

XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E XVII
ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS

MAPEAMENTO DO SISTEMA AQUIFERO BAURU SUBJACENTE À
CIDADE DE ARAGUARI-MG

José Eduardo Alamy Filho¹; Marília de Oliveira Segantini¹

Resumo – Este trabalho focou-se na elaboração de mapas que ilustram a distribuição espacial das características geométricas e dos parâmetros hidrogeológicos do sistema aquífero Bauru, sotoposto à cidade de Araguari, estado de Minas Gerais. Nesse sentido, foram mapeadas as profundidades da superfície freática, as cotas piezométricas e as espessuras saturadas do aquífero. Dentre os parâmetros hidrogeológicos mapeados, destacam-se a condutividade hidráulica, a transmissividade e o rendimento específico. Para elaboração dos mapas, foram utilizados dados primários pontuais, coletados em diversos trabalhos da literatura, os quais foram interpolados no espaço pelo método de Kriging. A área analisada foi estabelecida em 64 km², de maneira a conter a malha urbana da sede do município. Os resultados evidenciaram sensíveis variações de espessura saturada e de profundidade do lençol, havendo setores, no centro da cidade, onde o aquífero encontra-se a menos de 10 m de profundidade. Em termos de condutividade hidráulica e transmissividade, o mapeamento mostrou uma distribuição heterogênea, enquanto que o rendimento específico apresentou-se mais homogêneo. Elevados gradientes de cota piezométrica foram evidenciados sob as baterias de poços, fator que condicionou valores absolutos de velocidade mais elevados nessas regiões. A metodologia de mapeamento, descrita neste trabalho, pode ser utilizada na gestão de aquíferos urbanos.

Abstract – This paper focused on preparation of maps that illustrate the spatial distribution of characteristics and hydrogeological parameters of Bauru aquifer system, placed under the city of Araguari, at Minas Gerais State. Thus, was mapped the depth of water table, the piezometric surface elevation and the saturated thicknesses of the aquifer. The hydrogeological parameters mapped include hydraulic conductivity, transmissivity and specific yield. In this sense, were used data collected in literature which were interpolated into space by Kriging method. The analyzed area was established in 64 km², to contain the urban mesh. The results reveal sensitive variations of water table depth and saturated thickness. In some central sectors, the aquifer depth is less than 10

¹ Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Civil: Avenida João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Uberlândia-MG, CEP: 38400-902, fone: (34) 3239-4170, fax: (34) 3239-4159. E-mails: zeedu@feciv.ufu.br, mariliasegantini@yahoo.com.br.

m. In terms of hydraulic conductivity and transmissivity, mapping showed heterogeneous distribution, while the specific yield appeared more homogeneous. High gradients of piezometric surface were evidenced in gathering of wells, factor that determined high flow velocity in these regions. Mapping methodology, described in this paper, can be used in the management of urban aquifers.

Palavras-Chave – aquífero Bauru, interpolação, mapeamento.

1- INTRODUÇÃO

Em termos de abastecimento de água, as potencialidades de um manancial subterrâneo relacionam-se com o volume e a qualidade da água armazenada, com a proximidade do aquífero das áreas consumidoras e com seus parâmetros hidrogeológicos. Nesse contexto, dentre as características mais relevantes destacam-se a espessura saturada, a porosidade, a transmissividade, a condutividade hidráulica, o coeficiente de armazenamento, o rendimento específico e a capacidade específica. O conhecimento primário dessas características e parâmetros pode ser obtido a partir de prospecções, ensaios geofísicos, testes de aquíferos e testes de poços.

Os estudos da distribuição espacial dos parâmetros hidrogeológicos, além de permitirem o conhecimento mais detalhado dos aquíferos, também são importantes para sua gestão. A estimativa dos escoamentos subterrâneos, em condições naturais ou perturbadas pelo acionamento de poços tubulares, está estreitamente vinculada ao conhecimento dos parâmetros e das características geométricas do aquífero. Para aquíferos sotopostos a zonas urbanas, o mapeamento das características do manancial constitui uma ferramenta importante para o estabelecimento de projetos de utilização da água, incluindo 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 da distribuição espacial das características do aquífero atua também como uma ferramenta para sua proteção.

2- OBJETIVOS

O objetivo fundamental deste trabalho refere-se à construção de mapas que detalham o aquífero não confinado Bauru, situado sob a zona urbana de Araguari, MG, o qual também atua como o único manancial para o abastecimento de água da cidade. Nesse contexto, são apresentados

mapas relacionados com características geométricas do manancial, como cotas piezométricas e espessura saturada; bem como mapas de distribuição de parâmetros como condutividade hidráulica, transmissividade e rendimento específico.

3- ÁREA DE ESTUDO

O município de Araguari está localizado na região do Triângulo Mineiro, a 600 km de Belo Horizonte, 380 km de Brasília e 610 km de São Paulo. O município possui uma área total de 2.732 km², IBGE (2009), dos quais 54 km² são ocupados pelo perímetro urbano (ver localização na Figura 1). Segundo a contagem populacional feita pelo IBGE (2007), o município possui 106409 habitantes, sendo 91% da população, urbana. O abastecimento de água da população da cidade é feito exclusivamente por água subterrânea, nos quais 120 poços pertencentes ao sistema público exploram água do sistema aquífero Bauru, segundo Oliveira e Campos (2004).

Segundo Velásquez (2004), o relevo do município de Araguari, correspondente à bacia sedimentar do Paraná, é caracterizado por duas feições bem distintas decorrentes das variações litológicas: (1) uma superfície superior, acima de 900 m, estabelecida sobre os sedimentos arenosos do grupo Bauru; (2) uma segunda feição caracterizada por um relevo estruturado em degraus, de acordo com o número de derrames basálticos.

