



MODELO NUMÉRICO DE ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO NA REGIÃO DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO – SP

Edson Wendland¹, Mateus D. Simonato², Emanuel S. Lapicciarella³, Ricardo Hirata⁴

Artigo recebido em: 27/01/2012 e aceito para publicação em: 22/08/2012

Abstract: Public water supply in São José do Rio Preto partly depends on groundwater exploitation from the Bauru Aquifer. Aiming to delimit restriction areas and abstraction control a numerical model has been developed to study groundwater resources exploitation scenarios. In this work the conceptual model, the numerical model construction, the pre-exploitation scenario and the evaluation of the pumping impacts are presented. According to the obtained results, in topographically low areas with high concentration of wells, the surface water bodies recharge the aquifer contributing for the water supply to the wells. The water balance indicates a total recharge of 76,544,173 m³/a corresponding to an average recharge rate of 200 mm/a for the whole study area. An estimated discharge of 10,123,000 m³/a represents the water volume elevated by the wells that return to the aquifer due to water losses in the distribution network and sewage collection. The exploitation rate is estimated as 33.5% of the renewable groundwater resources in the study area.

Keywords: Groundwater. Bauru Aquifer. Drawdown. Finite element method. Water balance.

Resumo: O abastecimento público de água no município de São José do Rio Preto depende em grande parte da exploração de água subterrânea do Aquífero Bauru. Com a finalidade de delimitar áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas, foi desenvolvido um modelo numérico para estudo de cenários de exploração dos recursos hídricos subterrâneos na área de estudo. Neste artigo são apresentados o modelo conceitual, a construção do modelo numérico, o cenário pré-exploração e a simulação com bombeamento para avaliação dos impactos no sistema. De acordo com os resultados obtidos, nas regiões topograficamente mais baixas, onde a concentração de poços de bombeamento é maior, os cursos d'água alimentam o aquífero, contribuindo para o abastecimento dos poços. O balanço hídrico indica que a recarga total de 76.544.173 m³/a corresponde a uma taxa de recarga média de aproximadamente 200 mm/a para a área de estudo. Aproximadamente 10.123.000 m³/a representam o volume de água elevado pelos poços, que retorna ao aquífero devido às perdas nas redes de distribuição de água e coleta de esgotos. Dessa forma, a taxa de exploração dos recursos hídricos subterrâneos renováveis é de aproximadamente 33,5% na área de estudo.

Palavras-Chave: Águas subterrâneas. Aquífero Bauru. Rebaixamento. Método de elementos finitos. Balanço hídrico.

INTRODUÇÃO

A captação de água para consumo humano ou irrigação de áreas produtivas, bem como a preocupação ecológica com a contaminação do meio-ambiente tornam necessária a proteção quantitativa e qualitativa dos reservatórios hídricos subterrâneos. Por outro lado, em obras de engenharia de construção ou mineração, impactos resultantes de atividades antropogênicas podem ser minimizados através da adoção de medidas preventivas baseadas no conhecimento da infiltração e movimento de água no solo.

Através da formulação de modelos matemáticos, os profissionais das áreas de Hidrogeologia e Hidráulica estudam teoricamente o movimento de águas subterrâneas, reduzindo o tempo e recursos exigidos pelos testes de campo ou ensaios realizados em laboratório. Ferramentas matemáticas e numéricas vêm intensamente substituindo alguns tipos de investigações experimentais, tendo em vista vantagens operacionais, principalmente em termos de custo e tempo.

¹ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (ew@sc.usp.br).

² Servmar Serviços Técnicos Ambientais Ltda (mateus.simonato@servmarunipetro.com.br).

³ Servmar Serviços Técnicos Ambientais Ltda (emanuel.lapicciarella@servmarunipetro.com.br).

⁴ Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (rhirata@usp.br).

No município de São José do Rio Preto, o abastecimento público depende em grande parte da exploração de água subterrânea do Aquífero Bauru. Devido ao grande número de poços perfurados e consequente exploração do recurso hídrico subterrâneo, intensos rebaixamentos de nível têm sido observados, principalmente, nas áreas centrais da cidade. Com a finalidade de delimitar áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas, foi desenvolvido um modelo numérico para estudo de cenários de exploração dos recursos hídricos subterrâneos na área de estudo. Neste artigo são apresentados o modelo conceitual, a construção do modelo numérico, o cenário pré-exploração e a simulação com bombeamento para avaliação dos impactos no sistema.

