a até 15 m de profundidade, há incremento no teor de argila no solo, resultando na diminuição dos valores de condutividade hidráulica que ficaram na ordem de 10^{-6} e 10^{-7} m/s. Abaixo de 15 m de profundidade, prevalecem os solos areno-siltosos, dominados por areia fina, textura média e condutividade hidráulica em torno de 10^{-6} m/s. A porosidade efetiva média nos latossolos foi de 12%. Devido às suas condições de porosidade e de condutividade hidráulica, os latossolos assumem importante papel na recarga dos aquíferos poroso e fraturado (OLIVEIRA e CAMPOS, 2004). A tabela 13 representa os valores de condutividade hidráulica pontuais.

Tabela 13 – Condutividade hidráulica obtida em pontos específicos do Aquífero Bauru, em 28 poços.

Ponto	EW (m)	SN (m)	K (m/h)	Fonte
P1	795542,0111	7937551,5688	0,0022	Velásquez (2004)
P1a	795542,0111	7937551,5688	0,0016	Velásquez (2004)
P2	794043,5976	7937873,4034	0,0016	Velásquez (2004)
P3	798657,5674	7933226,7404	0,0029	Velásquez (2004)
P4	796212,2510	7934485,6219	0,0180	Oliveira (2004)
P5	796806,0000	7935281,0000	0,0245	Oliveira (2004)
P6	794166,9845	7938854,7000	0,0360	Oliveira (2004)
P7	795115,0000	7935358,0000	0,3600	Oliveira (2004)
P8A	793855,0000	7935946,0000	0,0468	Oliveira (2004)
P8B	793796,7015	7935984,1705	0,0576	Oliveira (2004)
P8C	793807,0000	7936018,0000	0,0432	Oliveira (2004)
P8D	793791,0000	7935959,0000	0,0504	Oliveira (2004)
P10	798732,8200	7933042,7996	0,0320	Oliveira (2004)
P11	796154,0000	7938562,0000	0,3204	Oliveira (2004)
P12	796915,0000	7934770,0000	0,0432	Oliveira (2004)
P13A	795912,0000	7933817,0000	0,0212	Oliveira (2004)
P13B	796030,1900	7933986,0000	0,0212	Oliveira (2004)
P13C	795907,4206	7933912,3536	0,0212	Oliveira (2004)
P14	794111,0000	7937368,0000	0,0540	Oliveira (2004)
P15	794132,0000	7938039,0000	0,0648	Oliveira (2004)
P16A	794467,4668	7935484,7547	0,0396	Oliveira (2004)
P16B	794493,3997	7935341,9147	0,0396	Oliveira (2004)
P16C	794540,5471	7935390,9284	0,4442	Oliveira (2004)
P16D	794507,4200	7935430,1000	0,4442	Oliveira (2004)
P27	796964,5704	7934360,8892	0,0324	Oliveira (2004)
P36	798126,4624	7936579,6080	0,0666	Oliveira (2004)
P38	796299,1900	7936000,0000	0,6173	Oliveira (2004)
P47	789701,7173	7932672,4668	0,003	Velásquez (2004)

4.5.2 TRANSMISSIVIDADE (*T*)

Velásquez e Romano (2004) determinaram que a transmissividade média do Aquífero, no município, é de 76,35 m²/dia. A Tabela 14 relaciona os dados de transmissividade do Aquífero extraídos dos testes de bombeamento realizados nos poços.

Tabela 14 – Dados de transmissividade dos 27 poços analisados.

Ponto	EW (m)	SN (m)	T (m ² /h)	Fonte
P1	795542,0111	7937551,5688	1,7579	Velásquez (2004)
P1a	795542,0111	7937551,5688	1,3042	Velásquez (2004)
P2	794043,5976	7937873,4034	1,2933	Velásquez (2004)
P3	798657,5674	7933226,7404	4,6042	Velásquez (2004)
P4	796212,2510	7934485,6219	0,5760	Oliveira (2004)
P5	796806,0000	7935281,0000	1,0800	Oliveira (2004)
P6	794166,9845	7938854,7000	1,4040	Oliveira (2004)
P7	795115,0000	7935358,0000	12,6000	Oliveira (2004)
P8A	793855,0000	7935946,0000	1,9080	Oliveira (2004)
P8B	793796,7015	7935984,1705	1,9440	Oliveira (2004)
P8C	793807,0000	7936018,0000	1,7640	Oliveira (2004)
P8D	793791,0000	7935959,0000	1,9800	Oliveira (2004)
P9	796162,0000	7934026,0000	11,1600	Oliveira (2004)
P10	798732,8200	7933042,7996	1,4040	Oliveira (2004)
P11	796154,0000	7938562,0000	12,6000	Oliveira (2004)
P12	796915,0000	7934770,0000	1,3320	Oliveira (2004)
P13A	795912,0000	7933817,0000	0,7560	Oliveira (2004)
P13B	796030,1900	7933986,0000	0,7560	Oliveira (2004)
P13C	795907,4206	7933912,3536	0,7560	Oliveira (2004)
P14	794111,0000	7937368,0000	2,2320	Oliveira (2004)
P15	794132,0000	7938039,0000	3,4200	Oliveira (2004)
P16A	794467,4668	7935484,7547	1,3680	Oliveira (2004)
P16B	794493,3997	7935341,9147	1,3680	Oliveira (2004)
P16C	794540,5471	7935390,9284	1,3680	Oliveira (2004)
P16D	794507,4200	7935430,1000	1,3680	Oliveira (2004)
P27	796964,5704	7934360,8892	1,1520	Oliveira (2004)
P47	789701,7173	7932672,4668	5,2854	Velásquez (2004)

Os maiores valores de transmissividade são explicados pela maior espessura saturada do aquífero, haja vista que a transmissividade pode ser calculada como o produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada, de acordo com a equação (3). Assim, estabelece-se uma relação entre os parâmetros T e b , permitindo conhecer a espessura saturada do aquífero (b) em pontos onde K e T foram previamente estimados.

4.5.3 RENDIMENTO ESPECÍFICO (S_v)

Conforme já foi definido no capítulo 2, o rendimento específico de um aquífero livre equivale ao valor de sua porosidade efetiva. Em relação a este parâmetro, Velásquez e Romano (2004), através do método de recuperação de Theis estimaram um valor médio de 0,12, coerente com a porosidade efetiva dos termos litológicos gerais que constituem o aquífero – areia fina a média até silte. A tabela 15 sintetiza os dados de coeficiente de armazenamento, bem como as coordenadas dos pontos (poços) onde foram realizados os testes para sua obtenção.

Tabela 15 – Rendimento específico do Aquífero Bauru, coletados em 4 pontos na malha urbana de Araguari.

Ponto	EW (m)	SN (m)	S_v
P1	795542,0111	7937551,5688	0,1200
P1a	795542,0111	7937551,5688	0,1200
P2	794043,5976	7937873,4034	0,1500
P3	798657,5674	7933226,7404	0,1500
P47	789701,7173	7932672,4668	0,15

Fonte: Velásquez (2004)

4.6 CONSTRUÇÃO DE MAPAS DOS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS E DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO AQUÍFERO

Para confecção dos mapas dos parâmetros hidrogeológicos e das características geométricas do Aquífero Bauru (curvas de contorno ou iso-linhas), os dados primários foram interpolados no espaço. Os métodos de interpolação permitem estimar valores de uma variável em pontos onde esses valores não são previamente conhecidos. Dessa forma, é possível estabelecer uma malha de pontos regularmente espaçados, cujos valores interpolados possibilitam, além da construção de modelos digitais, a aplicação de procedimentos numéricos de simulações. Em termos de interpolação espacial, há uma grande variedade de procedimentos matemáticos, destacando-se entre eles o método de *Kriging*.

O método de *Kriging* assume que os dados amostrais de uma determinada variável ou parâmetro, genericamente escritos como ϕ , encontram-se espacialmente correlacionados. Apesar disso, à medida que a distância entre eles aumenta, as correlações vão ficando mais fracas. Em outras palavras, parte-se do princípio de que pontos interpolados, próximos de pontos amostrais, tendem a ter valores mais próximos da realidade. No caso deste trabalho, os pontos amostrais constituem aqueles em que foram obtidos os dados primários descritos nos itens anteriores. Tal método é um interpolador estocástico linear, baseado na taxa de alteração da variância dos pontos observados ao longo do espaço. Assim, os valores interpolados de uma variável (ϕ), em uma posição qualquer ($\hat{X}$), são calculados por combinações lineares ponderadas dos dados amostrais, segundo a equação (4):

$$\hat{\phi}(\hat{X}) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \phi(\hat{X}_i) \quad \text{equação (4)}$$

Na equação (4), $\hat{\phi}$ representa a variável interpolada na posição UTM $\hat{X} = (x_{WE}, y_{SN})$, a_i representam os pesos atribuídos a cada uma das amostras “i”, as quais são previamente conhecidas nos pontos de amostragem $\hat{X}_i = (x_{iWE}, y_{iSN})$. Ainda na referida equação, N representa o número de dados primários utilizados na interpolação. Os pesos a_i decrescem em relação ao aumento da distância entre os pontos $\hat{X}$ e $\hat{X}_i$. Para introduzir a correlação espacial com estas características, o método de *Kriging* calcula os valores dos pesos com uso de uma função objetivo que minimiza a variância σ_i^2 estimada, ou seja:

$$\sigma_i^2 = \min \{ \sigma^2 [\phi(\hat{X}) - \hat{\phi}(\hat{X})] \} \quad \text{equação (5)}$$

A minimização da variância atua como um atributo importante deste método de interpolação. Isto ocorre porque os erros nas estimativas apresentam uma variância mínima. Uma outra vantagem do método de *Kriging* é que o procedimento ajuda a compensar o efeito amostras muito próximas (*clusters* de pontos), através da atribuição de pesos menores para esses pontos em relação aos pesos de pontos mais isolados. Assim, os *clusters* de pontos são tratados, aproximadamente, como um ponto isolado. Ainda no caso da preparação de dados para simulação com malhas estruturadas regulares, como em diferenças finitas, por exemplo, a interpolação exige a criação de uma malha uniforme de

valores interpolados, os quais podem ser armazenados em matrizes e lidos como dados de entrada do programa de simulação. A Figura 20 ilustra, de maneira esquemática, os procedimentos de armazenamento dos valores na malha de interpolação e de geração dos mapas de contorno.

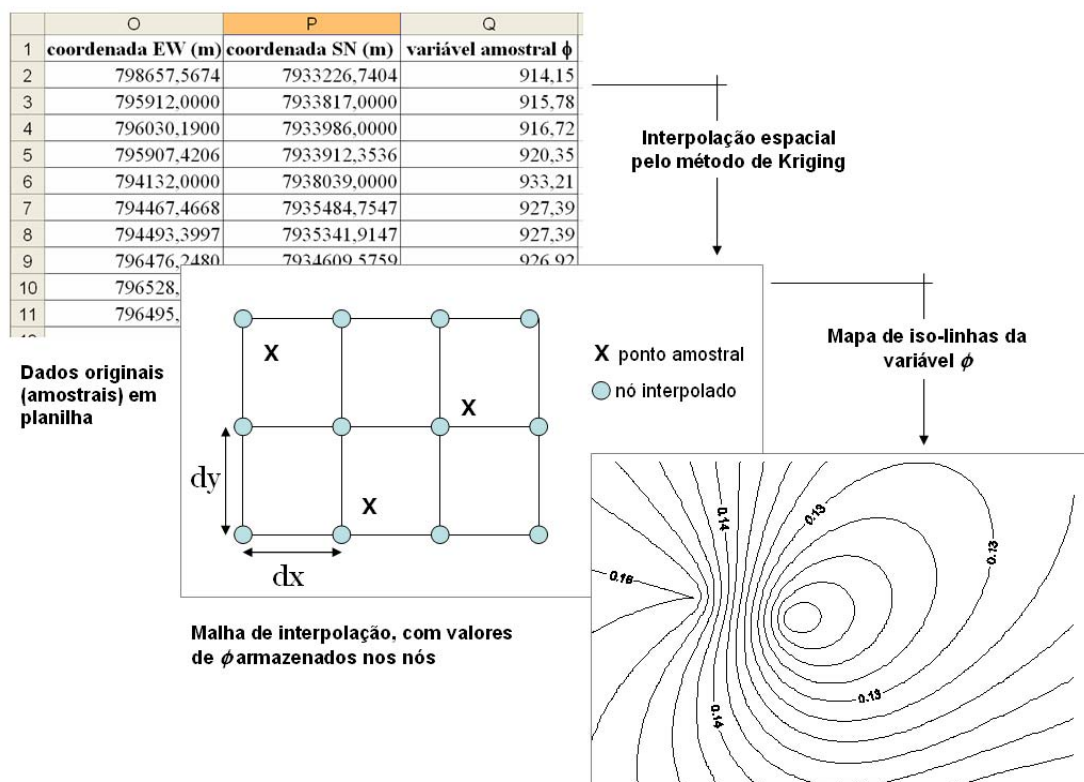


Figura 20 – Procedimento esquemático de geração dos mapas de contorno e de armazenamento de valores na malha de interpolação pelo método de *Kriging*.

4.7 CÁLCULOS DE SEÇÕES

Uma das etapas importantes da presente pesquisa consistiu na criação de um programa computacional, implementado em linguagem *Visual Basic Aplicada* ao Excel, que permite o cálculo de seções diversas, sejam elas transversais, longitudinais, ou genéricas, seguindo uma trajetória curvilínea qualquer. Os resultados dessa aplicação permitem visualizar a sobreposição da superfície do terreno, da superfície freática e da base do aquífero, todas elas ao longo de um corte vertical. A Figura 21 ilustra o esquema de seções que podem ser realizadas pelo programa.

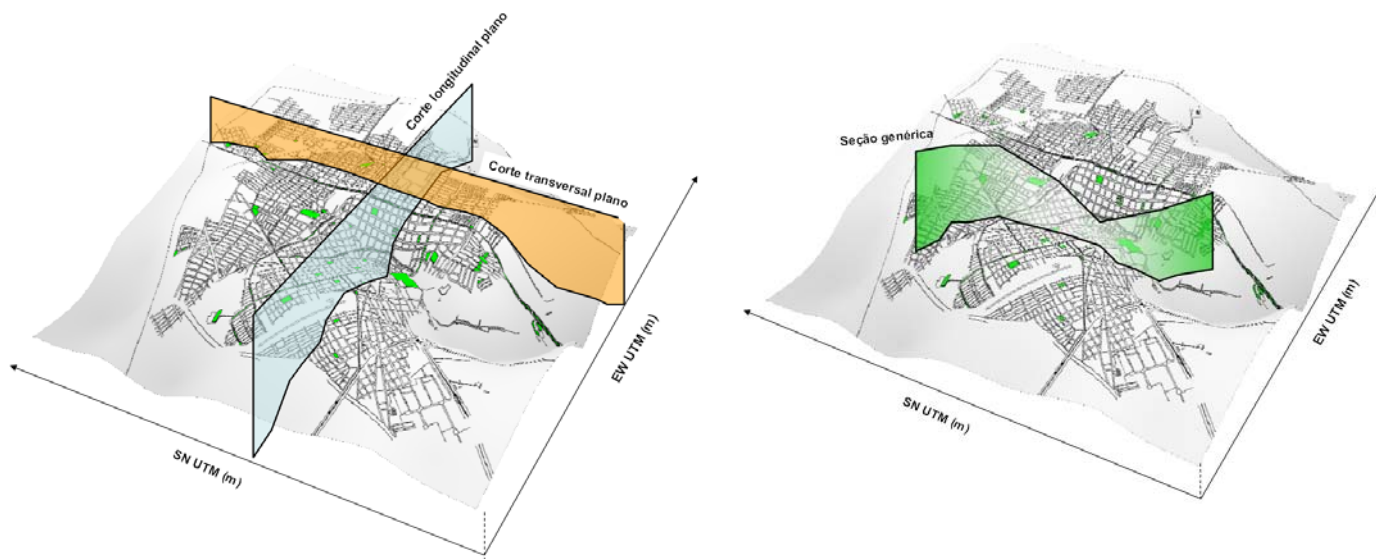


Figura 21 – Esquema de seções transversais, longitudinais e curvilíneas genéricas, passíveis de serem realizadas pelo programa

As malhas de interpolações, com dados armazenados na forma de matriz, constituem as bases para o cálculo das seções. Nesse caso, há a necessidade de cinco matrizes que contêm:

- dados de cota do terreno $NT(i, j)$;
- cota da superfície freática $NL(i, j)$;
- cota de topo dos basaltos da formação Serra Geral $NB(i, j)$;
- coordenada WE dos pontos nodais $x(i, j)$;
- coordenada SN dos pontos nodais $y(i, j)$.

A posição das seções é delimitada pelo usuário na própria planilha Excel, a partir da atribuição de valores como coordenada EW (para corte transversal), coordenada SN (para corte longitudinal) e um conjunto de pontos com coordenadas EW e SN (para seções genéricas). Neste último caso, a seção é delineada por um conjunto de segmentos de reta que une cada um desses pontos.

Em termos de cálculo, o programa identifica entre quais pontos da malha está localizada a seção, fazendo uma interpolação linear entre os valores dos nós mais próximos (ver a Figura 22).