O grupo Bauru ocupa cerca de 42% do município, correspondendo à unidade mais significativa em extensão e produção de água (Velásquez, 2004). Ainda segundo esse autor, o grupo ocorre em cotas superiores a 880 m, com espessura média de 55m. Na zona urbana (sede) de Araguari a espessura da formação está entre 50m e 55m, conforme o cadastro dos poços tubulares da concessionária local (Superintendência de Água e Esgoto de Araguari – SAE). A espessura da camada saturada desse sistema, todavia, é variável, podendo atingir valores máximos em torno de 45 m.

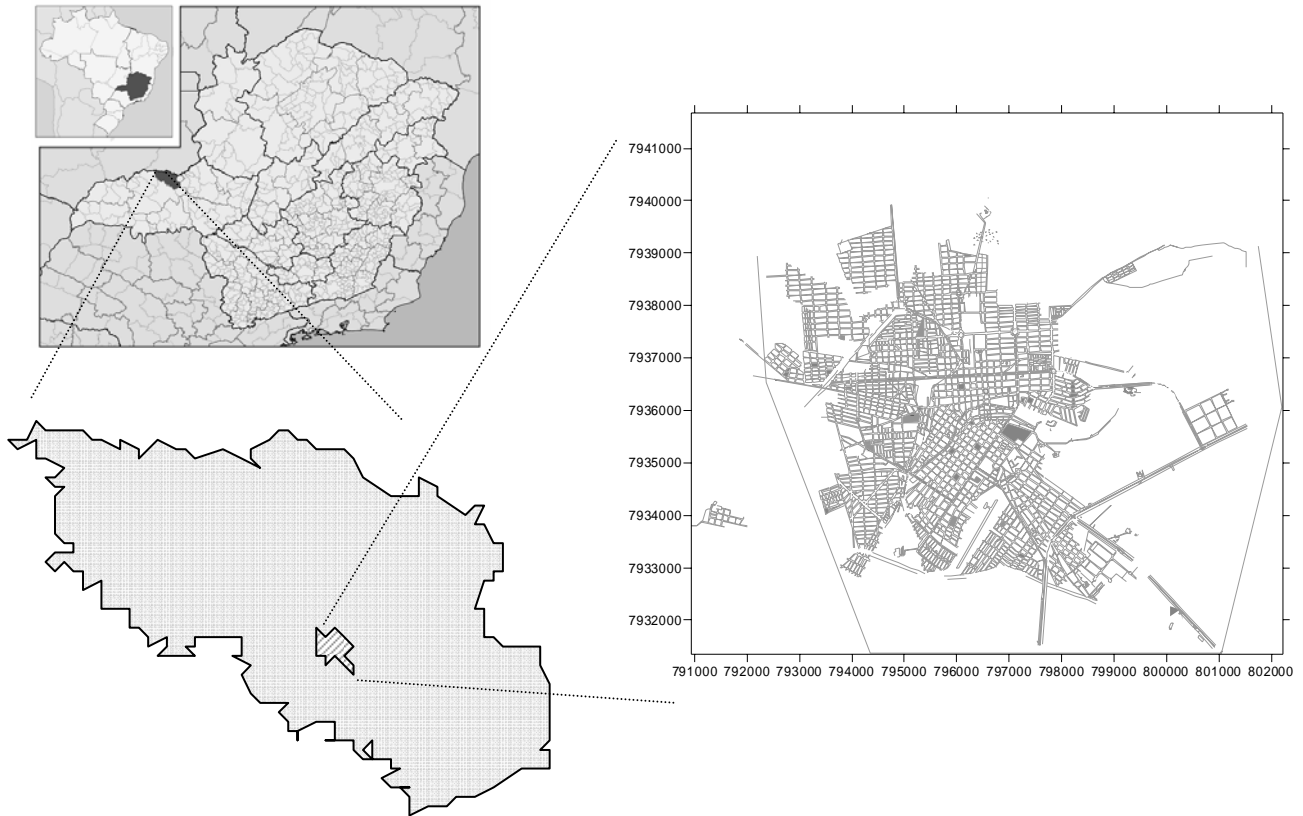


Figura 1. Localização do município de Araguari, MG, em cuja zona urbana foram mapeadas as características do aquífero Bauru. O sistema de coordenadas adotado nos estudos foi o UTM.

Na maioria dos poços tubulares destinados ao abastecimento público, a água não é injetada diretamente na rede de distribuição. Nesses casos, há uma elevada concentração de poços em áreas específicas, constituindo as chamadas baterias de poços. Nas baterias, a água extraída do aquífero, é encaminhada até caixas de areia e, em seguida, até os reservatórios. A desinfecção com cloro ocorre na saída dos reservatórios, já no trecho de distribuição.

4 – METODOLOGIA

Na etapa inicial da pesquisa, o objetivo foi reunir as informações acerca de dados primários contidos em diversos trabalhos científicos sobre o aquífero Bauru no município de Araguari (Velásquez, 2004; Oliveira e Campos, 2004; Souza, 2009; Fundo das Universidades; 2006). Dentre esses dados, citam-se cotas do nível do terreno, cotas do topo do basalto, profundidades dos níveis dinâmico e estático, parâmetros hidrogeológicos do aquífero como a condutividade hidráulica (K), a

transmissividade (T) e o rendimento específico (S_y), que é a porcentagem de água que efetivamente escoou pelo aquífero sob a influência da gravidade. Salienta-se que esses dados foram obtidos pontualmente, mas bem distribuídos na zona urbana em questão. Em alguns casos, foi necessária a conversão de coordenadas dos pontos para o sistema UTM, a partir do programa *DataGeosis*. De posse de um sistema de coordenadas cartesianas, os pontos foram distribuídos no mapa geo-referenciado da malha urbana da cidade, sendo possível, a partir desta etapa, reunir o máximo de informações do aquífero no espaço analisado. O *datum* utilizado foi o *SAD 69* (South American, 1969). Para os poços que não constavam de localizações geo-referenciadas, estas foram identificadas no mapa fornecido pela concessionária de água local, o qual fornece todos os poços de abastecimento da cidade de Araguari, ou foram coletadas em campo com GPS.