Modelo matemático

O modelo matemático consiste na representação dos processos físicos que ocorrem na Natureza, com o auxílio de equações matemáticas. O processo físico de escoamento de água subterrânea em meio saturado é descrito pela equação (BEAR, 1972; FETTER, 1993)

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(\mathbf{K} \cdot \nabla h) + R_v \quad (1)$$

válida para aquíferos tridimensionais em regime transiente, sendo

S_s - coeficiente de armazenamento específico (1/m);

h - carga hidráulica (m);

∇ - Nabla - operador matemático, indicador de divergente (-);

\mathbf{K} - tensor de condutividade hidráulica nas direções x , y e z (m/s);

R_v - termo de fonte, em pontos discretos do domínio (1/s).

Essa equação geral pode ser simplificada para simulação de aquíferos confinados ou livres, em regime permanente, com ou sem termos de fonte.

No caso da área de estudo na região urbana do município de São José do Rio Preto, o corpo hídrico subterrâneo é considerado heterogêneo e anisotrópico. Em regime permanente (estacionário), a equação é simplificada para

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hK_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hK_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hK_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = R_v \quad (2)$$

A partir dessa equação, no módulo de processamento numérico baseado no Método de Elementos Finitos, são calculadas as cargas hidráulicas

e vetores de velocidade na área de estudo, com base nas condições de contorno e parâmetros físicos levantados em campo. Na construção do modelo numérico foi utilizado o pacote SPA (Simulação de Processos em Aquíferos), desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional da Escola de Engenharia de São Carlos.

O pacote SPA (WENDLAND et al., 2004; WENDLAND et al., 2005) consiste em um código computacional baseado no método de elementos finitos destinado à simulação numérica de escoamento e transporte de solutos tridimensional em meios porosos heterogêneos. O pacote dispõe de recursos de pré e pós-processamento, sendo, portanto, destinado à execução de todas as atividades necessárias à construção do modelo numérico.

Resumidamente, as características principais do software são:

- Método de elementos finitos;
- Modelos bi-dimensionais, tri-dimensionais e combinação de ambos;
- Problemas em regime permanente e transiente;
- Meios porosos e/ou fraturados, saturados e não-saturados;
- Transporte de poluentes, considerando os processos de advecção, dispersão, adsorção e decaimento.

METODOLOGIA

Modelo conceitual e dados iniciais

O modelo conceitual consiste na descrição das suposições elaboradas visando à compreensão dos mecanismos físicos básicos que ocorrem na área de estudo, sendo realizadas no início do processo de construção do modelo numérico. Nas demais etapas do processo, o modelo conceitual inicial acaba sendo revisto, de acordo com os resultados obtidos.

Visando reproduzir a situação de escoamento atual e avaliar o impacto da exploração de água por poços na região urbana de São José do Rio Preto, o domínio do estudo foi delimitado pelos córregos e divisores que englobam toda a concentração de poços existentes na área de interesse, adequando-se às condições de contorno naturais da região. A área total do modelo perfaz 385,75 km².

Os dados obtidos em campo e em mapas topográficos foram organizados em ambiente SIG. Após a espacialização na área estabelecida para o modelo numérico, os dados foram exportados em raster de 30 m x 30 m em formato compatível com o pacote SPA.

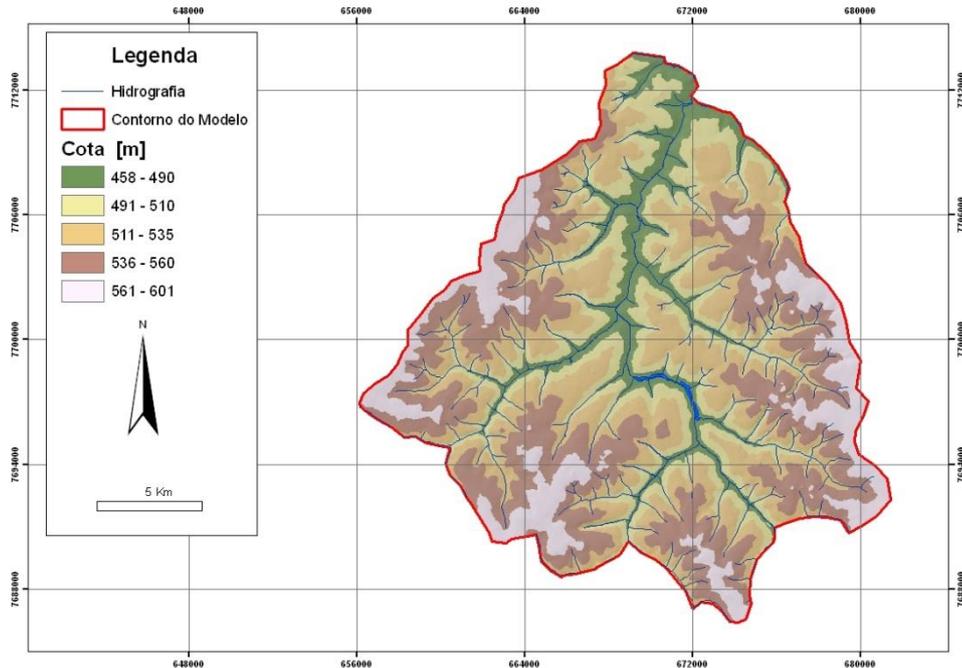


Figura 1 - Modelo Digital do Terreno (MDT) gerado para a área de estudo.