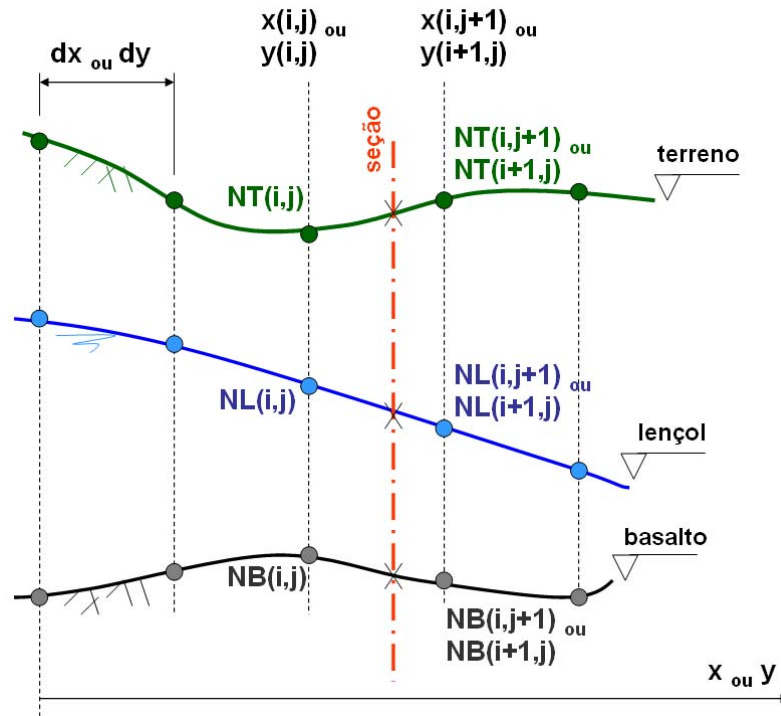


Figura 22 – Esquema dos pontos nodais intermediados pela seção

Assim, considerando o esquema da Figura 22 e uma variável genérica ϕ , que pode ser a cota do terreno (NT), a cota da superfície do lençol (NL) ou a cota de topo do basalto (NB), seu valor na posição do corte (x_{sec}, y_{sec}) pode ser calculado como:

$$\phi = \frac{x(i, j+1) - x(i, j)}{x_{sec} - x(i, j)} \cdot [\phi(i, j+1) - \phi(i, j)] + \phi(i, j) \quad \text{equação (6) – para corte transversal}$$

$$\phi = \frac{y(i, j+1) - y(i, j)}{y_{sec} - y(i, j)} \cdot [\phi(i+1, j) - \phi(i, j)] + \phi(i, j) \quad \text{equação (7) – para corte longitudinal}$$

No caso específico dos cortes genéricos, há a necessidade de identificar os vários segmentos de reta que compõem a seção curvilínea, além dos pontos da malha no qual a seção está entremeada. Nesses casos, identificam-se as coordenadas limites de cada segmento de reta (ver Figura 23) e faz-se a interpolação linear entre elas, utilizando os valores dos pontos nodais mais próximos, via equação (7).

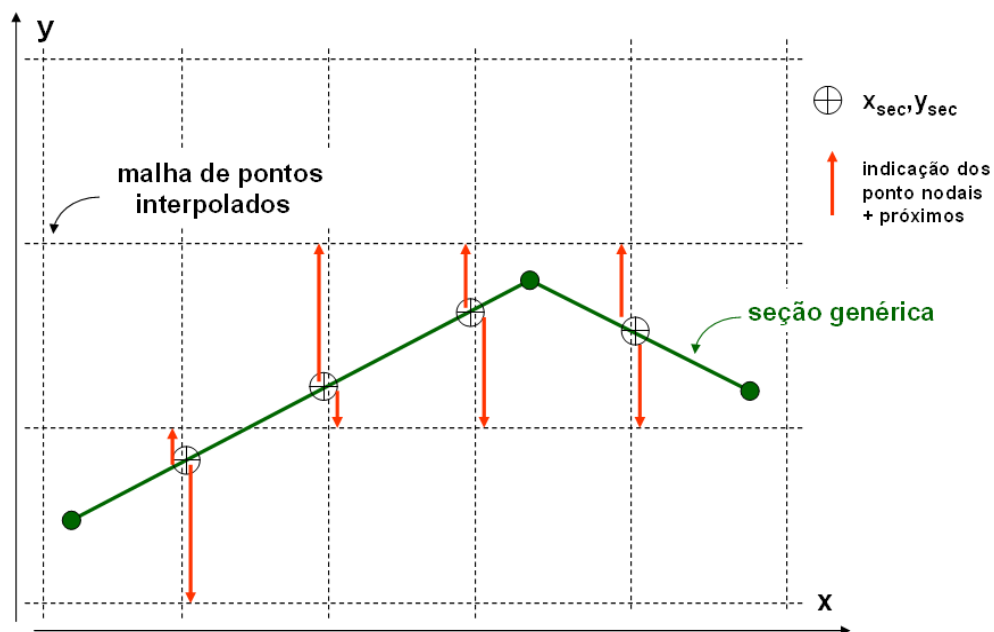


Figura 23 – Esquema auxiliar para cálculo de seções genéricas

Para finalizar este item, as Figuras 24 e 25 ilustram as planilhas principais do programa, com indicação das linhas de corte e das seções calculadas.

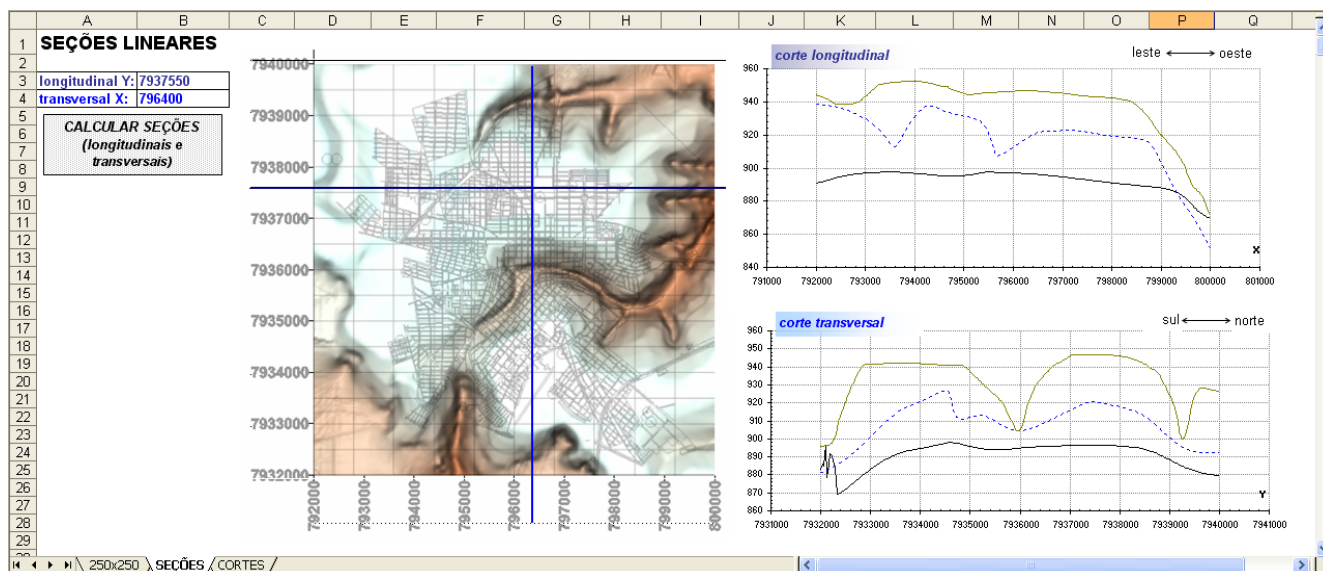


Figura 24 – Planilha para cálculo de seções transversais e longitudinais

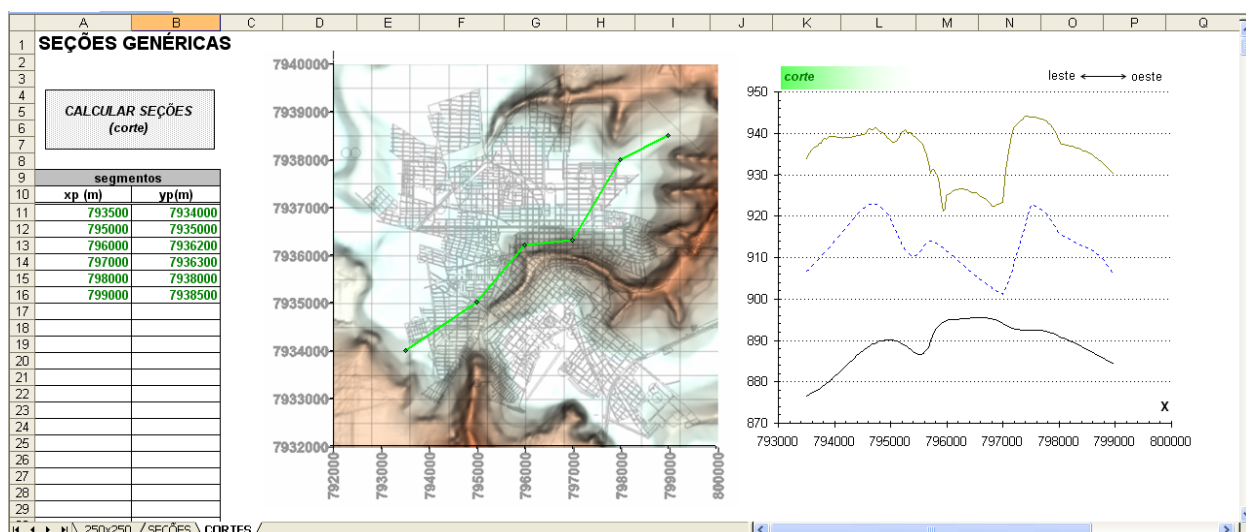


Figura 25 – Planilha para cálculo de seções genéricas, formadas pelo agrupamento de segmentos de reta

4.8 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NO AQUIFERO

Neste item será descrita a metodologia utilizada para a simulação do escoamento no Aquífero Bauru. Ainda que a elaboração do programa de simulação não faça parte do escopo deste trabalho, o qual utilizou basicamente a simulação, seus principais aspectos são destacados. O programa, desenvolvido em linguagem *Visual Basic Aplicada* ao Excel, utiliza uma metodologia híbrida de simulação, baseando-se na solução numérica, na maior parte do domínio, e na solução analítica para rebaixamentos, apenas na vizinhança dos poços tubulares. Os modelos numéricos lidam satisfatoriamente com a heterogeneidade e anisotropia dos aquíferos, permitindo o estudo em escala regional, mas, em geral, falham na adaptação de aspectos pontuais, como as penetrações dos poços e das suas seções filtrantes. Os modelos analíticos, embora sejam baseados nas hipóteses simplificadoras de aquífero infinito e homogêneo, propiciam razoável estimativa dos rebaixamentos próximos aos pontos de captação, ao passo que levam em conta as características geométricas dos poços. O modelo numérico é bidimensional, de forma que a equação diferencial governante baseia-se no balanço de massa aplicado na coluna vertical saturada (ver Figura 26).

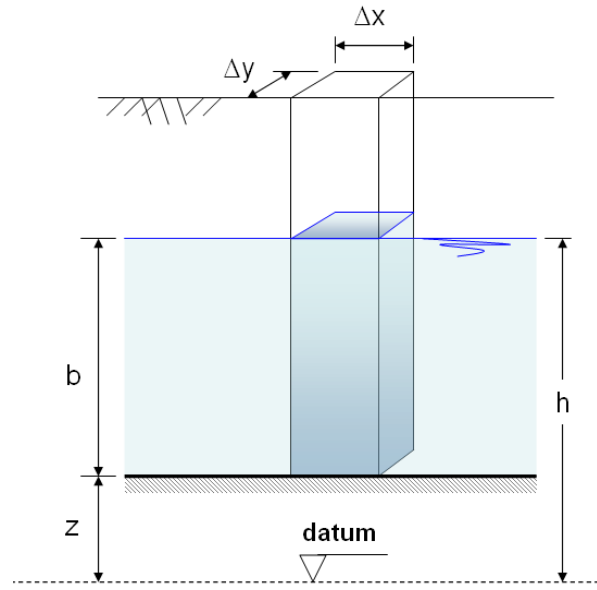


Figura 26 – Coluna vertical saturada e variáveis utilizadas pela equação diferencial que governa o escoamento no aquífero livre

A equação diferencial de escoamento bidimensional em aquífero livre é escrita como:

$$S_y \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(K \cdot b \cdot \nabla h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot b \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot b \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad \text{equação (8)}$$

Na equação (8), S_y é o rendimento do aquífero, h é a cota piezométrica (tomando como *datum* o nível médio dos mares) e K a condutividade hidráulica. A equação ainda permite trabalhar com aquíferos anisotrópicos, nos quais a condutividade hidráulica é diferente nas direções x e y (K_x e K_y). No caso deste trabalho, como não há disponibilidade de informações referentes à anisotropia do aquífero, o mesmo foi tratado como isotrópico. A espessura saturada (b) é calculada como a diferença entre a cota piezométrica local e a cota de topo do basalto.

A solução da equação (8) foi obtida pelo método de diferenças finitas. Nesses casos, a solução numérica fornece valores para um número pré-determinado e finito de pontos no interior do domínio, considerado a solução sobre N pontos nodais, serão resolvidas de N equações e determinadas N incógnitas. A aplicação do método de diferenças finitas na equação (8), visa a estimar o valor da cota piezométrica.

A área de estudo foi com uma malha uniforme de células retangulares, com dimensões Δx e Δy , e aplicando a solução analítica como condição de contorno interna para os nós situados dentro de um raio de influência (R_{inf}) de cada poço (Figura 27). Este procedimento alia a capacidade da solução numérica lidar com as variações espaciais dos parâmetros do aquífero, com a capacidade preditora da solução analítica na vizinhança dos poços.

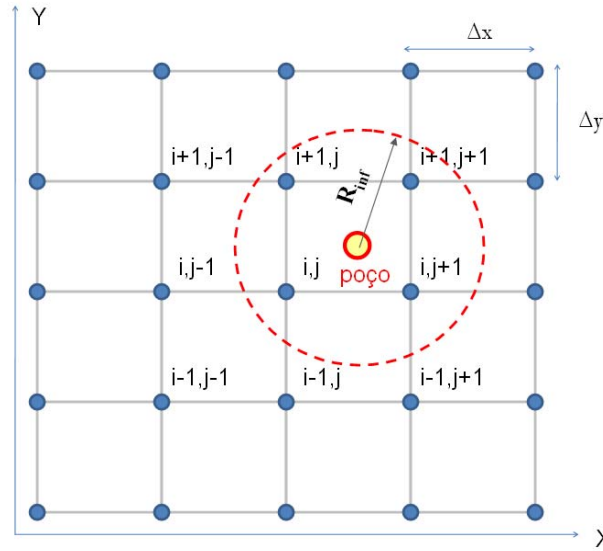


Figura 27 – Esquema da malha numérica e do raio de influência da solução analítica

As derivadas espaciais da equação (8) foram discretizadas por diferenças centrais de segunda ordem, ao passo que o termo temporal foi discretizado por método explícito de primeira ordem. Assim, tomando por base a indexação dos nós ilustrada pela Figura 27, o conjunto de equações discretas é escrito como:

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot b \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right|_{i,j} = \frac{fx_2 - fx_1}{\Delta x} \quad \text{equação (9), em que:}$$

$$fx_2 = \frac{K_{i,j+1} + K_{i,j}}{2} \cdot \frac{b_{i,j+1} + b_{i,j}}{2} \cdot \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta x}$$

$$fx_1 = \frac{K_{i,j-1} + K_{i,j}}{2} \cdot \frac{b_{i,j-1} + b_{i,j}}{2} \cdot \frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{\Delta x}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot b \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right|_{i,j} = \frac{fy_2 - fy_1}{\Delta y} \quad \text{equação (10), em que:}$$

$$f_{y_2} = \frac{K_{i+1,j} + K_{i,j}}{2} \cdot \frac{b_{i+1,j} + b_{i,j}}{2} \cdot \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta y}$$

$$f_{y_1} = \frac{K_{i-1,j} + K_{i,j}}{2} \cdot \frac{b_{i-1,j} + b_{i,j}}{2} \cdot \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta y}$$

$$h|_{i,j} = h_{i,j} + \frac{\Delta t}{S_{y_{i,j}}} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot b \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{i,j} + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot b \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) \Big|_{i,j} \right\} \quad \text{equação (11), em que:}$$

$$h|_{i,j} = \text{cota piezométrica após um passo de tempo } \Delta t.$$

Em termos de solução numérica, as condições de contorno laterais impõem a igualdade entre as cotas piezométricas limítrofes e as cotas piezométricas vizinhas (condição de contorno livre). No uso específico deste modelo, há também condições de contorno internas, nas quais os nós dentro do raio de influência de cada poço (raio de influência da solução analítica) têm sua cota piezométrica calculada por procedimento analítico. Nesse contexto, o modelo utiliza, como raio de influência, a média geométrica entre as dimensões da célula de discretização, ou seja: $R_{inf} = (\Delta x \cdot \Delta y)^{0,5}$.