A Figura 2 ilustra a distribuição espacial dos pontos, normalmente poços ativados e desativados, onde foram obtidos os parâmetros primários do aquífero, nos diversos trabalhos encontrados na literatura.

As cotas da superfície do terreno foram tomadas com o auxílio do mapa de curvas de nível da cidade de Araguari. Este mapa, fornecido pela concessionária local, consta de curvas de nível espaçadas de 1 m, ao longo de toda a zona urbana. Com as cotas do terreno e as profundidades dos níveis estático e dinâmico, foi possível estabelecer a cota da superfície piezométrica na posição dos poços. A partir da condutividade hidráulica (K) e da transmissividade (T), foi possível calcular a espessura saturada do aquífero, sendo que alguns dados dessa espessura foram coletados diretamente de Velásquez (2004). Como a transmissividade é a capacidade de um aquífero de transmitir água horizontalmente, por unidade de largura e espessura saturada, sob um gradiente hidráulico unitário, a espessura saturada foi obtida dividindo-se a transmissividade pela condutividade hidráulica.

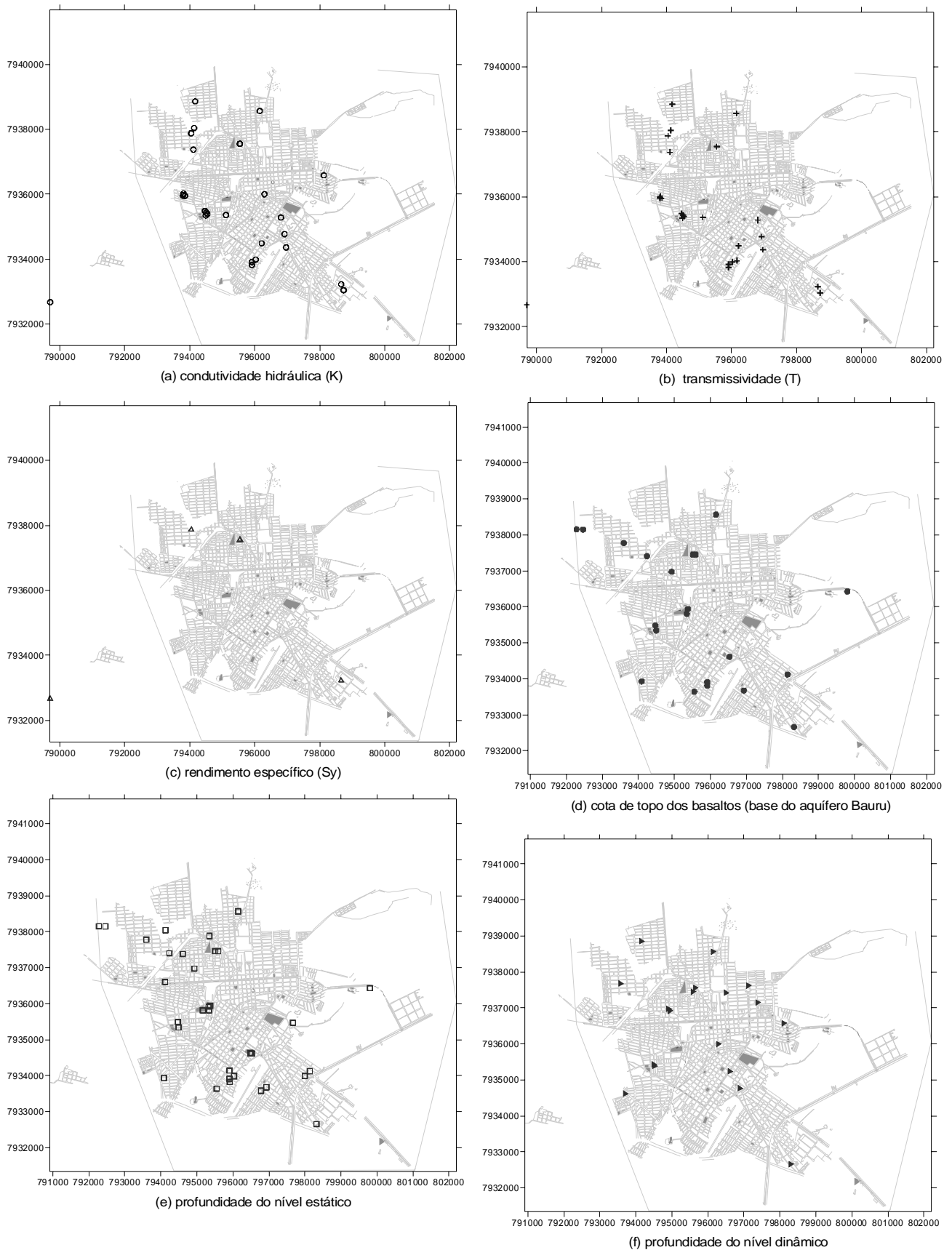


Figura 2. Rede de dados primários pontuais retirados da literatura.