Figure 1 - Digital Elevation Model (DEM) for the study area.

O início das análises em SIG deu-se com a construção do modelo digital do terreno (MDT), que são os dados digitais mais comuns para representar a forma da superfície. Os MDTs são matrizes (n linhas por m colunas), em que cada célula ou pixel representa um valor de elevação. A Figura 1 mostra o MDT produzido para a região de São José do Rio Preto.

A partir da análise da descrição de perfis de poços perfurados na região, foi elaborado o modelo conceitual da área de estudo. Este modelo consiste de duas camadas, sendo que o Grupo Bauru foi diferenciado em dois pacotes sedimentares, separados pela interface das formações Santo Anastácio e Adamantina e limitado inferiormente pelas rochas basálticas da formação Serra Geral.

O Sistema Aquífero Bauru divide-se em duas unidades aquíferas, a Formação Adamantina que aflora na superfície e a Formação Santo Anastácio, em subsuperfície, com sua base em contato discordante com o topo das rochas basálticas impermeáveis da Formação Serra Geral (IPT, 1999).

A unidade Adamantina, depositada em ambiente flúvio-lacustre, sob regime de clima quente e seco no Cretáceo Superior, é composta por arenitos de granulação fina a muito fina, cor de róseo a castanho, bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, de cor castanho-avermelhada a cinza-castanho, dispostos em camadas de aspecto

maciço ou plano-paralelos, e estratificações cruzadas de pequeno e médio porte. Tem ampla distribuição no oeste e noroeste do estado de São Paulo e oeste de Minas Gerais.

A unidade Santo Anastácio é composta por arenitos de granulação fina a média, marrom-avermelhados a arroxeados, com grãos arredondados a subarredondados, cobertos por película limonítica. A espessura total média dos sedimentos é de aproximadamente 170 m, sendo menor na porção leste (120 m) e maior na porção oeste (até 250 m). A unidade Adamantina possui espessura média de 120 m, enquanto que a unidade Santo Anastácio possui média de 50 m. Uma descrição detalhada do Aquífero Bauru foi apresentada por Barison e Kiang (2004).

O Sistema Aquífero Bauru ocupa aproximadamente 90% da área da UGRHI 15 (IPT, 1999). Apresenta regionalmente comportamento de aquífero livre, com recarga natural diretamente da infiltração de água das chuvas. Os níveis de água são relativamente rasos, acompanhando o relevo, com sentido de fluxo para as drenagens. Pode ser considerado um aquífero moderadamente permeável, devido ao teor relativamente elevado de material argiloso e silteoso.

As interfaces entre essas estruturas (limites de topo e base), definidas a partir da interpolação de dados obtidos da descrição litoestratigráfica de

poços perfurados na área, também foram transformados em Modelos Digitais de Elevação (MDE). De acordo com a Figura 2, a espessura da Formação Adamantina varia entre 31 metros nos vales

das principais drenagens e 210 m, nas áreas de cota mais elevada, onde surgem as nascentes dos rios da região.