Em termos de solução analítica, o modelo conceitual utilizado pelo programa foi elaborado por Neuman (1974) e baseia-se na teoria das funções de poços. Tal modelo faz a estimativa do rebaixamento da superfície piezométrica em aquíferos livres, sujeitos ao bombeamento de poços parcialmente penetrantes. A equação genérica para o rebaixamento pode ser escrita como:

$$r = \frac{Q}{4\pi \cdot K \cdot D} \cdot W(\sigma, \beta, d_d, l_d, z_{2d}, z_{1d}, t_s) \quad \text{equação (12)}$$

Na equação (12), Q é a vazão extraída, D é a espessura saturada inicial do aquífero e W é a função de poço. No programa utilizado, D é calculada como a diferença entre a cota inicial da superfície piezométrica do lençol e a cota de topo dos basaltos, na posição de cada ponto nodal, desde que este esteja dentro do raio de influência (R_{inf}) da solução analítica. A função de poço W , por sua vez, é dependente de aspectos geométricos do poço, como a sua penetração no aquífero e a extensão da seção filtrante, além de aspectos relacionados com as propriedades hidrogeológicas do aquífero e a distância ao ponto nodal, no qual o rebaixamento é calculado. Na área de estudo, a maioria dos poços não tem cadastro acerca

das suas características geométricas, apenas os poços listados no Anexo A. Para contornar essa questão, foram atribuídos, para todos os poços, os mesmos padrões com profundidade do poço de 60 m e do filtro entre 30 e 60 m. Se, em determinado local, a profundidade do poço ultrapassasse o topo dos basaltos, este tinha penetração delimitada apenas dentro da espessura saturada e era considerado totalmente penetrante. Uma descrição mais detalhada sobre o método de Neuman, bem como dos procedimentos para solução da função de poço, fogem do escopo deste trabalho. Para isto, recomenda-se a leitura de Dawson e Istok (1991) e Alamy Filho (2002).

Os pontos nodais sujeitos à solução analítica têm, finalmente, suas cotas piezométricas calculadas como:

$$h|_{i,j} = h_{i,j}^o - r \quad \text{equação (13)}$$

Na equação (13), r é o rebaixamento no ponto i,j e $h_{i,j}^o$ equivale à cota piezométrica inicial nesse ponto.

Como produto da obtenção dos campos de cota piezométrica, a velocidade média de escoamento pode ser calculada pela Lei de Darcy, utilizando diferenças centrais de segunda ordem, como:

$$u_{i,j} = -\frac{K_{i,j+1} + K_{i,j-1}}{2} \cdot \frac{h|_{i,j+1} - h|_{i,j-1}}{2 \cdot \Delta x} \quad \text{equação (14)}$$

$$v_{i,j} = -\frac{K_{i+1,j} + K_{i-1,j}}{2} \cdot \frac{h|_{i+1,j} - h|_{i-1,j}}{2 \cdot \Delta y} \quad \text{equação (15)}$$

Nas equações (14) e (15), u e v são componentes de velocidade média aparente nas direções x (WE UTM) e y (SN UTM), respectivamente. Note-se que, escritas em forma de matriz, essas velocidades são armazenadas em cada ponto nodal i,j .

Para encerramento deste item, é conveniente apresentar a tela principal do programa de simulação, a qual é ilustrada pela Figura 28.

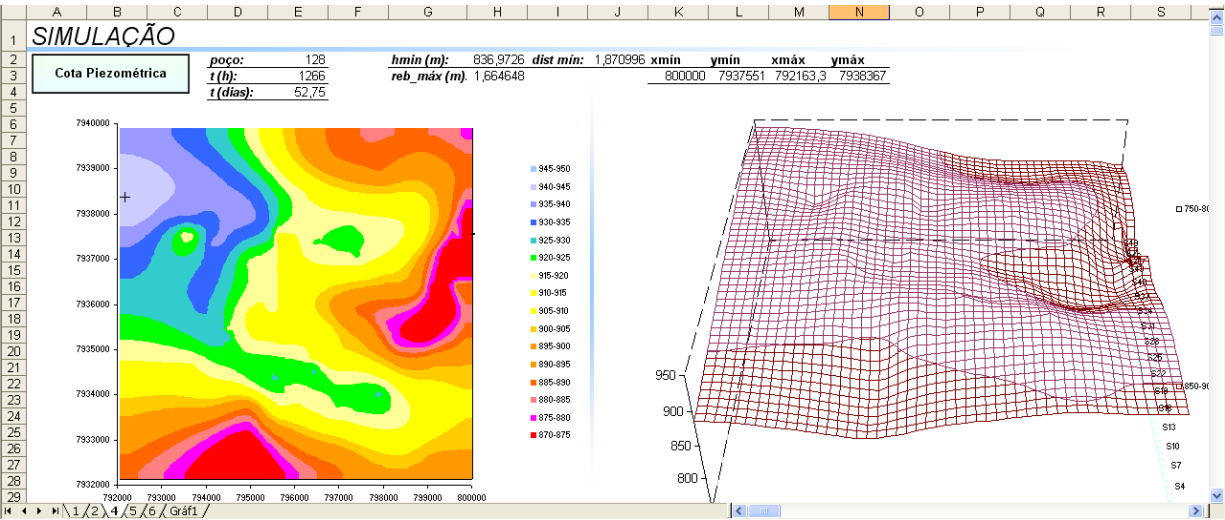


Figura 28 – Tela principal do programa, com destaque para curvas de cota piezométrica e de superfície freática simuladas

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Este capítulo descreve os resultados principais da pesquisa, incluindo uma série de mapas e figuras que elucidam os principais aspectos da distribuição do aquífero Bauru, subjacente à cidade de Araguari. Em linhas gerais, os resultados foram obtidos a partir da interpolação de dados primários em uma malha de 8 x 8 km, constituída por 62500 pontos nodais. Com este procedimento, os resultados das características geométricas e dos parâmetros hidrogeológicos foram armazenados em matrizes de 250 linhas por 250 colunas.

5.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

A cidade de Araguari apresenta geomorfologia de área de chapada, como pode ser evidenciado no mapa de superfície da cidade (Figuras 29 e 30) com altitudes acima de 880 m. O relevo da zona urbana pode ser dividido em topo de chapada, com terrenos planos que se estendem acima da cota de 950 m de altitude, e chapada com áreas de relevo suave que ocupam as cotas altimétricas entre 930 e 950 m. As declividades do terreno acentuam-se no entorno do talvegue principal, o córrego Brejo Alegre, que corta o centro da cidade, e nas porções sudoeste e nordeste. Pela Figura 29, percebe-se que a malha urbana encontra-se dispersa nas áreas planas de chapada.

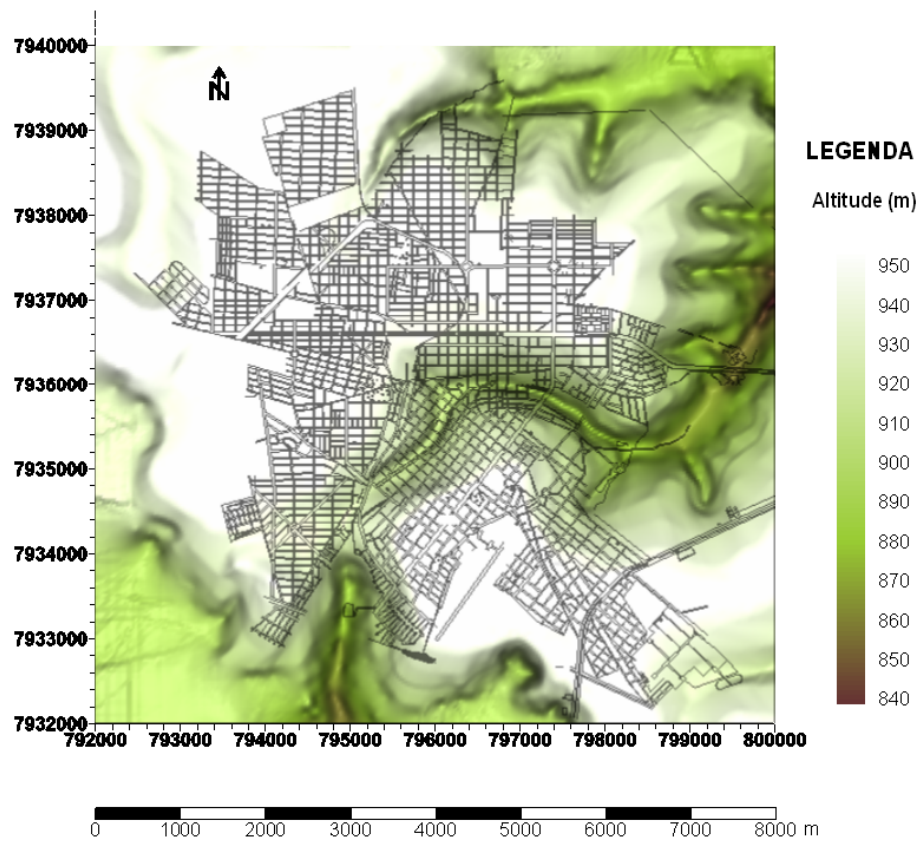


Figura 29 - Superfície do terreno da cidade de Araguari e distribuição da malha urbana

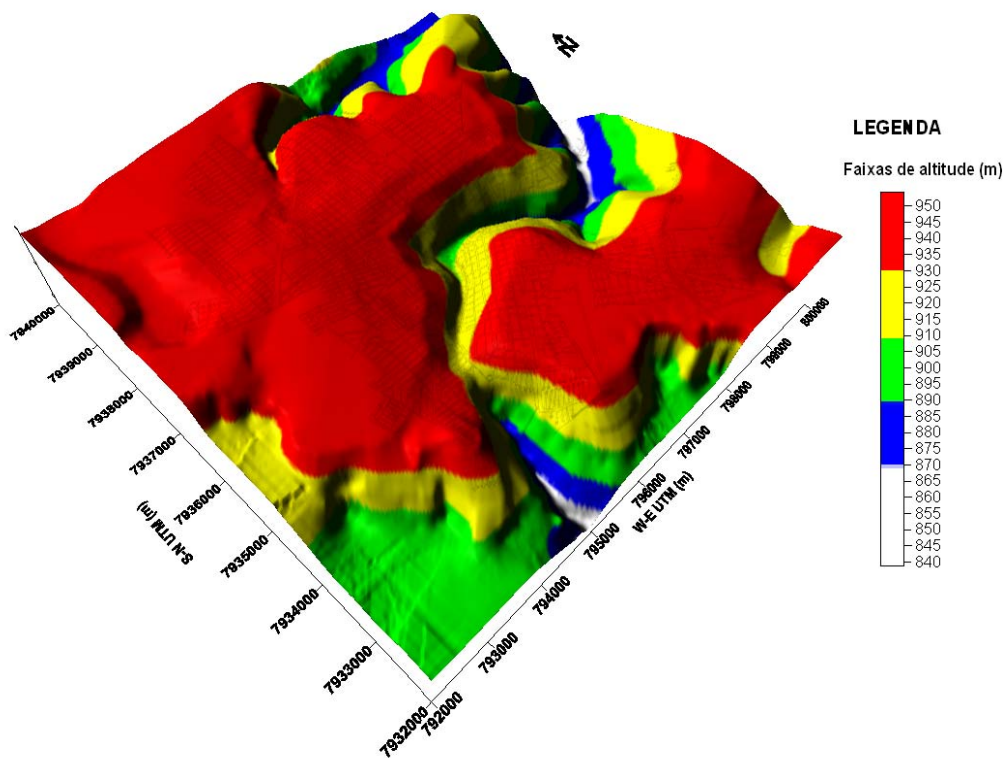


Figura 30 – Superfície da cidade de Araguari – faixas de altitude

A Figura 31 ilustra, com maior detalhamento, as curvas de nível da cidade de Araguari, com espaçamentos de 5 em 5 m.

A base do Aquífero Bauru encontra-se entre as cotas 830 m e 900 m, apresentando maiores cotas na porção noroeste da cidade. As menores cotas ocorrem na porção extremo leste e nordeste da cidade, como mostra o mapa da base do Aquífero, ilustrado pela Figura 32 (topo da formação Serra Geral). Neste último caso, a comparação entre a superfície do terreno e superfície de topo da formação Serra Geral evidencia a tendência de afloramento dos basaltos nessas porções da cidade.

As cotas piezométricas do lençol variam entre as cotas 840 m e 945 m (ver mapa de superfície do lençol – Figura 33). As maiores cotas piezométricas são encontradas na porção extremo noroeste no entorno dos poços da Fazenda Cavalaro P43A e P43B e da Bateria São Sebastião. Os resultados do mapeamento do aquífero sob a zona urbana de Araguari revelam que as cotas piezométricas decrescem da região noroeste para a região leste, na qual são encontradas as menores cotas da superfície do lençol, sendo as mesmas coincidentes com os córregos que drenam a cidade. Além das baterias de poços, percebe-se que a superfície piezométrica apresenta elevados gradientes margeando o córrego Brejo Alegre e nos declives situados a nordeste e a sudeste da região analisada. Esses elevados gradientes condicionam as maiores velocidades médias do escoamento subterrâneo, conforme será denotado pelos mapas de velocidade, ilustrados no sub-item seguinte.

A partir das curvas de nível e da superfície do lençol, foi possível obter dois mapas que realçam o conhecimento da distribuição do aquífero sotoposto à zona urbana estudada: o mapa de profundidade do lençol e o mapa de espessura saturada. Esses dois mapas, ilustrados pelas Figuras 34 e 35, permitem uma interpretação mais direta acerca das características do aquífero, podendo ser utilizados mais diretamente pela concessionária local de água, nas atividades que envolvam a gestão do manancial.

As profundidades do lençol, na área analisada, variam entre 2 e 47 m, conforme denotam os resultados ilustrados pela Figura 34. Esse mapa foi obtido pela subtração da superfície do terreno com a superfície do lençol, cujos valores foram armazenados nas matrizes de interpolação. A obtenção do mapa de espessura saturada seguiu procedimento semelhante, subtraindo-se os dados matriciais de superfície do lençol pelos dados de topo da formação Serra Geral. As menores profundidades da superfície freática foram encontradas no

entorno do córrego Brejo Alegre, que constitui o talvegue principal da cidade. Nessa região, as espessuras saturadas também são pequenas, atingindo valores ligeiramente superiores a 3 m. A localização central desse talvegue, a intensa ocupação e a localização de indústrias adjacentes são indicadores de que esse setor apresenta um maior risco à poluição. Na região noroeste, também percebe-se um decrescimento das profundidades, as quais chegam a atingir valores inferiores a 10 m, conforme pode ser observado no mapa de profundidade do lençol (Figura 34). Neste último caso, essas regiões coincidem com locais onde o aquífero atinge as maiores faixas de espessura saturada, com valores superiores a 40 m (ver Figura 35). Em termos pontuais, destacam-se profundidades marcantes na vizinhança das baterias de poços, fator que evidencia os rebaixamentos causados pela operação de poços muito próximos.

Em linhas gerais, os resultados evidenciaram que a porção saturada, que constitui o sistema aquífero Bauru subjacente à zona urbana de Araguari, está sujeita a sensíveis variações de espessura e de profundidade. Neste último caso, destaca-se a presença de baterias de poços, distribuídas na zona urbana, que contribuem para os rebaixamentos mais acentuados da superfície piezométrica. Por outro lado, a proximidade da superfície do lençol com o talvegue principal da cidade (Córrego Brejo Alegre) chama a atenção para a vulnerabilidade à poluição do aquífero nesses setores, uma vez que os efluentes domésticos já lançados no Córrego não possuem nenhum tipo de tratamento.

Figura 31 – Mapa de Curvas de Nivel de Araguari

Figura 32 – Mapa de Base do Aquífero Bauru (topo dos basaltos da formação Serra Geral)

Figura 33 – Mapa de superfície piezométrica do Aquífero.

Figura 34 – Mapa de profundidade do lençol

Figura 35 – Mapa de espessura saturada da formação Bauru.

A utilização de seções (transversais, longitudinais e genéricas) constitui outra ferramenta importante, não somente para a visualização, mas também para a quantificação de aspectos geométricos do aquífero. As seções ilustradas neste item foram calculadas pelo programa desenvolvido no âmbito desta pesquisa, conforme os procedimentos descritos no capítulo anterior. Dentre as principais vantagens das seções, está a possibilidade de identificar divisores de águas superficiais e subterrâneas, bem como a presença de cones de depressão induzidos pela operação de poços tubulares.

No corte longitudinal A-A', coordenada SN=7937500 m, ilustrado pela Figura 36, é notória a presença de cones de rebaixamento ocasionados pelo bombeamento, indicando a presença dos poços das Baterias São Sebastião (à esquerda – oeste) e Independência (ao centro). A leste, a superfície do lençol mergulha na direção dos basaltos formação Serra Geral, indicando a possibilidade de água em eventuais fraturas superficiais dessa formação. No corte transversal B-B', coordenada WE=794600 m, observa-se a presença de outro cone de depressão, induzido pelos poços da Bateria Chamcia. Ao sul, verifica-se a tendência de mergulho do lençol em direção aos basaltos. O referido corte também evidencia dois divisores de águas subterrâneas: um a centro-sul e outro a norte. Nota-se que, nessa seção, os divisores de águas subterrâneas e superficiais (divisor de sub-bacias hidrográficas) não são coincidentes.