Para confecção dos mapas (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. Em termos de interpolação espacial, há uma grande variedade de procedimentos matemáticos, destacando-se, entre eles, o método de Kriging. Tal método é um interpolador estocástico, baseado na taxa de alteração da variância dos pontos observados ao longo do espaço. Assim, os valores interpolados de uma variável, como as condutividades hidráulicas nos pontos ensaiados, por exemplo, podem ser estimados como:

$$\hat{z}(\vec{X}_o) = \sum_i a_i \cdot z(\vec{X}_i) \quad (1)$$

Na Equação (1), \hat{z} representa a variável interpolada na coordenada (x_o, y_o) , a_i representam os pesos atribuídos a cada uma das amostras “i”, as quais são previamente conhecidas nos poços de amostragem (x_i, y_i) . No método de Kriging, os pesos a_i variam de acordo com a proximidade entre o ponto a ser interpolado e o ponto cujo valor é conhecido, fator que estabelece uma correlação espacial entre as variáveis nesses pontos. Assim, a interpolação em pontos vizinhos aos poços tende a estimar valores de variáveis também próximos aos coletados. Para introduzir essa correlação espacial, o método de Kriging calcula os valores dos pesos com uso de uma função objetivo que minimiza a variância estimada, ou seja:

$$\sigma_i^2 = \min \left\{ \text{var} \left[z(\vec{X}_o) - \hat{z}(\vec{X}_o) \right] \right\} \quad (2)$$

A minimização da variância atua como uma característica importante deste método de interpolação. Isto ocorre porque os erros nas estimativas apresentam uma variância mínima.

A partir do conhecimento da superfície piezométrica e do estabelecimento da sua malha de interpolação, também foi possível derivar as velocidades médias de escoamento, calculadas pela Lei de Darcy. Assim, para obtenção das velocidades, a seguinte equação foi utilizada:

$$\vec{V} = -K \cdot \nabla h \quad (\text{Lei de Darcy}) \quad (3)$$

Na Equação (3), \vec{V} representa a velocidade aparente do escoamento, obtida pela Lei de Darcy, K representa a condutividade hidráulica da formação e h é a cota piezométrica do aquífero.

5 – RESULTADOS

Para confecção dos mapas, a área de estudo foi discretizada por uma malha regular de 250 linhas por 250 colunas, que permitiu a cobertura de uma área de 8 x 8 km, situada entre as coordenadas UTM EW 792000 e 800000 m, e SN 7932000 e 7940000 m. Os mapas foram gerados a partir dos valores interpolados pelo método de Kriging, o qual permitiu a construção de curvas de

contorno dos diversos parâmetros analisados. As Figuras 3 a 5 ilustram a distribuição geométrica do aquífero subjacente à zona urbana de Araguari.

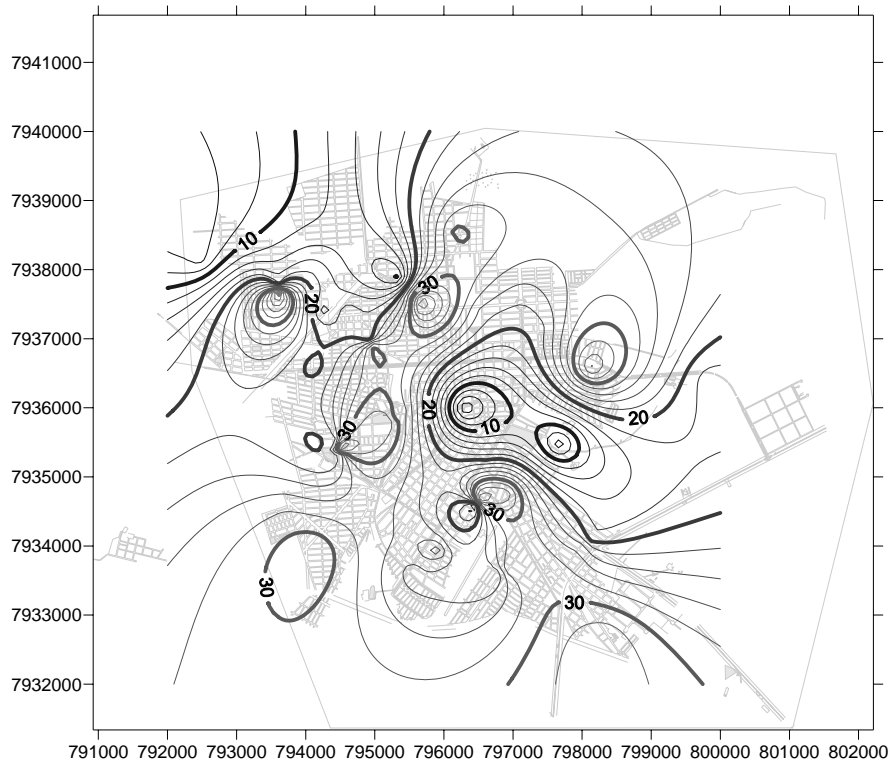


Figura 3. Profundidades (m) da superfície do lençol.

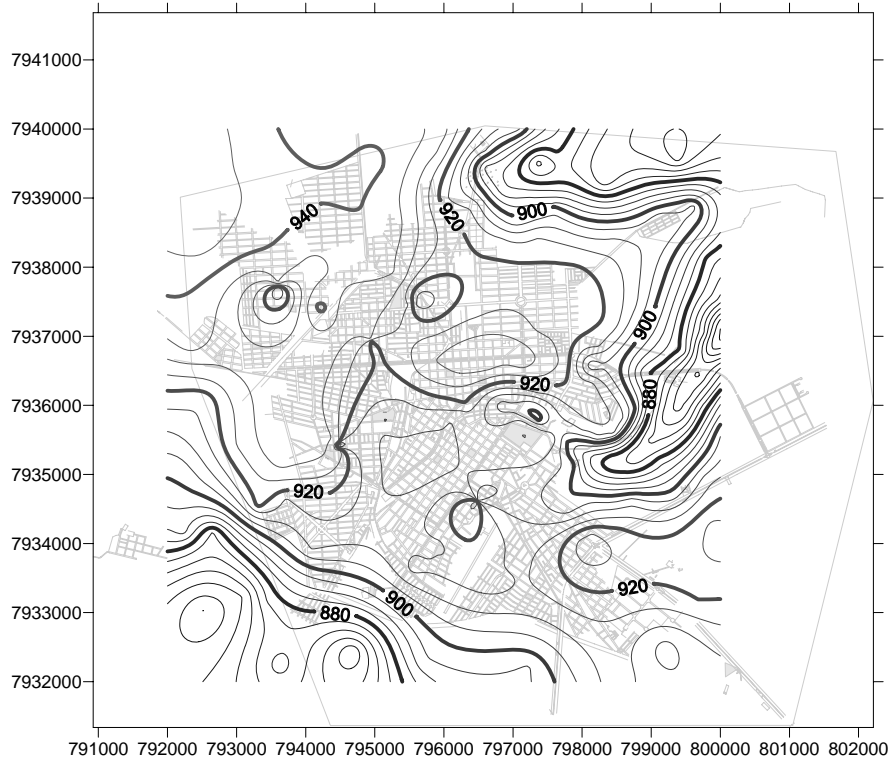


Figura 4. Cotas piezométricas (m) do sistema aquífero Bauru (superfície do lençol freático).

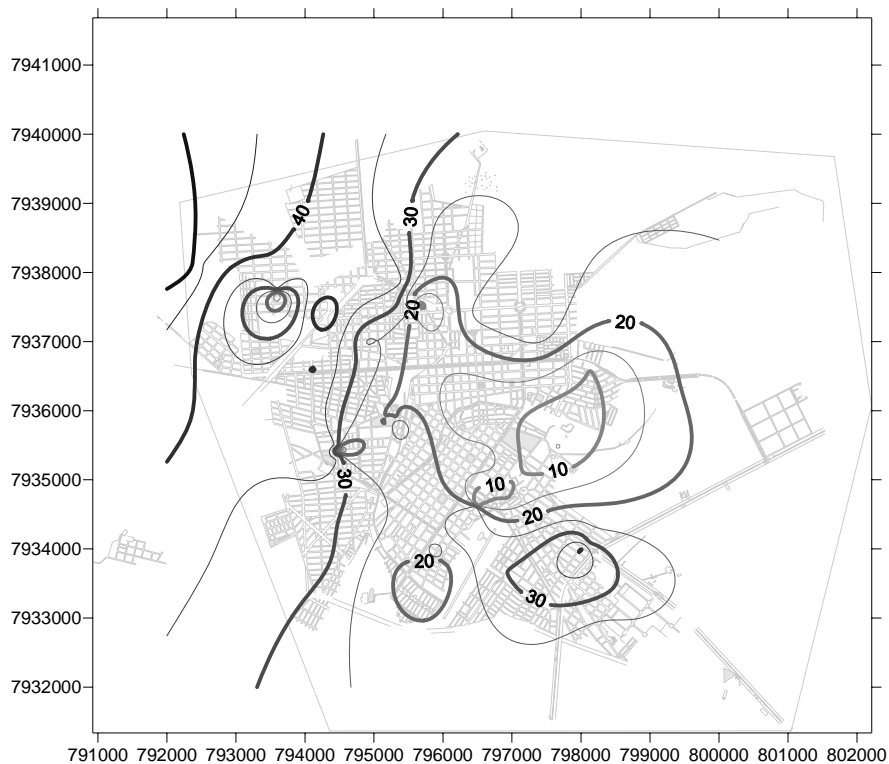


Figura 5. Espessura saturada (m) do aquífero.

As profundidades do lençol, na área analisada, variam entre 2 e 47 m. As menores profundidades são encontradas no entorno do córrego Brejo Alegre, que constitui o talvegue principal da cidade. Nesse setor, 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 decréscimo das profundidades, as quais chegam a atingir valores inferiores a 10 m. Neste último caso, essas regiões coincidem com locais onde o aquífero atinge as maiores faixas de espessura saturada, com valores superiores a 40 m. As maiores profundidades encontram-se na vizinhança das baterias de poços, fator que evidencia os rebaixamentos causados pela operação de poços muito próximos. 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.

As Figuras 6 a 8 ilustram a distribuição dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero.