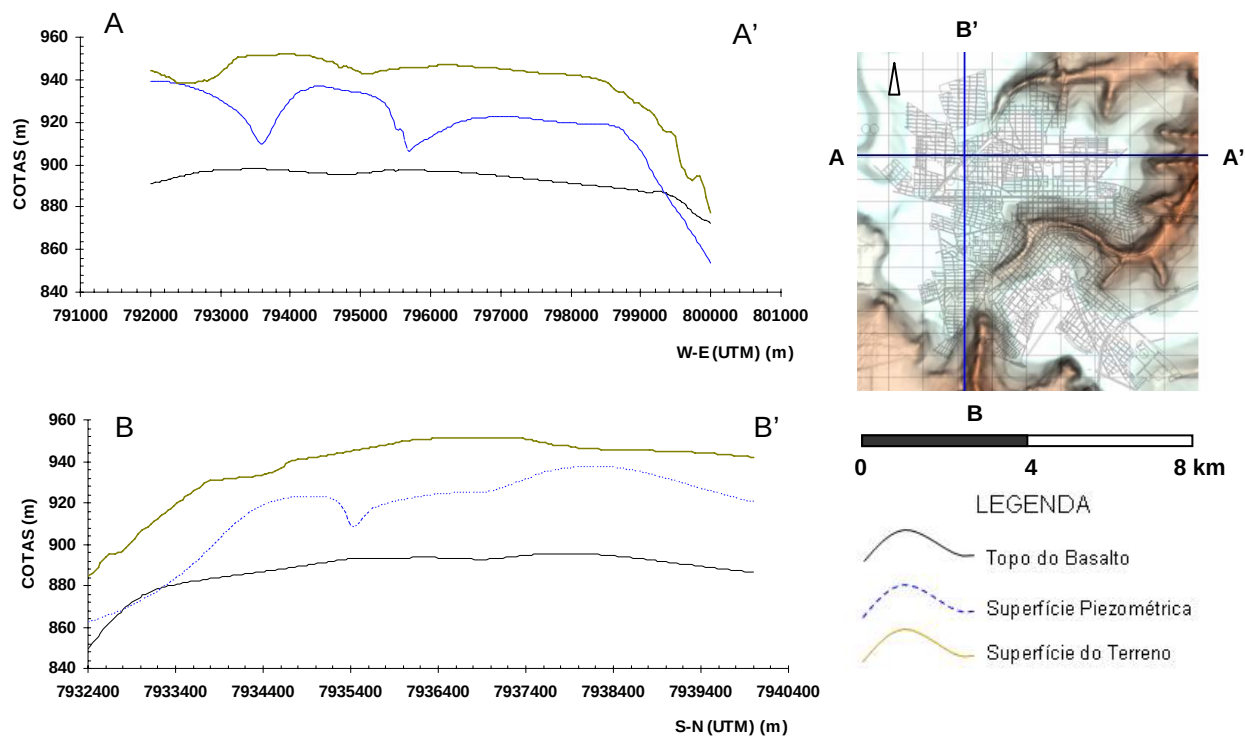


Figura 36 – Seções A-A' e B-B'

No cortes de seção transversal C-C' (Figura 37), com coordenada WE=796374 m, evidencia-se grande cone de rebaixamento formado pela ação dos quatro poços da bateria Estadual, totalizando uma vazão de 59 m³/h. A leste, observa-se um divisor de águas subterrâneas nas proximidades da coordenada SN=7937500 m. Na porção central, nota-se o afloramento do lençol no talvegue do Córrego Alegre.

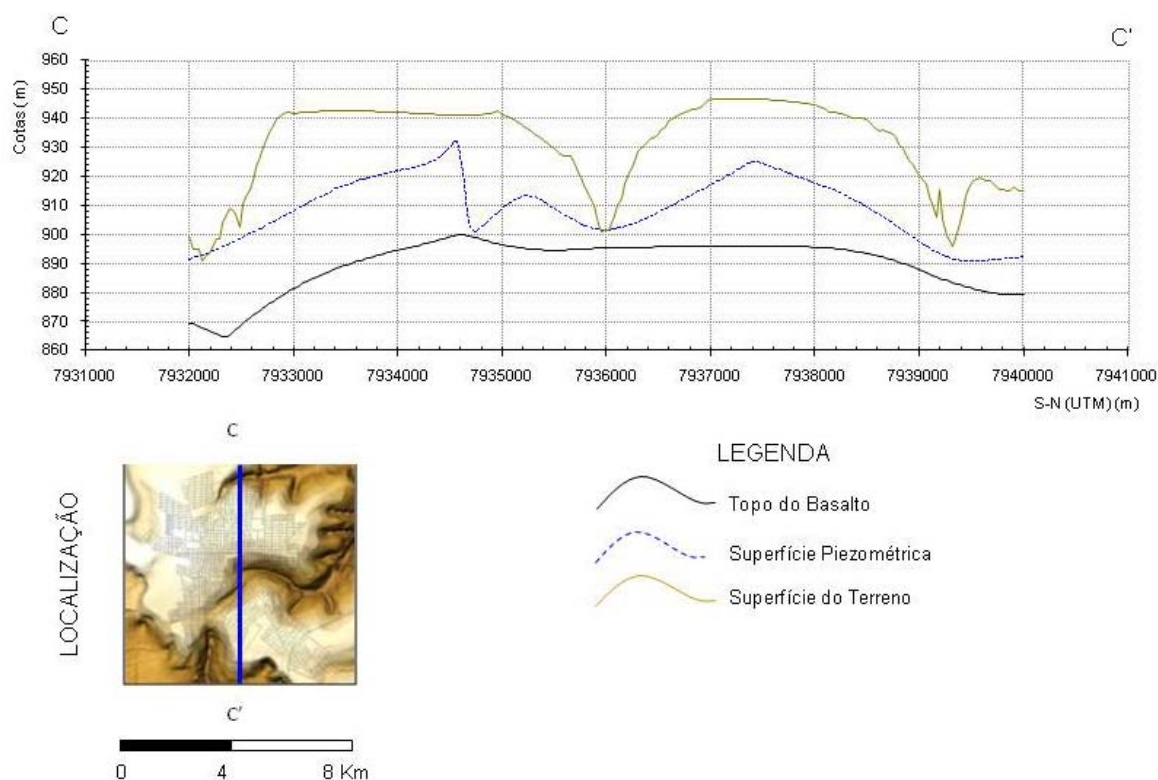


Figura 37 – Seção transversal C-C'

No corte longitudinal D-D', na coordenada SN=7934500 m, observa-se a presença de divisores de águas subterrâneas não coincidentes com divisores de águas superficiais. A cota mais elevada da superfície piezométrica aproxima-se do nível do terreno, entre o início do talvegue central e o talvegue sul. No transversal Corte E-E, coordenada WE=796500 m, nota-se a contribuição do aquífero no escoamento de base do talvegue do Córrego Brejo Alegre, além de divisores de águas subterrâneas ao sul e ao norte. No centro-sul, percebem-se resquícios de rebaixamentos induzidos pelos poços concentrados na Bateria do Estadual. No corte transversal, é ilustrado o relevo de chapada predominante na cidade de Araguari, e nas suas extremidades observa-se a mudança de relevo, com grandes declividades não apenas do relevo, mas também da superfície do lençol. Todas essas feições são ilustradas pela Figura 38.

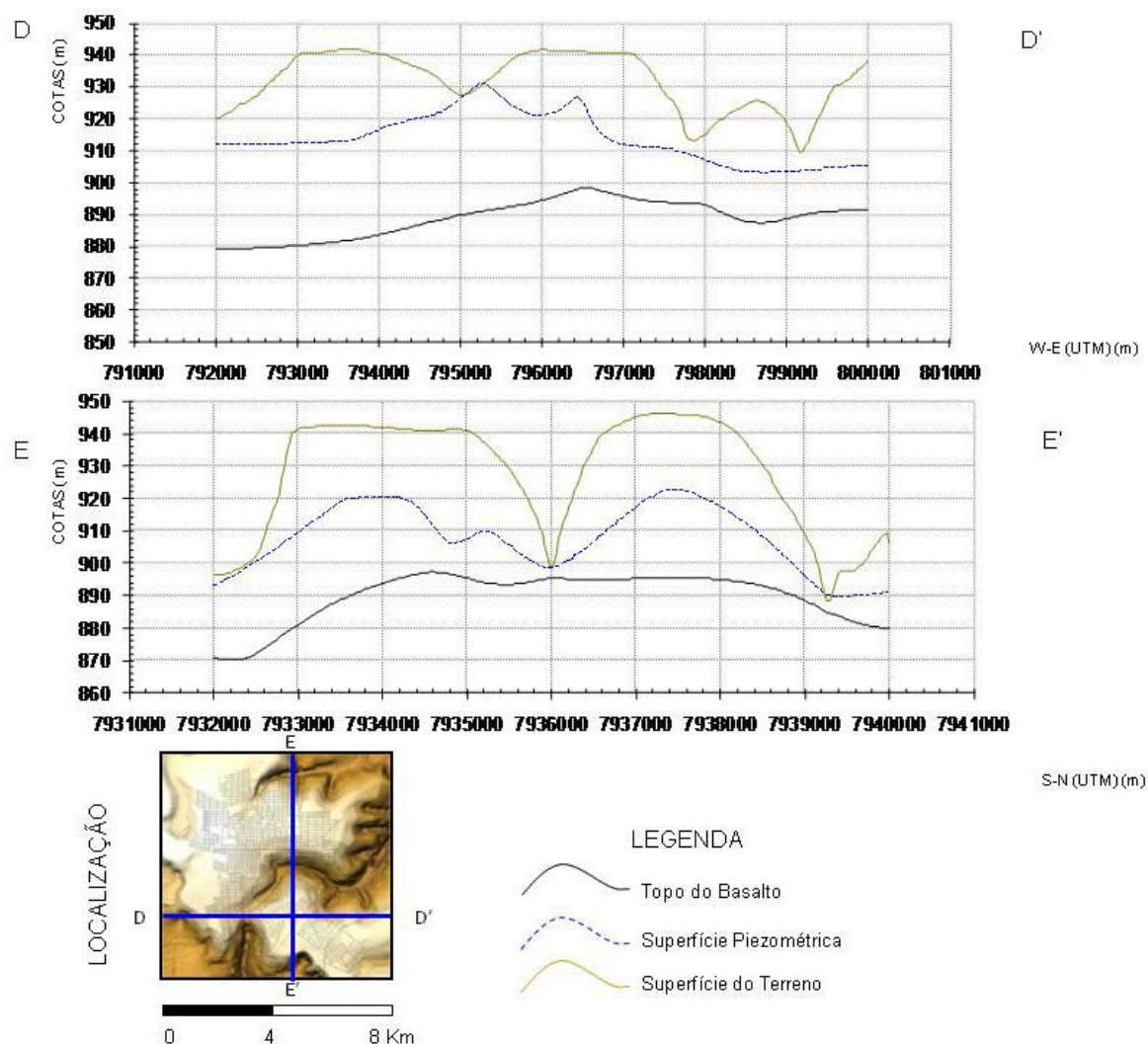


Figura 38 – Seções D-D' e E-E'

Os cortes da Figura 39 passam no eixo da Bateria Chamcia, pelas coordenadas, EW= 794500 m e SN=7935340 m. Corte longitudinal F-F', observa-se a presença de afloramentos no talvegue do córrego Brejo Alegre (seccionado em três posições diferentes). O cone de rebaixamento ocasionado pelo bombeamento dos poços da bateria de poços é evidente, tanto na seção G-G' quanto na F-F'.

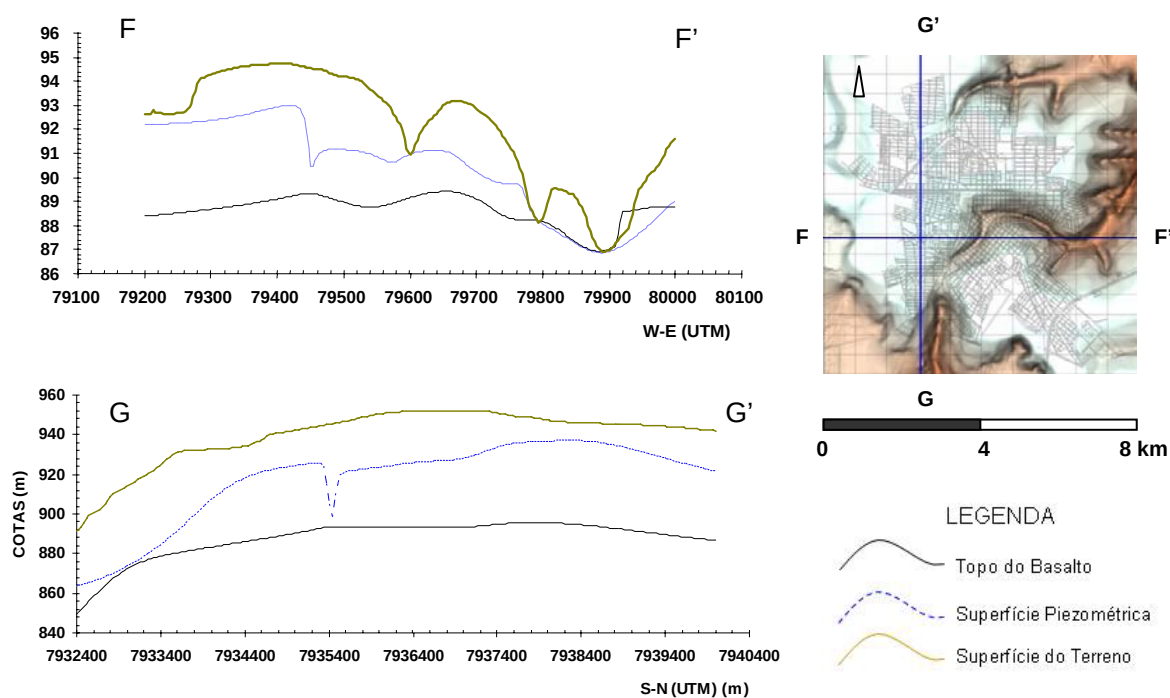


Figura 39 – Seções F-F' e G-G'

O Corte 1-2, ilustrado pela Figura 40, evidencia um grande cone de depressão na Bateria Chamcia, cujos poços extraem, no total, $182 \text{ m}^3/\text{h}$. Nota-se um cone central menos pronunciado na região dos poços da Bateria de Fátima e outro cone na região da Bateria Independência (extração total de $177 \text{ m}^3/\text{h}$). Os poços ativados na Bateria de Fátima extraem, ao todo, $167 \text{ m}^3/\text{h}$, apesar da referida bateria contar com 7 poços desativados. A leste, percebe-se a tendência de mergulho do lençol, com declividades condizentes com a do terreno e dos basaltos. A oeste, o lençol mergulha com declividade próxima da Formação Serra Geral.

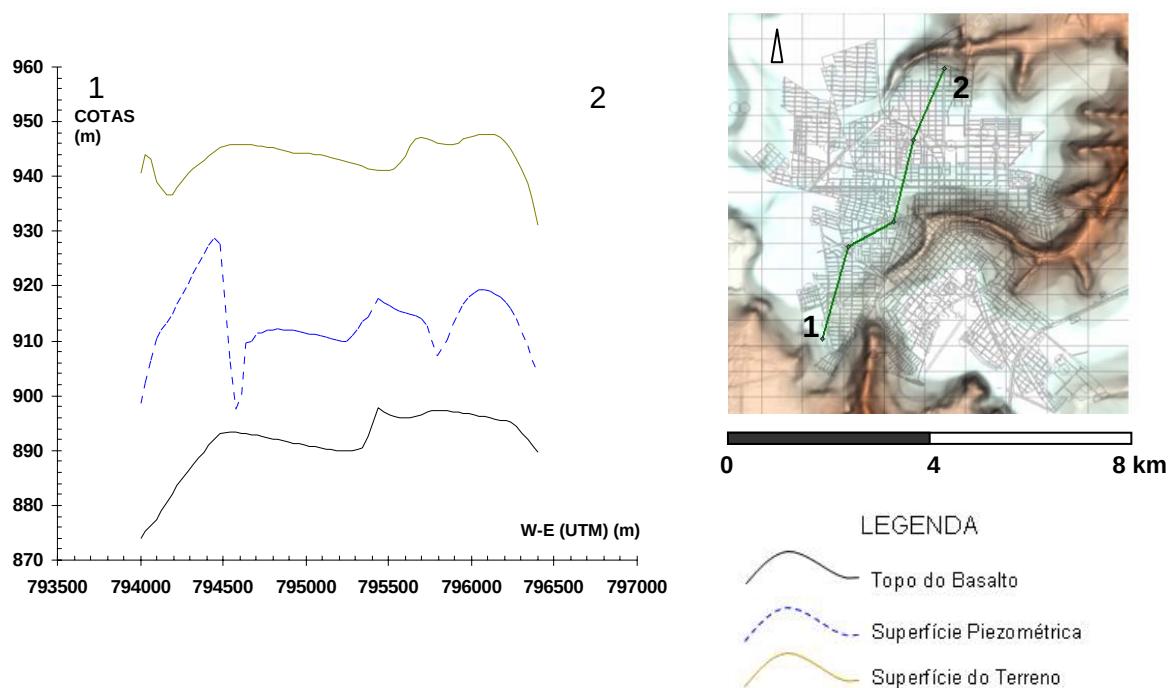


Figura 40 – Seção 1-2

O Corte 3-4 (Figura 41), ilustra, de oeste para leste, três cones de depressão. O primeiro cone, mais destacado, é induzido pelos poços da Bateria São Sebastião (4 poços com extração total de $94 \text{ m}^3/\text{h}$). Além deste, percebe-se um cone pouco saliente devido à operação do poço isolado P26 (rua das Araras, $30 \text{ m}^3/\text{h}$) e outro cone causado pelos poços isolados P23 e P22 ($35 \text{ m}^3/\text{h}$ e $30 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente).

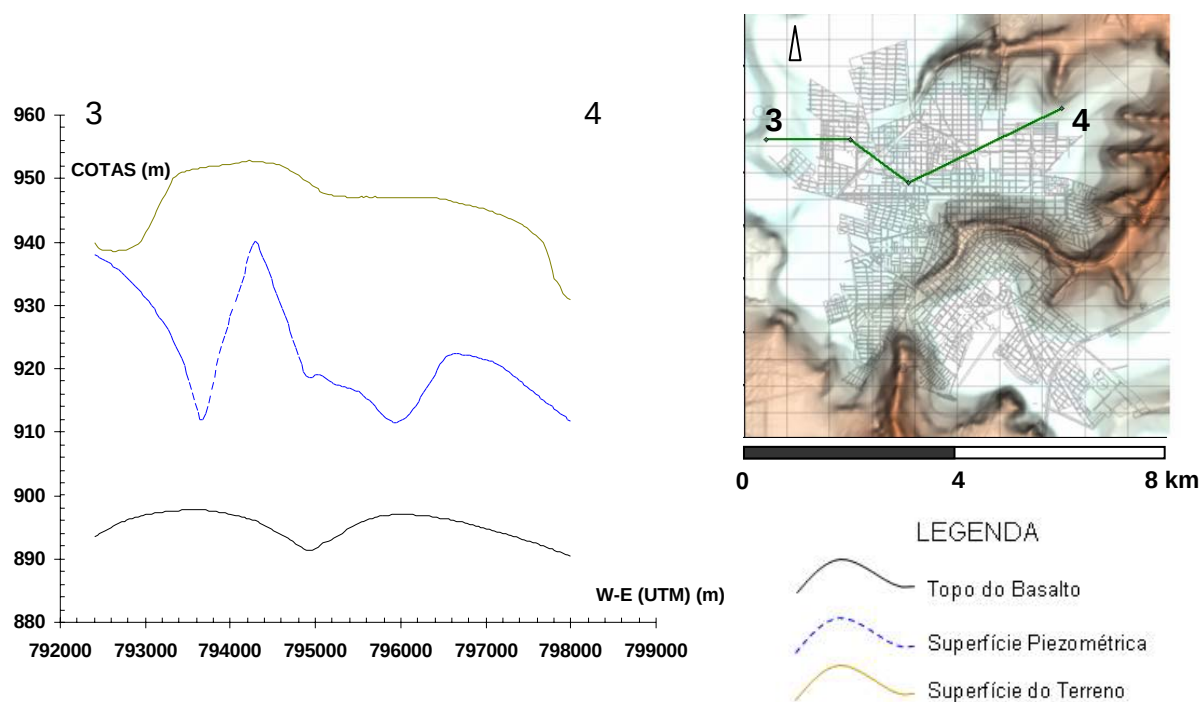


Figura 41 – Seção 3-4

O Corte 5-6 (Figura 42) foi elaborado a partir das Baterias São Benedito e Estadual, cruzando o talvegue do córrego Brejo Alegre. A oeste, nota-se a tendência de mergulho do lençol em direção aos basaltos, com declividades muito próximas às do terreno. De oeste para leste, verificam-se cones de rebaixamento na vizinhança das Baterias São Benedito e Estadual, com poços ativados que extraem, ao todo, 125 m³/h e 106 m³/h; além da contribuição do lençol para o escoamento de base do córrego Brejo Alegre (talvegue).

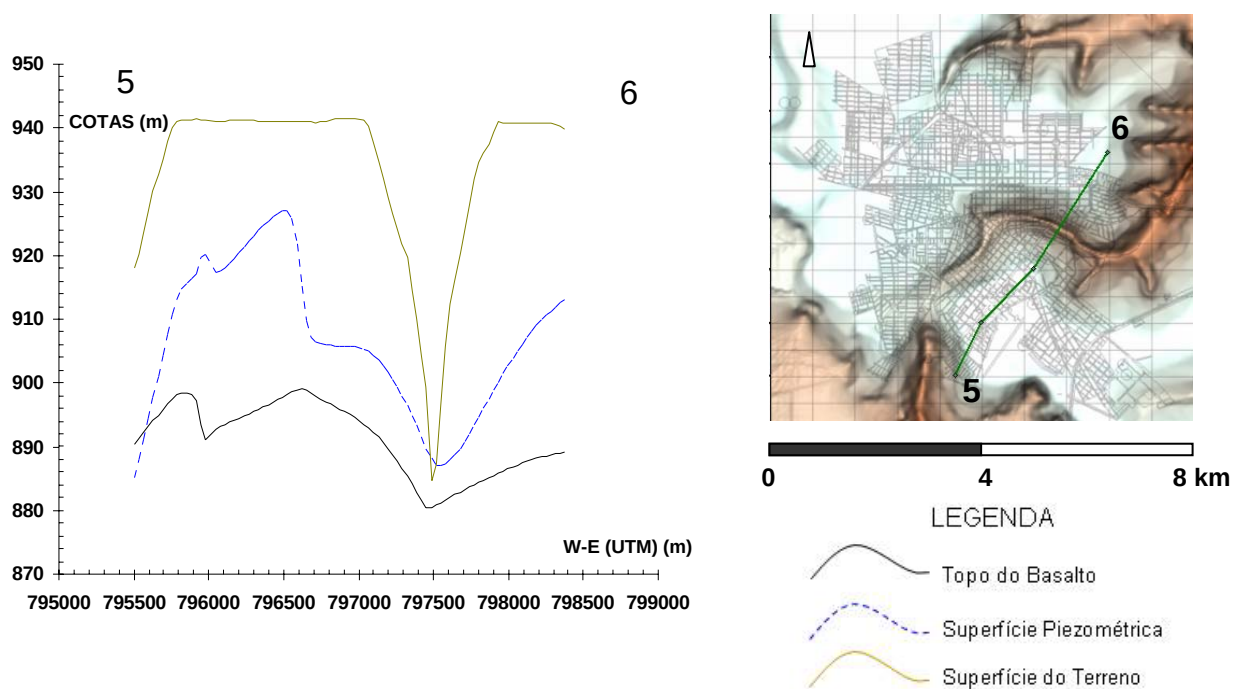


Figura 42 – Seção 5-6

De uma maneira geral, a possibilidade de construir diversas seções constituiu uma ferramenta adicional que contribuiu para uma maior percepção das feições geométricas do aquífero. No caso do aquífero analisado, sotoposto a uma zona urbana que contempla uma rede de poços tubulares, foi possível perceber rebaixamentos do lençol induzidos pelo bombeamento. Todavia, os cortes também salientaram gradientes naturais, caracterizados por mergulhos do lençol nos limites de chapada, onde o terreno sofre grandes declives; além da drenagem natural nos talwegues.

5.2 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

Em termos de parâmetros hidrogeológicos, percebe-se que a condutividade hidráulica e a transmissividade assumem distribuições heterogêneas, ao passo que o rendimento específico assume valores mais uniformes na área analisada.

Sob este aspecto a condutividade hidráulica, na zona urbana de Araguari, apresentou valores de 0,005 a 0,56 m/h, conforme pode ser observado no mapa de Condutividade Hidráulica, ilustrado pela Figura 43. Em 64,28% dos poços, prevaleceram os valores de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-2} m/h e em 17,85%, valores da ordem de 10^{-1} e

10^{-3} m/h, sendo que os poços que apresentaram os maiores valores de condutividade hidráulica foram os da Bateria São Benedito e Bateria de Chamcia e os da Fazenda Cavalaro. De uma forma geral, as condutividades hidráulicas atingem, na área analisada, valores entre 0,0016 e 0,62 m/h. Essa faixa de variação assume a mesma ordem de grandeza dos valores médios para o aquífero Bauru no estado de São Paulo, que estão entre 0,0042 e 0,125 m/h, segundo Velasquez e Romano (2004).

Figura 43 – Mapa de condutividade hidráulica do Aquífero

A partir do conhecimento da distribuição de condutividade hidráulica e das cotas piezométricas do aquífero, foi possível estimar as velocidades de escoamento. As velocidades aparentes do escoamento, calculadas pela Lei de Darcy, são ilustradas pela Figura 44. Nesse sentido, os setores com velocidades absolutas mais elevadas foram evidenciados nos declives de chapada, atingindo valores mais agudos nas porções nordeste e norte. Nos declives que direcionam para os talwegues, como no caso do córrego Brejo Alegre (talvegue central) e de outros talwegues ao norte e ao sul as velocidades médias atingem valores moderados. Em todos esses casos, tratam-se de gradientes naturais, uma vez que essas regiões encontram-se distantes de poços tubulares com extração significativa. Na Figura 44, principalmente pela projeção inferior, também é possível identificar setores isolados com elevadas velocidades, os quais correspondem às vizinhanças das baterias de poços.

A transmissividade hidráulica do aquífero subjacente à cidade de Araguari apresentou valores entre 0,58 m²/h e 13,5 m²/h, sendo que as Baterias Chamcia e São Benedito também foram as que apresentaram os maiores valores de transmissividade. A Figura 45 ilustra o mapa de contorno desse parâmetro. Os valores encontrados foram condizentes com a faixa de variação do aquífero Bauru no estado de São Paulo. Os valores médios para o aquífero Bauru, no referido estado, variam entre 0,42 a 12,5 m²/h, de acordo com Velasquez e Romano (2004). Como a transmissividade (T) de um aquífero é obtida pelo produto da condutividade hidráulica pela sua espessura saturada ($T=K.b$), justifica-se a relação entre os valores de K e T , por serem parâmetros diretamente proporcionais. Assim, na região analisada, a transmissividade assumiu padrão de distribuição semelhante ao da condutividade hidráulica. Na zona urbana de Araguari, portanto, percebem-se variações sensíveis deste parâmetro, em função das variações de condutividade hidráulica e de espessura saturada.

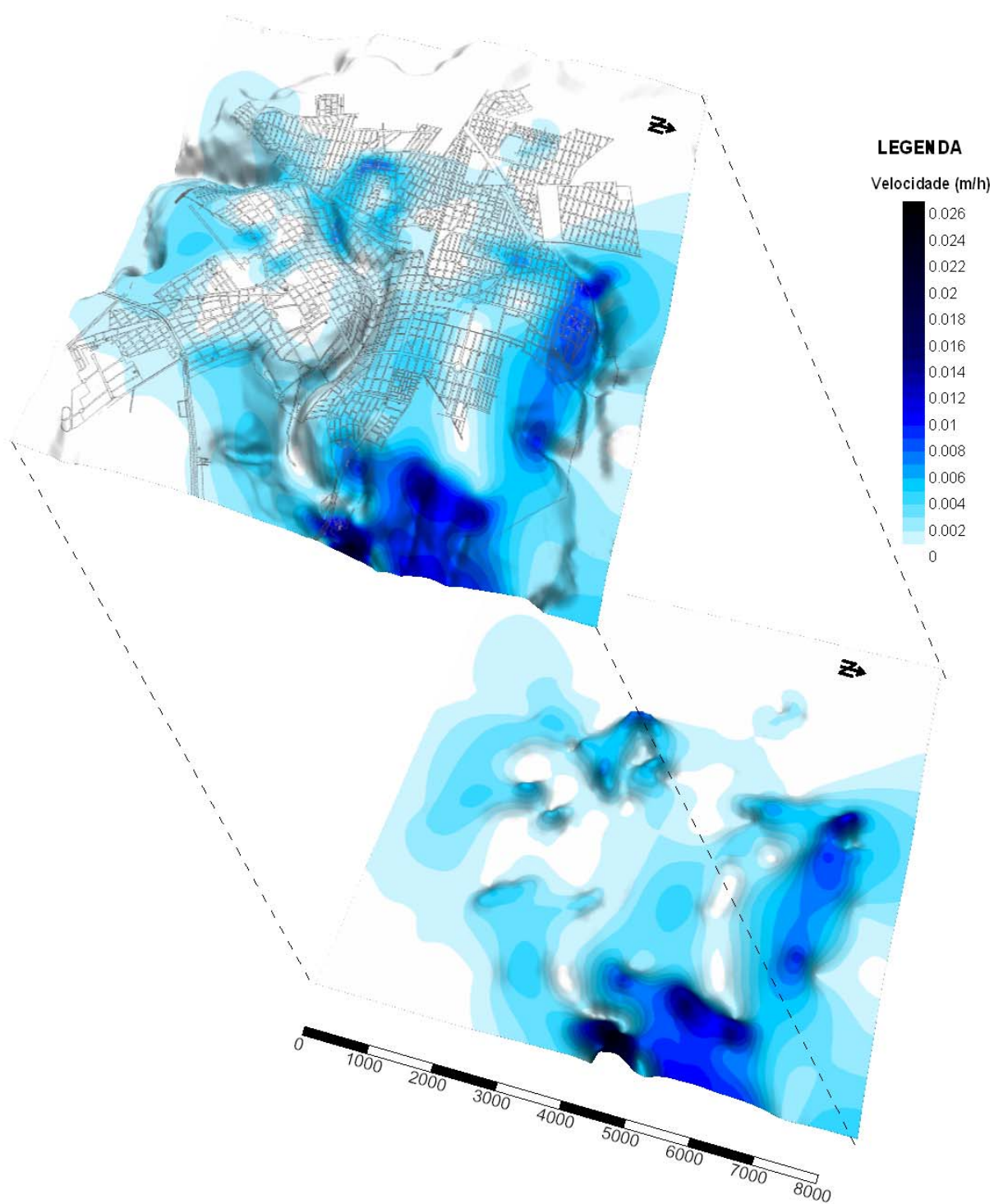


Figura 44 – Módulo da velocidade de escoamento calculada pela Lei de Darcy. A superfície superior corresponde a uma superposição do relevo da cidade com contornos de velocidade. A projeção inferior corresponde a iso-superfícies de velocidade.

Figura 45 – Mapa de transmissividade hidráulica da formação Bauru

Comportamento mais homogêneo, todavia, é descrito pelo mapa de Rendimento Específico (Figura 46). Nesse caso, convém destacar que o pequeno número de pontos, onde os valores primários deste parâmetro são conhecidos, contribuiu para a obtenção de uma distribuição mais homogênea. Considerando o rendimento específico como a porosidade efetiva, Oliveira e Campos (2004) encontraram valores de porosidade efetiva em torno de 0,12, para cotas acima de 915 m, e em torno de 0,135, para cotas entre 900 e 915 m. Esses dados, bem como os medidos por Velásquez (2004), corroboram que o rendimento específico do aquífero possui, na região analisada, uma distribuição realmente homogênea, com variações entre 0,12 e 0,15.

Figura 46 – Mapa de rendimento específico da formação Bauru.

A partir das distribuições espaciais das características hidrogeológicas do aquífero, procedeu-se a uma análise de identificação de regiões mais propícias à extração de água. Nesse sentido, é conveniente destacar quais foram as variáveis utilizadas nesta análise, bem como a justificativa para sua escolha:

- *Transmissividade (T)*: relaciona a condutividade hidráulica, que expressa a facilidade com que a água é transmitida de um ponto a outro, com a espessura saturada, que é um indicador da quantidade de água presente em determinada região. Assim, poços que exploram água em regiões de elevada transmissividade tendem a provocar menores rebaixamentos da superfície piezométrica;
- *Rendimento específico (S_y)*: relaciona a porcentagem de água que consegue ser liberada dos poros da formação, por drenagem. Setores com elevado rendimento específico permitem a liberação de mais água armazenada nos interstícios;
- *Espessura saturada (b)*: é um indicador da quantidade de água contida em uma coluna da formação porosa. Poços perfurados em regiões com maior espessura saturada evidentemente podem assumir penetrações maiores, de maneira a aproveitar melhor o manancial;

Esses três parâmetros do aquífero foram normalizados tomando por base o valor máximo encontrado na zona urbana estudada. Assim, as variáveis adimensionalizadas desta análise foram: $T' = T/T_{máx}$, $S_y' = S_y/S_{y\ máx}$ e $b' = b/b_{máx}$.

Na primeira análise, foram considerados os três adimensionais e identificadas as regiões onde todos eles assumem valores superiores a um limite especificado. Nesse contexto, os resultados são ilustrados pela Figura 47.