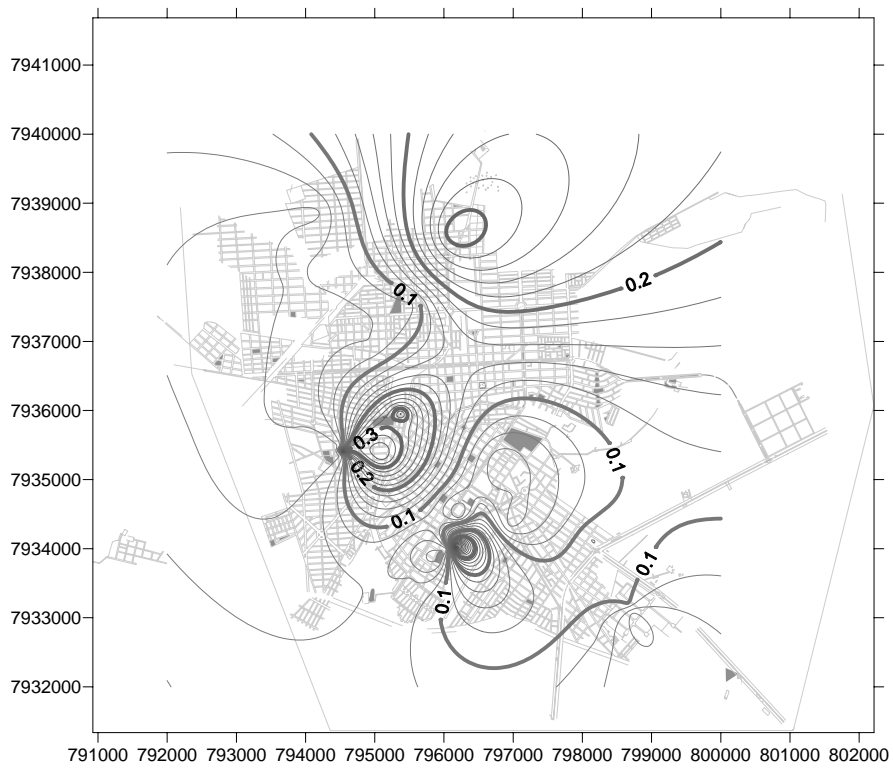


Figura 6. Contornos de condutividade hidráulica. Valores em m/h .

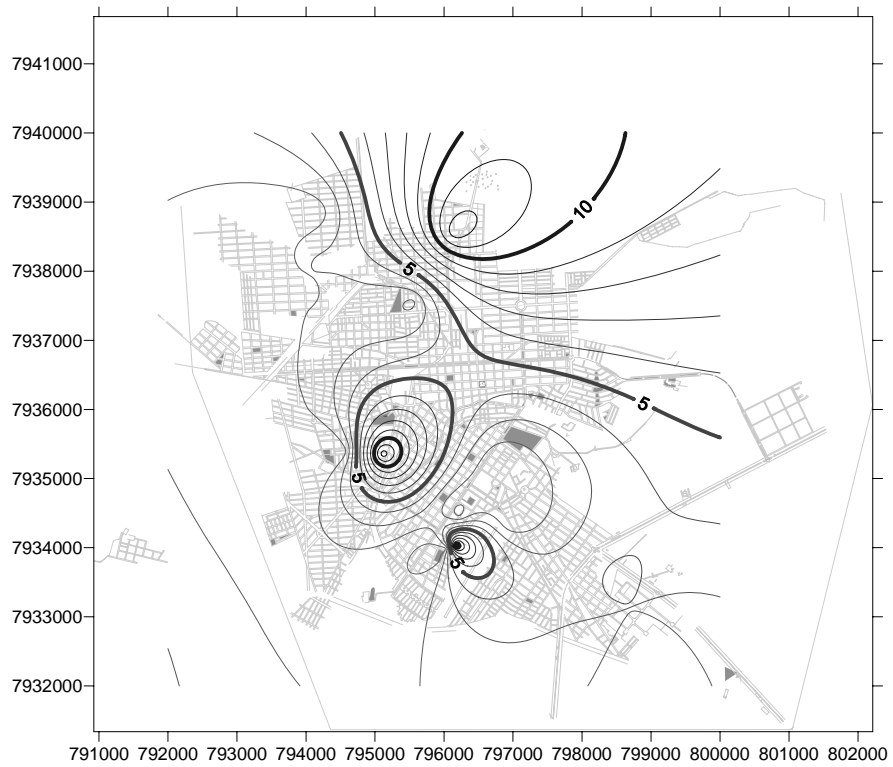


Figura 7. Contornos de transmissividade. Valores em m^2/h .

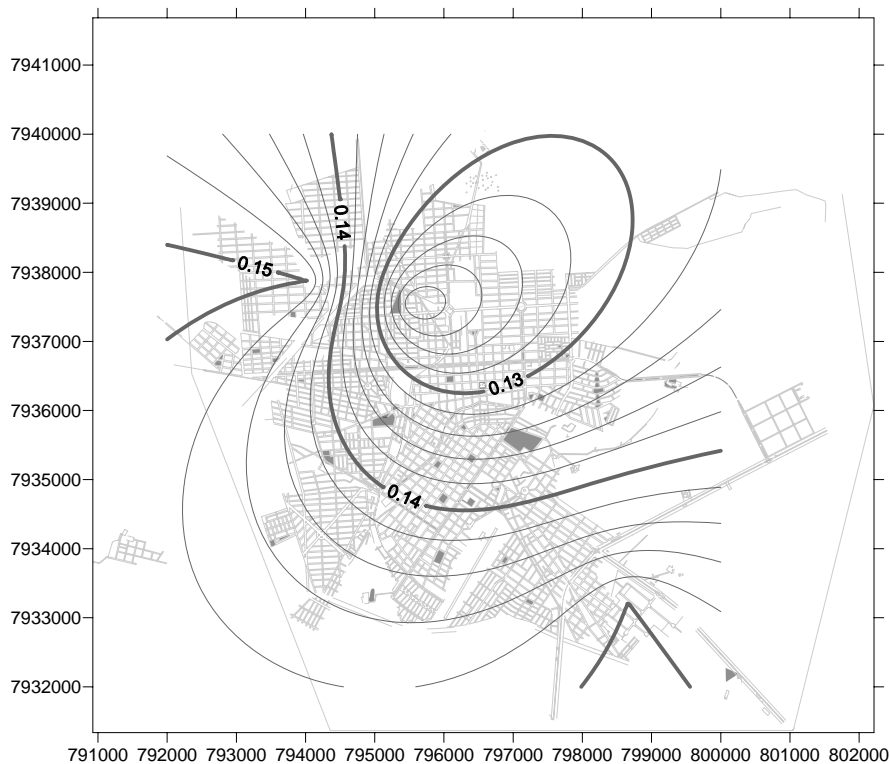


Figura 8. Contornos de rendimento específico S_y .