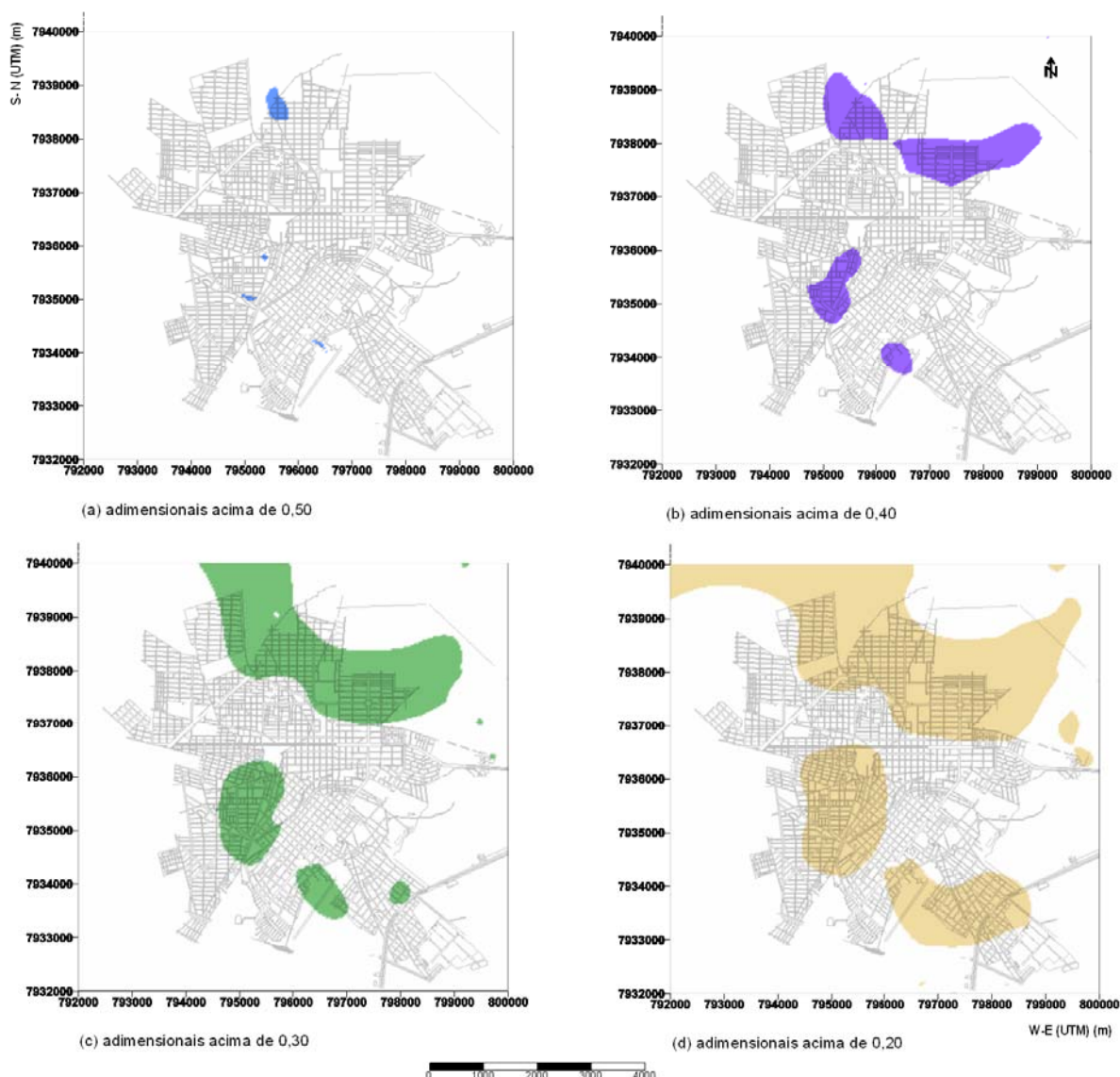


Figura 47 – Regiões onde todos os adimensionais (T' , S_y' e b') assumem valores acima de: (a) 0,50; (b) 0,40; (c) 0,30; (d) 0,20

Os resultados desta análise indicam que a região norte da cidade é mais propícia à extração de água, haja vista que ela apresenta o maior número de adimensionais superiores aos diversos limites especificados. Com a queda da restrição (redução do valor limite), setores no centro-oeste e sul também despontam como favoráveis à exploração. Tal análise, contudo não encontrou regiões onde todos os três adimensionais assumem valores maiores que 0,60.

Em uma segunda análise, consideraram-se apenas os adimensionais de transmissividade (T') e rendimento específico (S_y'). A razão para se descartar a espessura saturada

adimensional (b') reside no fato da transmissividade já embutir esse parâmetro. Nesse caso, os resultados foram menos restritivos do que os da análise anterior, identificando regiões onde todos os dois adimensionais assumem valores superiores a 0,50 (ver Figura 48). Nesse caso, o comportamento foi semelhante ao da análise anterior, destacando, ao sul, uma pequena região cujos adimensionais igualaram ou superaram 0,70.

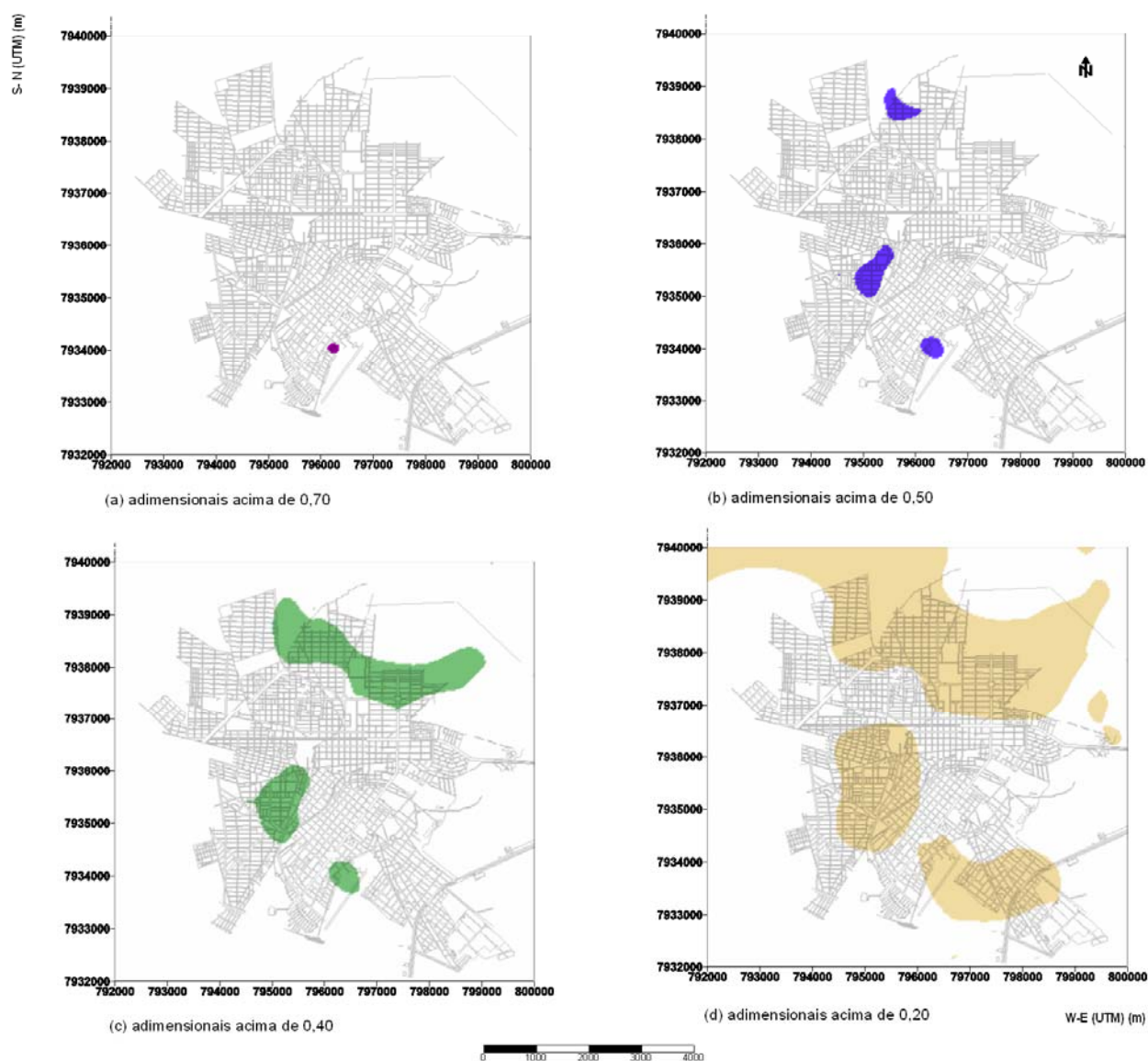


Figura 48 – Regiões onde os dois adimensionais (T' , S_y') assumem valores acima de: (a) 0,70; (b) 0,50; (c) 0,40; (d) 0,20

A despeito da abrangência das duas análises anteriores, ambas são conservadoras no sentido de exigirem que todos os adimensionais analisados assumam valores acima do limite especificado. Nesse sentido, uma terceira análise partiu do cálculo de um índice (I) que corresponde simplesmente à média dos três adimensionais. Os resultados, ilustrados pela Figura 49, fornecem faixas de variação do referido índice.

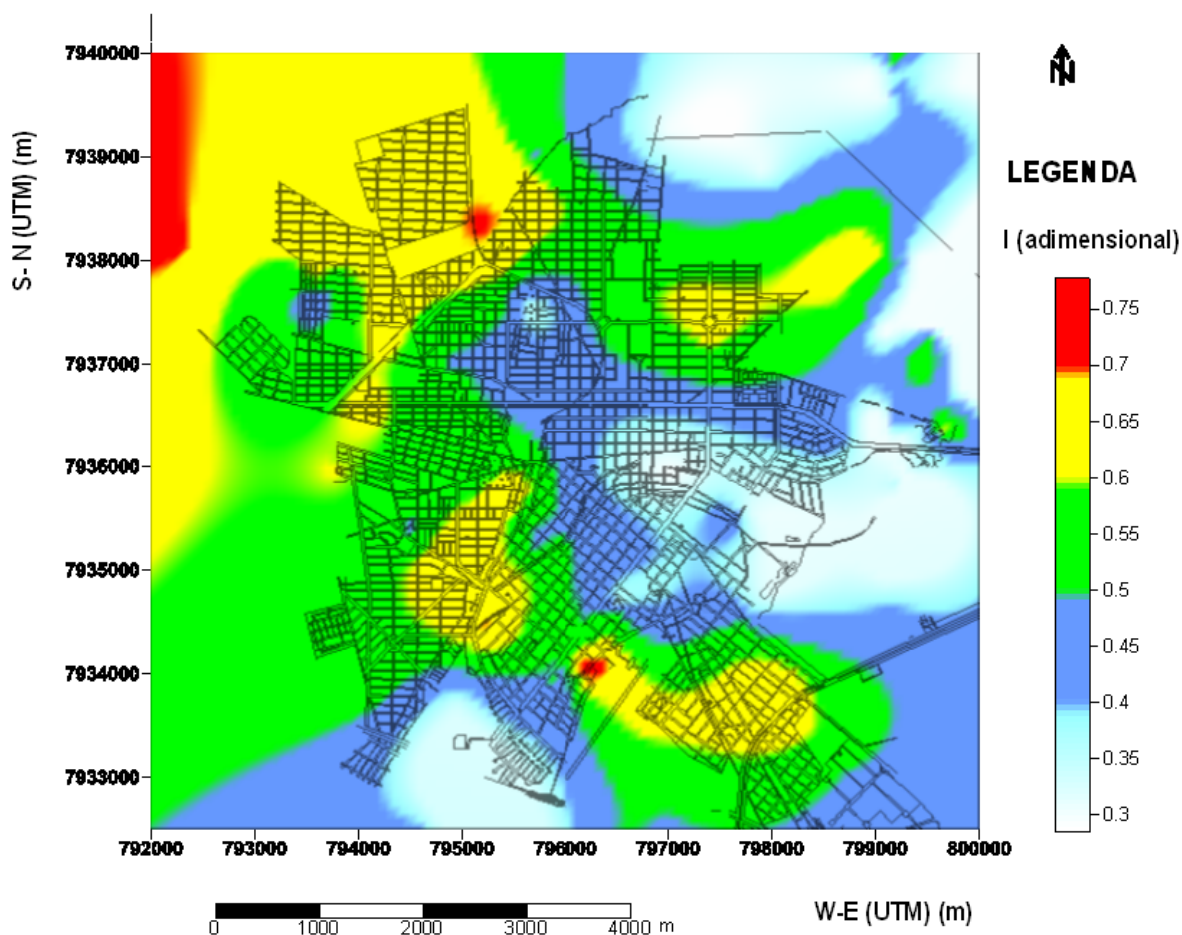


Figura 49 – Faixas de variação do índice (I)

A análise do índice (I) é menos restritiva, pois não exige que todos os três adimensionais estejam acima de determinado valor, mas apenas que a média dos três esteja dentro de determinada faixa de variação. Neste caso, os padrões das análises anteriores foram repetidos, com a inclusão de uma vasta região, propícia à exploração, no noroeste da zona urbana. A vantagem do uso do índice (I) é que ele permite elucidar as regiões menos propícias a grandes bombeamentos, as quais correspondem ao entorno dos talvegues sul, central (córrego Brejo Alegre) e nordeste da cidade. É interessante notar manchas claras isoladas no mapa, as quais correspondem às proximidades das baterias que exploram as

maiores vazões, como a São Sebastião (noroeste), Independência (centro-norte), Chamcia (centro-oeste) e Estadual (centro). A queda da propensão de exploração de grandes vazões na vizinhança dessas baterias decorre dos rebaixamentos do lençol, causados pela operação dos poços já existentes, fator que leva ao decaimento da espessura saturada e da transmissividade nessas regiões.

A conclusão geral das três análises é que as regiões planas, ao norte e noroeste da cidade são mais propícias à extração de grandes vazões. A mesma conclusão pode ser estendida para regiões planas no centro-oeste e ao sul da cidade. Essas regiões são condizentes com aquelas de onde são extraídas as maiores vazões, bem como aquelas onde as vazões de outorga são mais elevadas (ver Figuras 50 e 51).

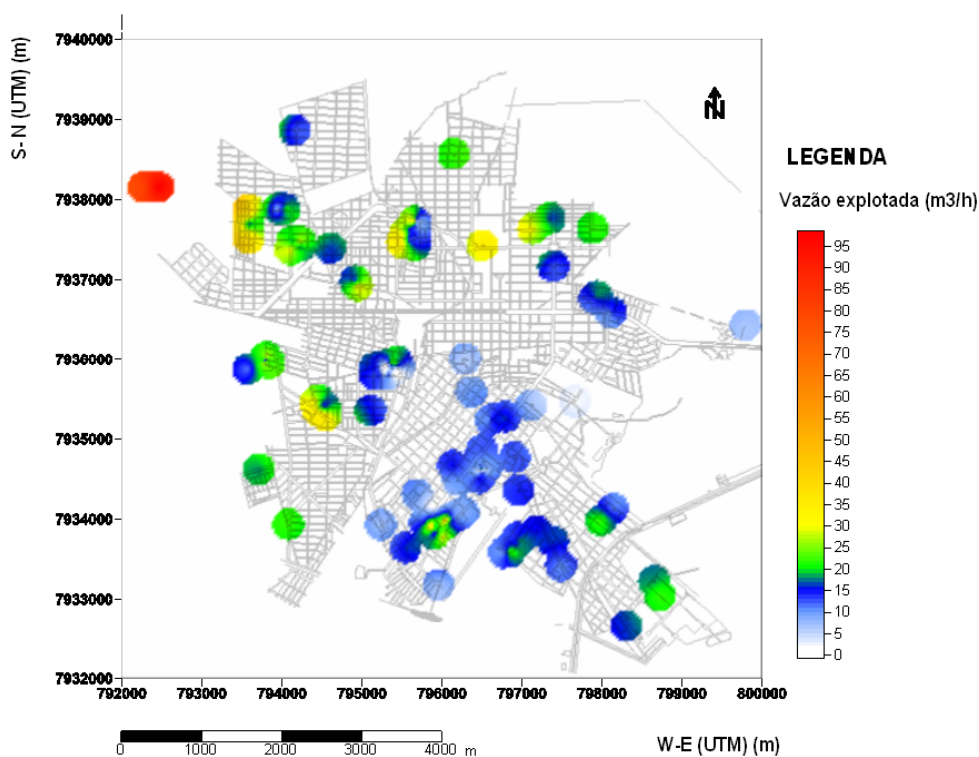


Figura 50 – Distribuição das vazões exploradas

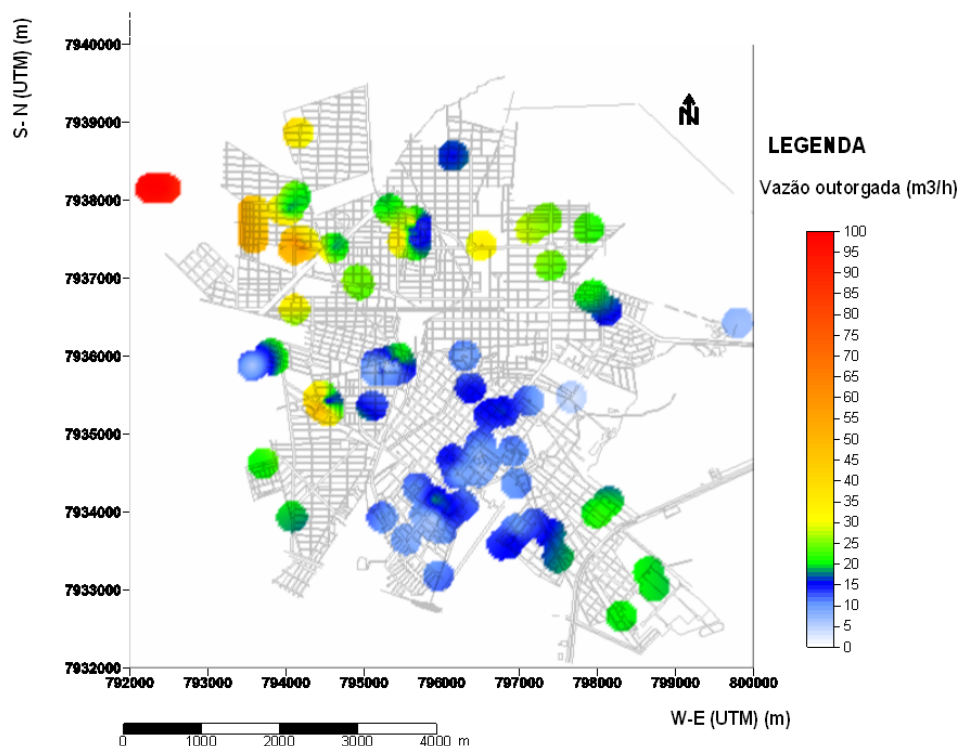


Figura 51 – Distribuição das vazões de outorga

Verifica-se, de forma geral, que as maiores vazões são extraídas no noroeste e norte da cidade. Nesse sentido, destaca-se, como fator determinante, a presença de dois poços com vazões de 80 e 100 m³/h, além das baterias de São Sebastião (4 poços com vazões entre 18 e 30 m³/h, além de dois poços isolados com vazões de 40 m³/h), Independência (10 poços com vazões entre 8 e 35 m³/h). No centro-oeste, a bateria Chamcia (7 poços com vazões entre 16 e 35 m³/h) contribui para as maiores extrações. No norte, destacam-se dois poços isolados com 30 m³/h e 35 m³/h. No sul, a bateria de São Benedito contribui para as maiores captações (8 poços com vazões entre 18 m³/h e 45 m³/h). A análise dos mapas de vazão explorada e de outorga permite vislumbrar uma linha diagonal imaginária, na direção sudoeste-nordeste, que divide a região onde a maioria das vazões são superiores a 20 m³/h da região onde a maioria das vazões são inferiores a 20 m³/h.