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 São Paulo (2005). No geral, as regiões norte-nordeste apresentam os maiores valores de condutividade hidráulica. Todavia, valores da ordem de 0,30 m/h são encontrados nas proximidades das baterias de Fátima (centro), Chancia (centro-oeste) e Gutierrez (sul). Isto destaca a distribuição heterogênea desse parâmetro na sede do município. Comportamento semelhante pode ser verificado na distribuição da transmissividade, que assume valores na faixa de 0,58 a 13 m²/h, condizentes com a faixa de variação 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 São Paulo (2005). Na zona urbana de Araguari, entretanto, percebem-se variações sensíveis deste parâmetro, em função das variações de condutividade hidráulica e de espessura saturada. Comportamento mais homogêneo, todavia, é descrito pelo mapa de rendimento específico. 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.

A Figura 9 ilustra a iso-superfície de módulo das velocidades aparentes de Darcy. Nesse sentido, percebe-se a presença de regiões isoladas com elevadas velocidades, as quais correspondem às baterias de

poços distribuídas na zona urbana. Nas laterais do córrego Brejo Alegre e no nordeste da região analisada, também é possível identificar elevadas velocidades em função dos gradientes naturais da superfície piezométrica.

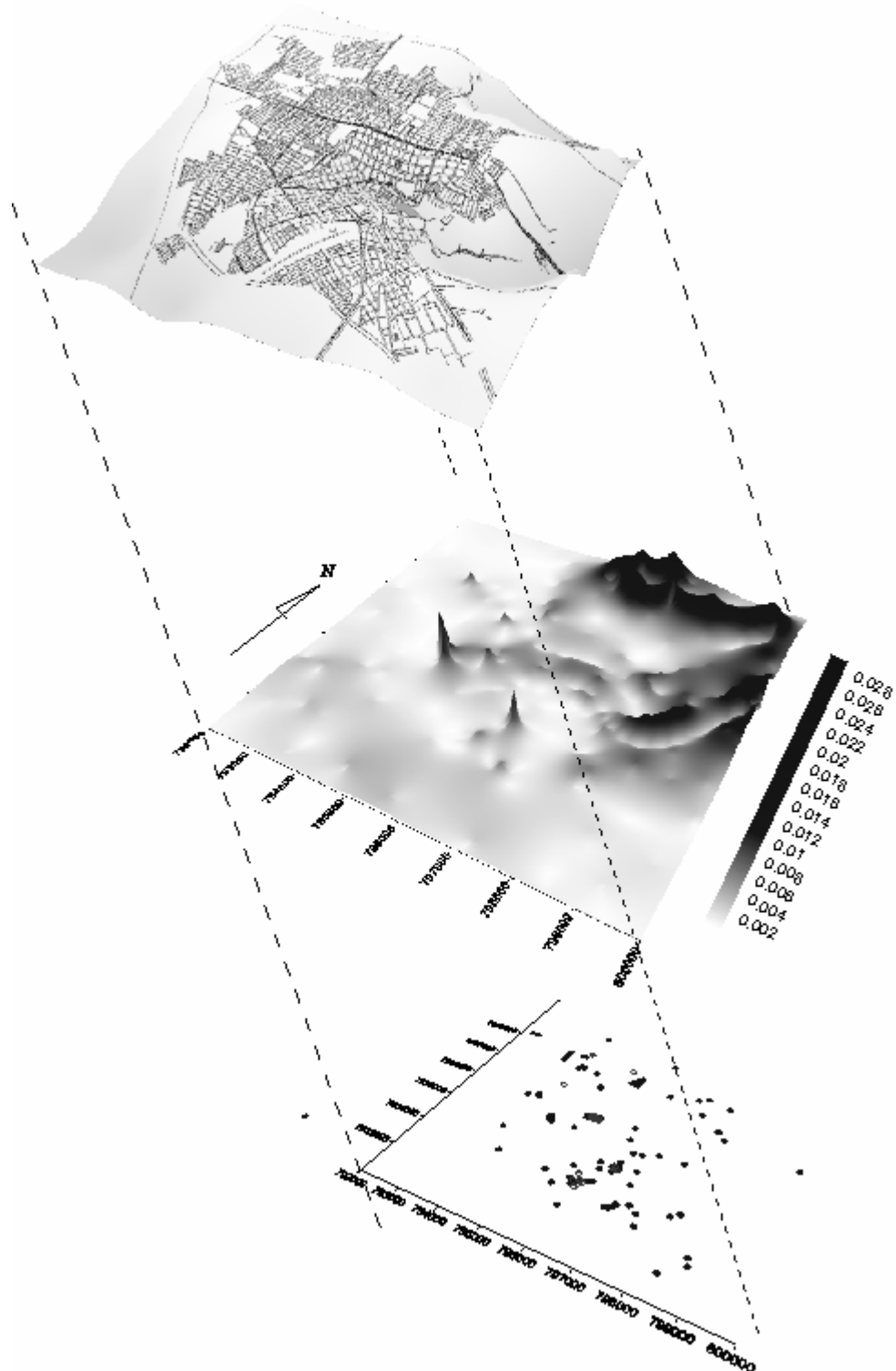


Figura 9. Módulo da velocidade aparente de escoamento (m/h), calculada pela Lei de Darcy. A superfície superior representa o relevo da cidade e, no plano inferior, representam-se os poços tubulares.

A Figura 10 ilustra a iso-superfície de vazão explotada pelos poços atualmente em operação.

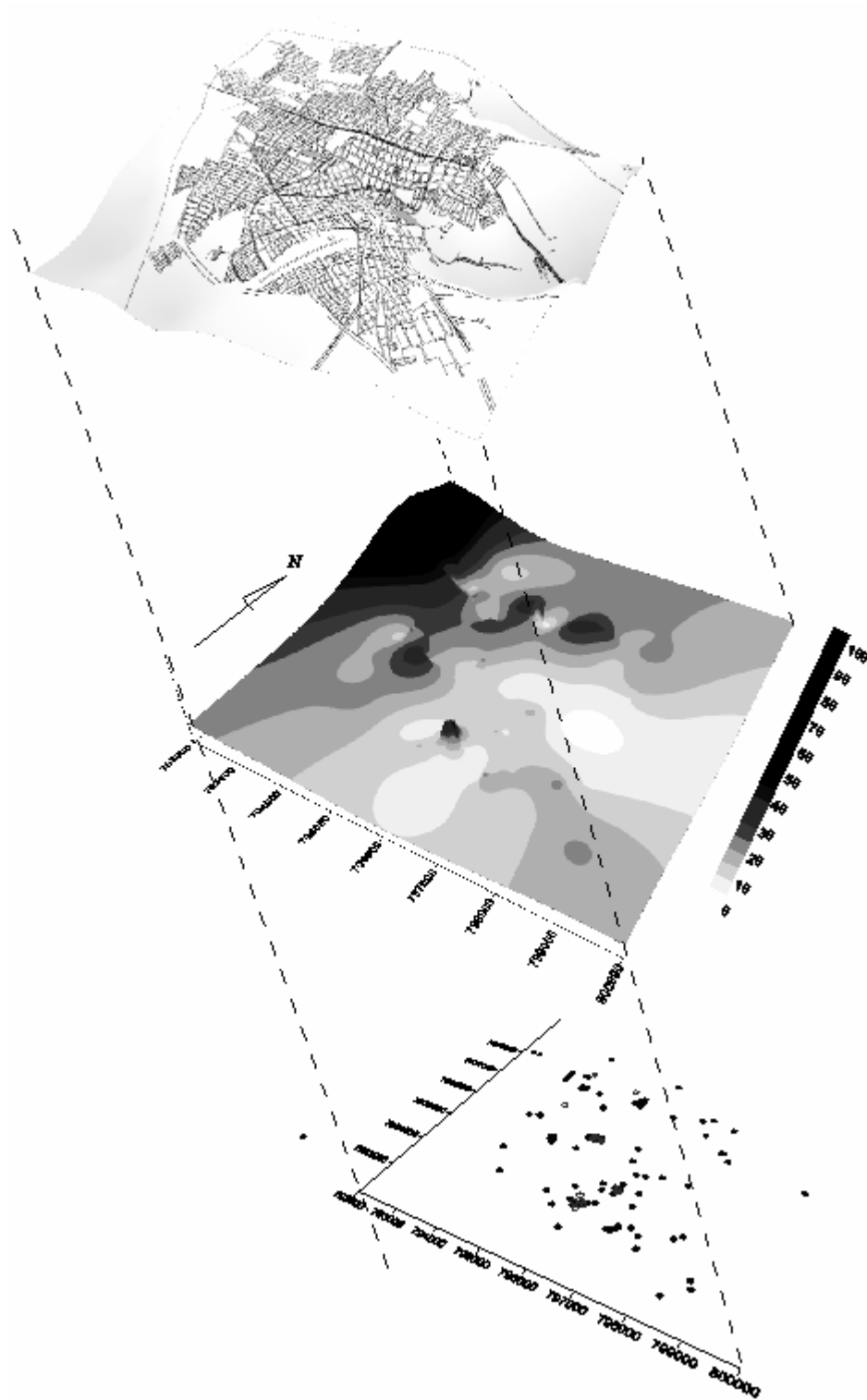


Figura 10. Distribuição das vazões atualmente explotadas por poços tubulares. Valores em m^3/h . A superfície superior representa o relevo da cidade e, no plano inferior, representam-se os poços tubulares.

Verifica-se, de forma geral, que as maiores vazões são extraídas no noroeste da cidade. Nesse sentido, destaca-se, como fator determinante, a presença de dois poços com vazões de 80 e 100 m^3/h , além das baterias de São Sebastião (4 poços com vazões entre 18 e 30 m^3/h , além de dois poços isolados com vazões de 40 m^3/h), Independência (10 poços com vazões entre 8 e 35 m^3/h), Chancia (7 poços com vazões entre 16

e 35 m³/h). 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 extrações (8 poços com vazões entre 18 m³/h e 45 m³/h).

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. 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. 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 de pressão mais elevados são evidenciados nas porções nordeste e sudeste da cidade, bem como no entorno do córrego Brejo Alegre. Nesses casos, tratam-se de gradientes naturais, uma vez que essas regiões encontram-se distantes de poços tubulares com extração significativa. Salienta-se, enfim, 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro concedido para o estudo do aquífero Bauru na região do Triângulo Mineiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FUNDO DAS UNIVERSIDADES, 2006. 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.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contagem Populacional, 2007. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 4 abr. 2010.

OLIVEIRA, L.A.; CAMPOS, J.E.G., 2004. 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*.

SÃO PAULO, Governo do Estado, 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Coordenação geral: Gerônimo Rocha. Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Instituto Geológico (IG), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

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

VELÁSQUEZ, L.N.M.; ROMANO, A.W., 2004. Relatório Final: caracterização hidrogeológica do município de Araguari, MG. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.