5.3 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NO AQUÍFERO

O objetivo principal deste item foi verificar, via simulação computacional, como seria a resposta do Aquífero, em termos de alteração das condições de fluxo, diante do acionamento de poços desativados. Nesse contexto, a simulação utilizou, como condição

inicial, a superfície do lençol levantada no item 5.1. É conveniente lembrar que tal superfície é resultante de gradientes naturais e de gradientes perturbados pela presença dos poços que já estavam em operação. Dessa forma, a continuidade do bombeamento desses poços não mais provoca grandes alterações na superfície piezométrica inicial. Na simulação, tais perturbações foram induzidas pela adição de novos poços no sistema. Esses poços correspondem àqueles desativados, listados na Tabela 11 do item 4.4, cuja vazão imposta foi a de outorga. No cenário simulado, o acionamento de todos os poços desativados ocorreu concomitantemente, que trata-se da situação mais crítica.

Nos aquíferos em geral, o efeito do bombeamento contínuo é gerar rebaixamentos crescentes na superfície piezométrica, no entorno dos poços tubulares. Todavia, a variação dos rebaixamentos com o tempo, em um ponto próximo do poço, assemelha-se a uma curva logarítmica, com elevados gradientes nos tempos iniciais de bombeamento (grandes rebaixamentos nos instantes iniciais) e com a atenuação dos gradientes à medida que o tempo de bombeamento contínuo aumenta. Após muito tempo de bombeamento, a tendência é que a variação dos rebaixamentos seja muito lenta. A Figura 52 ilustra o comportamento da curva de rebaixamentos *versus* tempo.

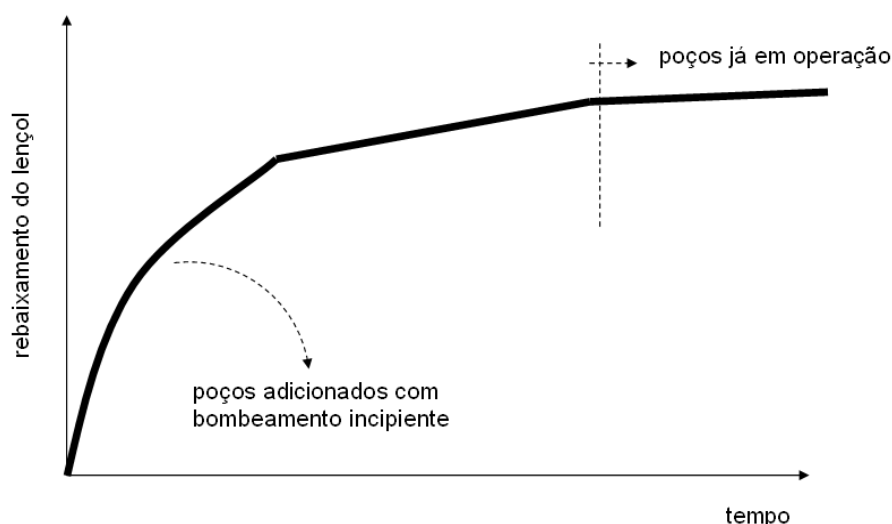


Figura 52 – Esquema de variação temporal dos rebaixamentos na vizinhança de um poço ativado.

O comportamento da curva de rebaixamentos *versus* tempo foi introduzido na simulação. Nesse sentido, o tempo zero foi imposto como o início de operação dos poços adicionados, os quais induziriam os maiores rebaixamentos nos instantes iniciais, segundo ilustra a

Figura 52. Como os poços que já estavam em funcionamento há mais tempo não provocam mais rebaixamentos significativos e seus efeitos já foram levados em conta na superfície piezométrica inicial, seu comportamento é semelhante ao trecho final da curva. Para adaptar esse comportamento, a simulação impôs, para os poços mais antigos, passos de tempo na ordem de 100 mil vezes menores do que aqueles considerados para os poços de bombeamento incipiente.

A Figura 53 ilustra a disposição dos poços antigos e dos poços adicionados (reativados), bem como a localização das principais baterias da cidade. Em termos de simulação, a região de 8 x 8 km foi discretizada por uma malha de 50 x 50 nós. Conforme os procedimentos descritos no capítulo 4, seguiu-se um esquema explícito, onde a solução avançava no tempo mediante incrementos temporais. No caso específico desta simulação, os passos de tempo foram da ordem de 6 h. A simulação cobriu um espaço de tempo de dois meses.

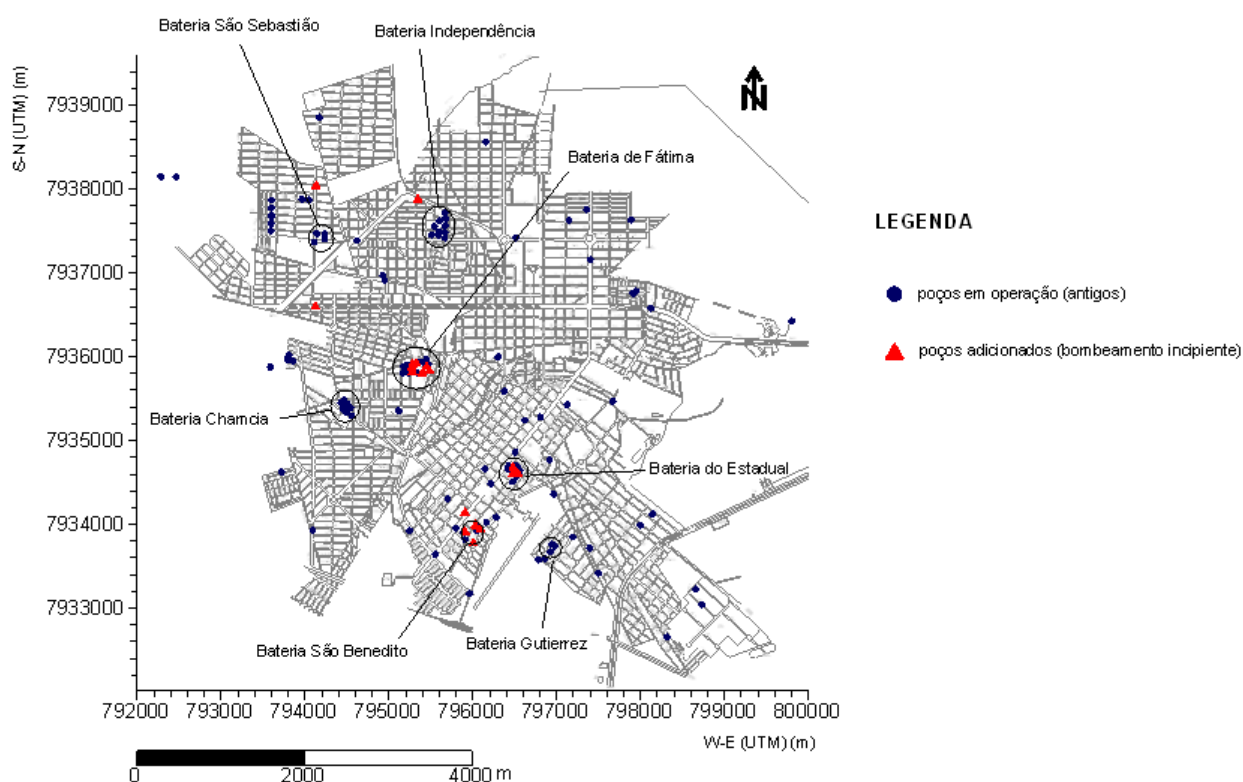


Figura 53 – Distribuição dos poços que já estavam em operação e dos poços reativados. Localização das principais baterias de poços da cidade.

Os resultados ilustrados neste item permitem comparar a situação inicial com a situação final ($t = 60$ dias), identificando as perturbações induzidas pela reativação dos poços na vizinhança de algumas das principais baterias.

Na Figura 54 são ilustradas as curvas de cota piezométrica e os vetores de velocidade para a vizinhança da Bateria São Sebastião. O poço em vermelho foi reativado com uma vazão de $20 \text{ m}^3/\text{h}$. Nota-se que, no instante inicial, os vetores de fluxo tendem a convergir para os poços alinhados que já estavam em operação. Após 60 dias, essa tendência geral não sofre alteração substancial, todavia é possível perceber que o poço reativado provoca atração dos vetores de fluxo mais próximos.

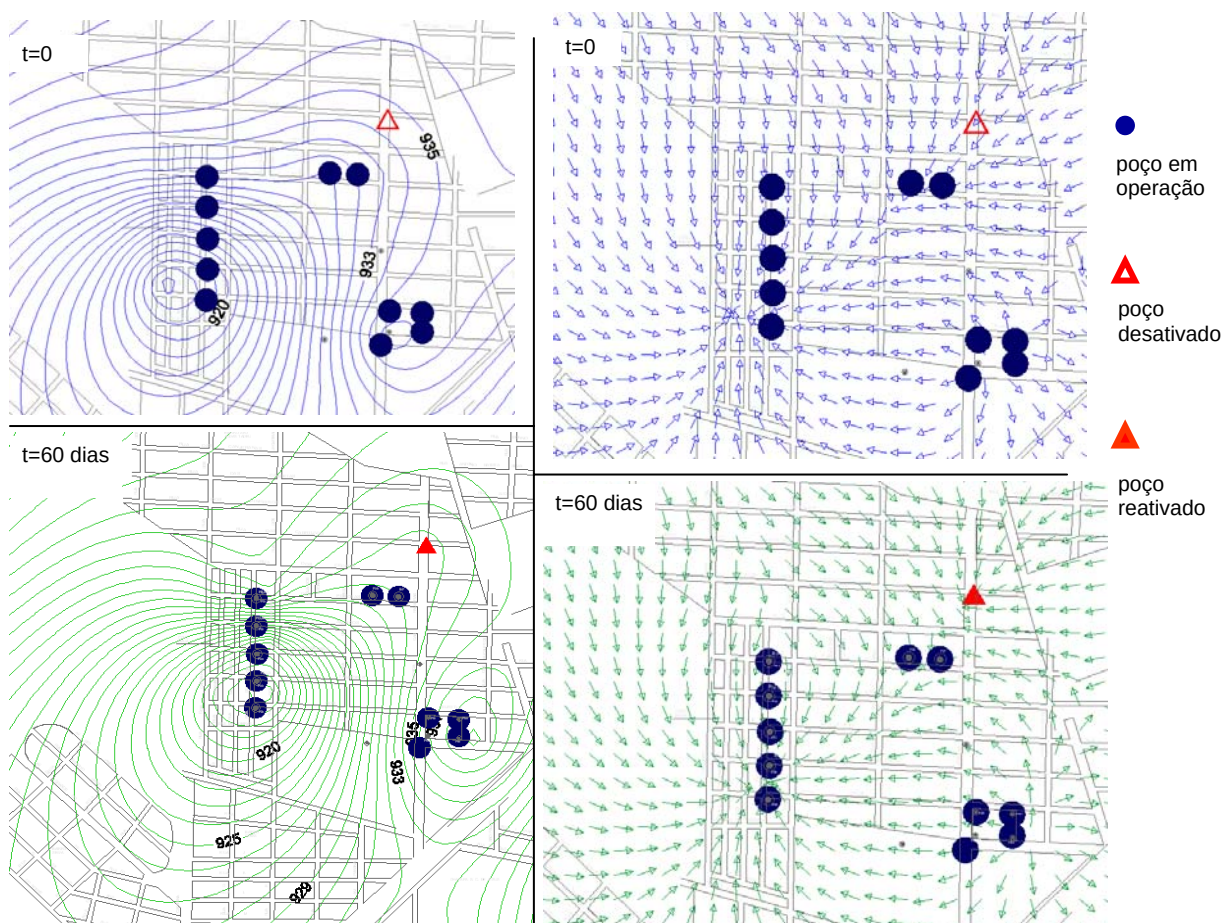


Figura 54 – Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança da Bateria São Sebastião

Na Figura 55, é ilustrada a vizinhança da Bateria Independência, com reativação de um poço próximo que extrai $20 \text{ m}^3/\text{h}$. Nesse caso, as linhas de fluxo convergem essencialmente para a bateria de poços, de forma que essa tendência não muda no cenário

de 60 dias. O poço adicionado não induz perturbações sensíveis nos padrões de escoamento iniciais.

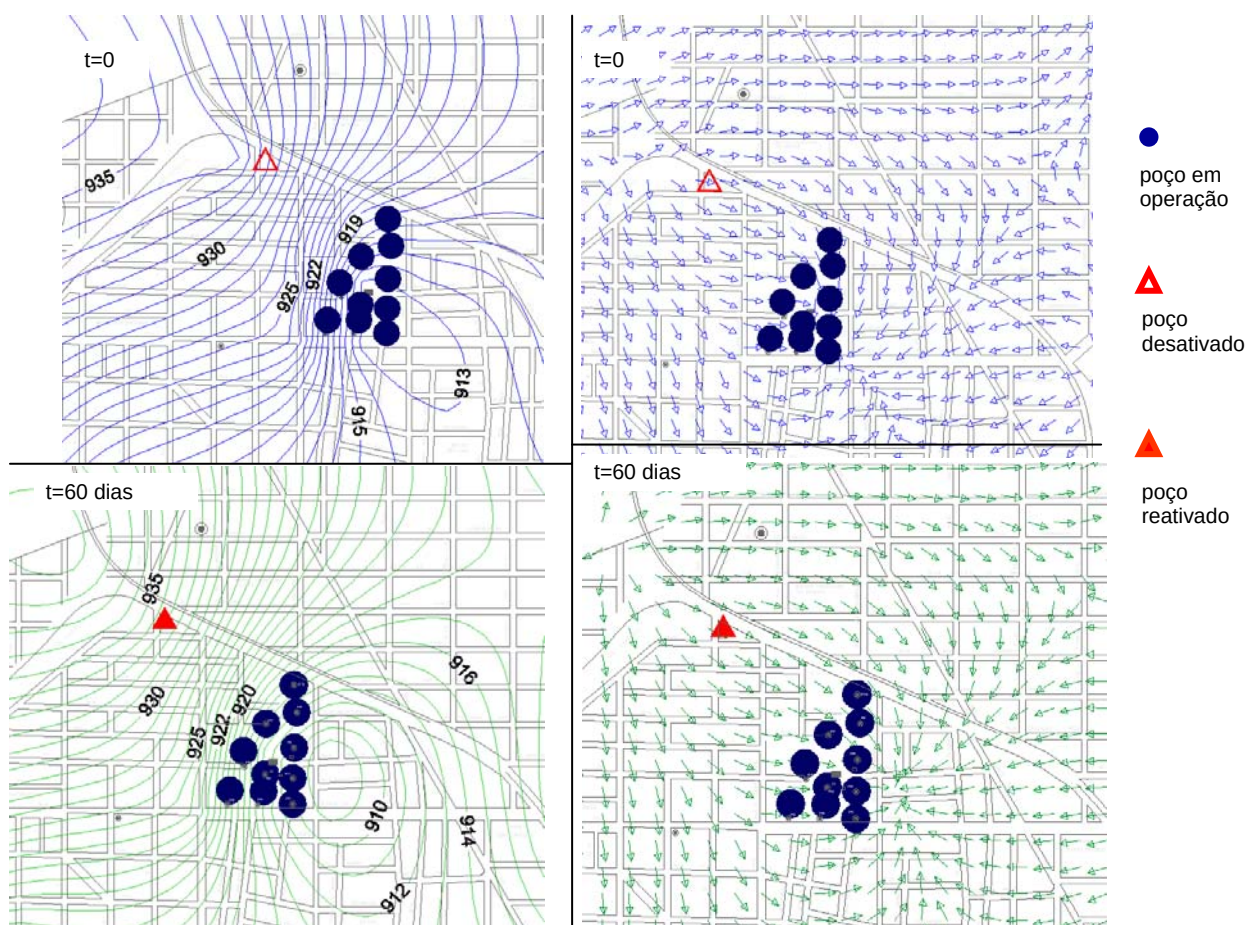


Figura 55 – Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança da Bateria Independência

Na Figura 56, é ilustrada a vizinhança das Baterias São Benedito (a sudoeste) e do Estadual (a nordeste). A Bateria do Estadual provoca convergência mais acentuada dos vetores de fluxo. Nota-se que há direcionamento do escoamento para o sul da região ilustrada, condicionado muito mais por gradientes naturais que mergulham com o declive do terreno, do que pela operação dos poços da Bateria São Benedito. Nesse caso, os poços dessa bateria apenas atraem vetores de fluxo muito próximos. No cenário de 60 dias, apenas nota-se alteração mais significativa no entorno de um poço, reativado com $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ao norte, próximo da Bateria São Benedito, em direção ao qual os vetores de fluxo mais próximos tendem a convergir.

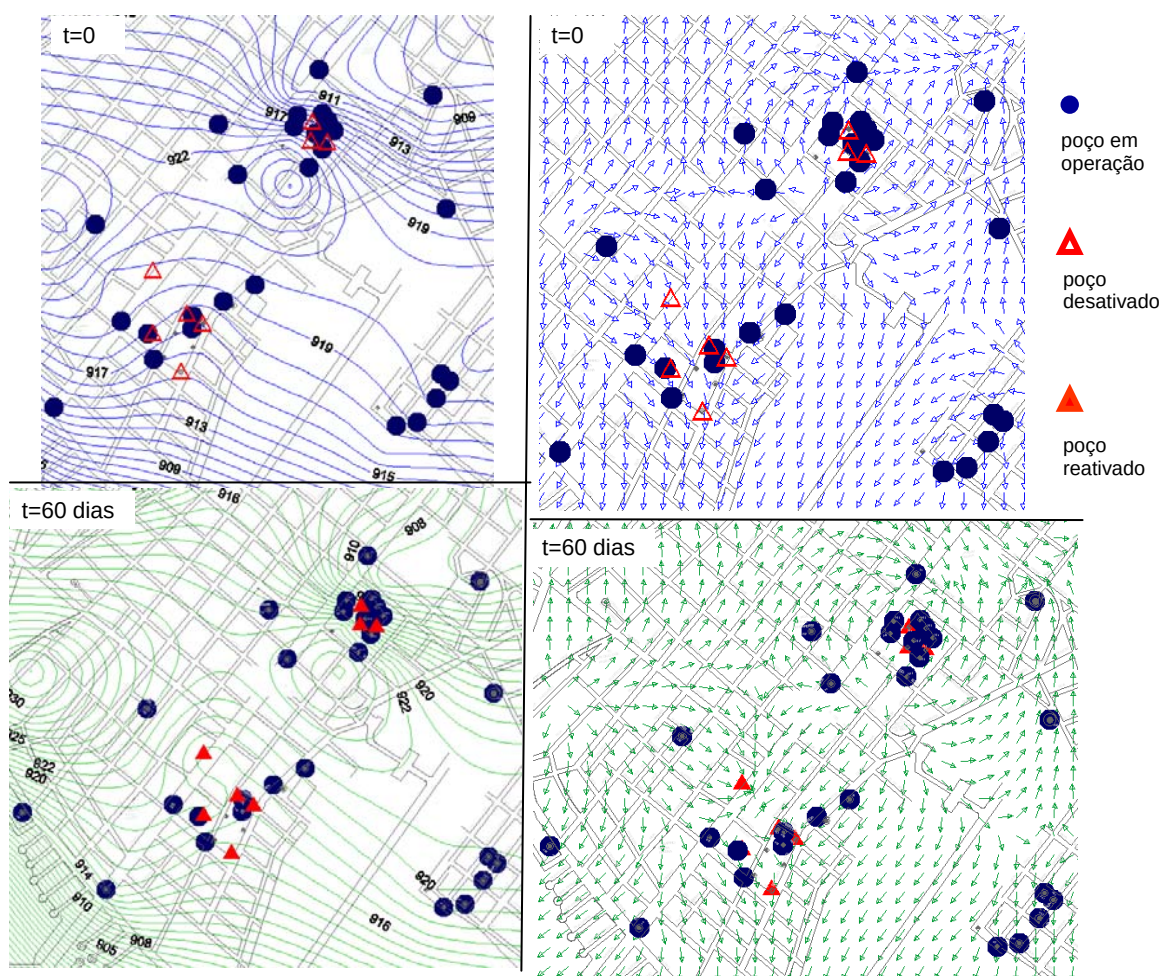


Figura 56 – Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança das Baterias São Benedito e do Estadual

No esquema ilustrado pela Figura 57, tem-se a vizinhança das Baterias Chamcia (a sudoeste) e de Fátima (a nordeste da área ilustrada). Nesse caso, foram reativados 7 poços pertencentes a essa última bateria, os quais, somados, extraem uma vazão de $34 \text{ m}^3/\text{h}$ ao todo, com vazões individuais variando de 5 a $10 \text{ m}^3/\text{h}$. O padrão de escoamento inicial não sofre alterações pela introdução desses poços, os quais possuem vazões pequenas.

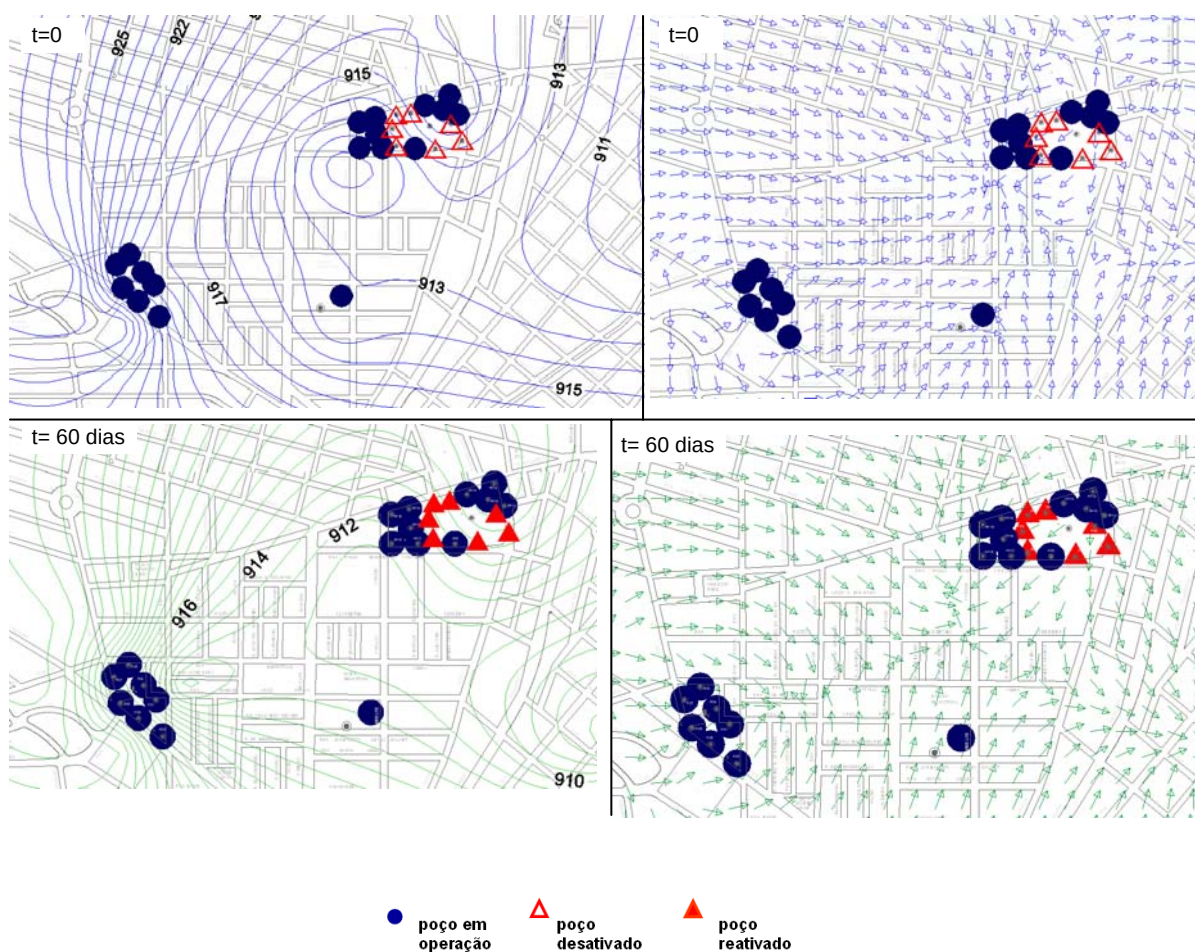


Figura 57 - Cotas da superfície piezométrica e vetores de velocidade na vizinhança das Baterias Chamcia e de Fátima

De uma maneira geral, os resultados simulados para 60 dias não indicaram perturbações significativas nos padrões de escoamento iniciais. Isto deveu-se ao fato dos poços de bateria reativados apresentarem pequenas vazões, o que condicionou pequenos rebaixamentos. A mesma conclusão pode ser estendida no caso de poços isolados. Todavia, faz-se a ressalva de que o bombeamento indiscriminado de novos poços pode ser extremamente prejudicial para o manancial, principalmente nas regiões onde a espessura saturada e a transmissividade do Aquífero assumem valores mais reduzidos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A partir da interpolação espacial de dados primários foi possível construir mapas que representam a distribuição das características geométricas e dos parâmetros hidrogeológicos do Aquífero Bauru, subjacente à zona urbana de Araguari, MG.

Os resultados evidenciaram que a porção saturada, que constitui o sistema aquífero Bauru subjacente à zona urbana de Araguari, está sujeita a sensíveis variações de espessura e de profundidade. Neste último caso, destaca-se a presença de baterias de poços, distribuídas na zona urbana, que contribuem para os rebaixamentos mais acentuados da superfície piezométrica. Por outro lado, a proximidade da superfície do lençol com o talvegue principal da cidade (córrego brejo Alegre) chama a atenção para a vulnerabilidade à poluição do aquífero nesses setores.

Em termos de parâmetros hidrogeológicos, percebe-se que a condutividade hidráulica e a transmissividade assumem distribuições heterogêneas, ao passo que o rendimento específico assume valores mais uniformes na área analisada, em função da pequena quantidade de poços analisados. As velocidades aparentes do escoamento, calculadas pela Lei de Darcy evidenciam valores absolutos maiores nas proximidades dos poços, especificamente nas baterias, cuja extração contínua de água acentua os gradientes piezométricos locais. Outros setores com gradientes piezométricos mais elevados são evidenciados nas porções nordeste e sul da cidade, bem como no entorno do córrego Brejo Alegre. Nesses casos, entretanto, tratam-se de gradientes naturais em setores de declives acentuados do terreno, uma vez que essas regiões encontram-se distantes de poços tubulares com extração significativa. Salienta-se que a elaboração do mapeamento, a partir de dados pontuais primários, constitui uma importante ferramenta para a gestão de aquíferos situados abaixo de zonas urbanas.

A partir do conhecimento da distribuição das características geométricas, principalmente da espessura saturada, e dos parâmetros hidrogeológicos, foram feitas análises para

identificação de regiões mais propícias à exploração. Nesse contexto, os parâmetros/variáveis analisados foram a espessura saturada, a transmissividade e o rendimento específico, todos eles adimensionalizados pela relação com o valor máximo observado. A conclusão geral das três análises realizadas é que as regiões planas, ao norte e noroeste da cidade são mais propícias à extração de grandes vazões. A mesma conclusão pode ser estendida para regiões planas no centro-oeste e ao sul da cidade. Essas regiões são condizentes com aquelas de onde atualmente são extraídas as maiores vazões.

A simulação de um cenário com a reativação dos poços atualmente desativados foi realizada, considerando suas vazões de outorga. O objetivo foi verificar a resposta do aquífero às perturbações induzidas por esses novos poços. De uma maneira geral, os resultados simulados para 60 dias não indicaram perturbações significativas nos padrões de escoamento iniciais. Contribuiu para isto o fato dos poços de bateria reativados apresentarem pequenas vazões, o que condicionou pequenos rebaixamentos. A mesma conclusão pode ser estendida para os poços isolados que foram reativados na simulação. Todavia, é importante comentar que o bombeamento indiscriminado de um grande número de novos poços pode ser extremamente prejudicial para o manancial, principalmente nas regiões onde a espessura saturada e a transmissividade do Aquífero assumem valores mais reduzidos.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAL TEÓRICO

ABGE. Ensaios de Permeabilidade em Solos – Orientação para sua execução no campo. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1996.

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

ALMG – Assembléia Legislativa de Minas Gérias.2001. Disponível em <<http://www.almg.gov.br/minmg/m3504.asp>> . Acesso em 23 de junho 2009.

ANA – Agencia Nacional de Águas. Panorama da qualidade das águas subterrâneas. Brasília: ANA. 2005.

BARROS, J. G. C. As águas subterrâneas ou águas que brotam da Terra. 2008. Disponível em: <http://revistadasaguas.pgr.mpf.gov.br/artigos/as-aguas-subterraneas-ouas-aguas-que-brotam-das-pedras> Acesso em 23 de maio de 2009.

ALHA, B. H. L. Glossário de Engenharia Ambiental. República Federativa do Brasil, Ministério de Minas e Energia, DNPM, 1986.

BEAR, J. Dynamic Fluids in porous media. American Elsevier, New York, USA. 1972

_____. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York, USA. 1979.

BERTOL, G. A. Avaliação da Recarga Anual no Aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

BORGES, K. L. A. Verdade sobre a água em Araguari. 2007.

BOSCARDIN BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. da. Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do MERCOSUL. Rio de Janeiro: Fundação Roberto Marinho, 2004.

CAPUCCI, E.; MARTINS, A. M.; MANSUR, K. L.; MONSORES, A. L. M. Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas. DRMRJ- Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.

COSTA, A.M, Modelo numérico de fluxo em regime transitório: o caso do Aquífero Moura-Ficalho, 2006.

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

FEITOSA, A. C. F. e MANUEL FILHO, J. Hidrologia – Conceitos e Aplicações; CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Editora Gráfica LCR; Fortaleza, 1997. FJP – Fundação João Pinheiro – Governo de Minas Gerais, 2007. Disponível em: <www.fjp.gov.br> . Acesso em: fevereiro de 2009.

FRANCIS, F. O. Hidráulica de meios permeáveis: escoamento em meios porosos. Rio de Janeiro: Interciência; São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1980.

FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. Groundwater. Englewood Cliffs, New Jersey, USA. (1979).

FUNDAÇÃO IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: Abril de 2008.

FUNDO DAS UNIVERSIDADES. Avaliação dos Recursos Hídricos do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Município de Araguari, Minas Gerais, Brasil. Projeto para a proteção ambiental e desenvolvimento sustentável do aquífero Guarani, 2006.

INSTITUTO GEOLÓGICO MINEIRO (Portugal). Água Subterrânea: conhecer para preservar o futuro. Zambujal, 2001. Disponível em: <http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm>. Acesso em: 14 de junho de 2009.

JOHRSTON, R. H. Digital model of the unconfined aquifer in central and southeastern Delaware. 1977. Disponível em: <<http://www.dgs.udel.edu/publications/pubs/bulletins/bulletin15e.pdf>>. Acesso em: outubro de 2009.

KIHM, J., KIM, J., SONG, S. & LEE, G. Three-dimensional numerical simulation of fully coupled groundwater flow and land deformation due to groundwater pumping in an unsaturated fluvial aquifer system. *Journal of Hydrology. Science Direct* January, 2007.

KRUSEMAN, G. P. & RIDDER, N. A. de. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. Second edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement. 1990.

LINSLEY, R. K. & FRANZINI, J. B. *Water-Resources Engineering*. Second Edition. McGraw-Hill, 1972.

LUCKNER, L. & SCHETSTAKOW, W.M. *Migration processes in the soil and groundwater zone*. Lewis Publishers, Michigan, USA, 1991.

MASLIA, M. L. & RANDOLPH, R. B. *Methods and computer program documentation for determining anisotropic transmissivity tensor components of two-dimensional groundwater flow*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2308.

MMA – SRHU. Ministério do meio Ambiente – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. *Águas Subterrâneas, um recurso conhecido a ser protegido*. Brasília, 2007.

_____. Ministério Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº15, de 11 de janeiro de 2001. Estabelece Diretrizes Gerais para a gestão de águas subterrâneas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 de jan. 2001. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br/delibera/resolucoes/R015.htm>>. Acesso em: 17 de junho de 2009.

MOYA, A. R. *Exploração e uso do Aquífero Guarani no Triângulo Mineiro – estudo de caso: Cachoeira Dourada*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia 2007.

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

NOBRE. M, M, M.; NOBRE. R, C, C. Caracterização Hidrogeológica para o uso racional e proteção dos Mananciais Subterrâneos em Maceió, 2000.

OLIVEIRA, L. A.; CAMPOS, J. E. G. Parâmetros hidrogeológicos do sistema aquífero Bauru na região de Araguari/MG: fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água. *Revista Brasileira de Geociências*, 2004.

QUARESMA, J. E. Lei de Darcy e Aquíferos. Disponível em: http://www.http://albatroz.shs.eesc.usp.br/~ew/SHS-5854/aulas/aula_3_parafisicos2.pdf> Acesso em: agosto de 2009.

REBOUÇAS, A. C. Águas Subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 2 ed. rev. e aum. São Paulo: Escrituras, 2002.

SAE Araguari – Superintendência de Água e Esgoto de Araguari. Disponível em: <<http://www.sae.araguari.com.br/desenv.php>> Acesso em: agosto de 2009.

SILVA, R. B. G. Água subterrânea: um valioso recurso que requer proteção. São Paulo; DAAE, 2003.

SOUZA, N. A. Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas: um estudo do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

RIGHETTO. A. M. Hidrologia e Recursos Hídricos. São Carlos: EESC/USP, 1998.

VELÁSQUEZ, L. N. M.; ROMANO, A. W. Relatório Final – Caracterização Hidrogeológica do município de Araguari, MG. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

VILLELA, S. M. & MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo. McGrall-Hill do Brasil, 1975.

Anexo A

PERFIL DOS POÇOS