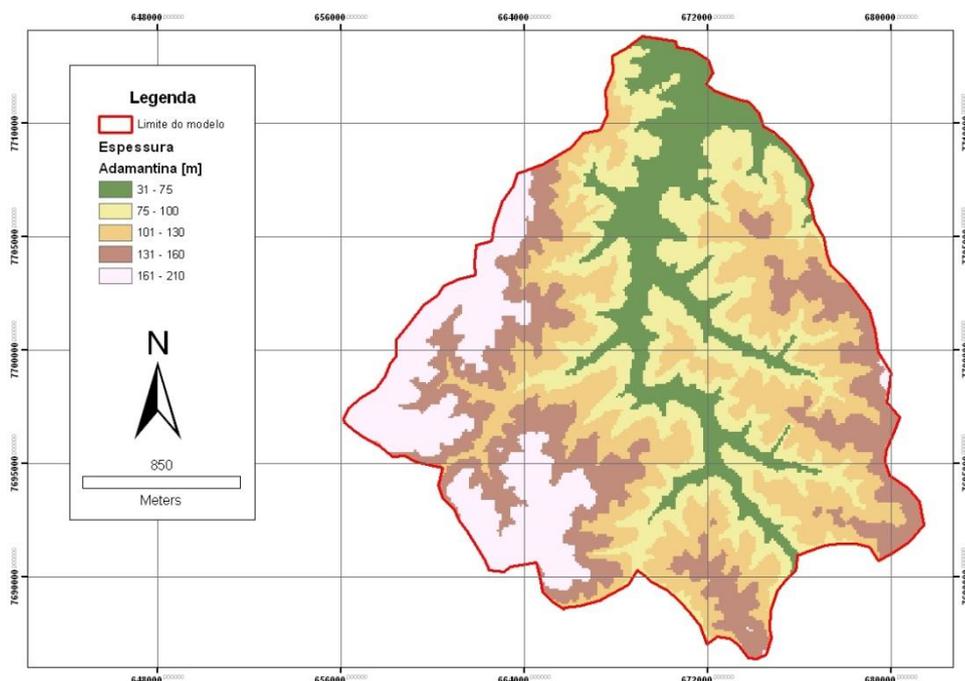


Figura 2 - Espessura do pacote sedimentar da Formação Adamantina.

Figure 2 - Thickness of the sedimentary Adamantina Formation.

Modelo numérico

Parâmetros geométricos

A construção do modelo numérico inicia pela definição dos contornos e a correspondente geração da malha. Para a geração da malha foram considerados 1888 poços ativos cadastrados na região e as principais drenagens. Inicialmente, foi gerada uma malha bidimensional com 94.000 elementos conectados a 80.370 nós. Os nós apresentam espaçamento médio de 100 m nas regiões sem poços, com refinamento da malha no entorno dos poços (distância mínima de 6 m). Devido ao grande número (1888) de poços ativos existentes na região de estudo, a distância mínima entre os poços é da ordem de 10 metros. Essa grande concentração de poços impõe severas dificuldades ao aquífero para suprimento das vazões bombeadas e ao sistema numérico para a geração da malha e atribuição de parâmetros hidrogeológicos.

Por se tratar de um modelo tridimensional, a malha construída em planta foi reproduzida em 5 camadas em profundidade, às quais foram atribuídas cotas altimétricas. À camada 1 foram atribuí-

das as cotas do MDT (Figura 1), representando a superfície topográfica da área de estudo. A camada 3 representa a interface entre as formações Adamantina e Santo Anastácio, cujas cotas altimétricas foram determinadas a partir das informações de poços. A camada 5 representa a base impermeável do aquífero, correspondendo às cotas de topo dos basaltos da Formação Serra Geral. As camadas de nós 2 e 4 apresentam cotas intermediárias entre as camadas 1-3 e 3-5, respectivamente. As 4 camadas de elementos resultantes estão indicadas em cor vermelha na Figura 3.

A malha é composta por 376.000 elementos hexaedros ou octaedros, divididos em 4 camadas de 94.000 elementos. Esses elementos são conectados a 401.850 nós, divididos em 5 camadas de 80.370 nós cada. A Figura 4 apresenta um detalhe da visão em perspectiva na direção Sul-Norte da malha tridimensional construída para o modelo numérico de São José do Rio Preto.

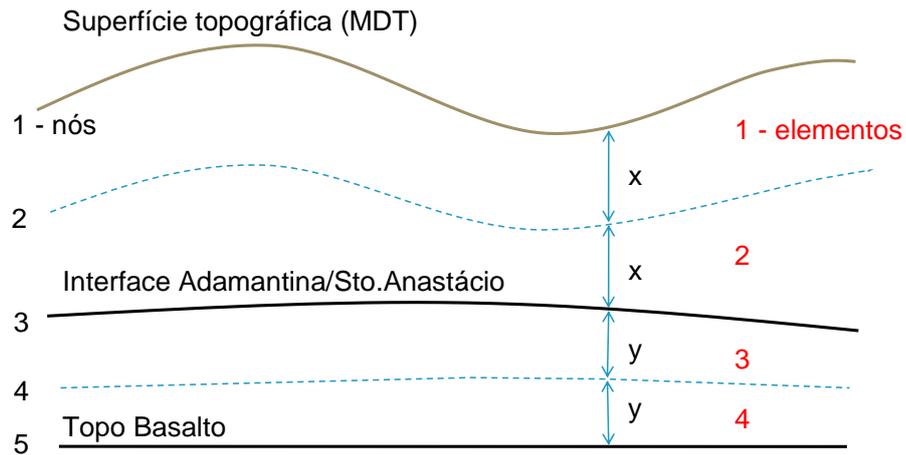


Figura 3 - Esquema para discretização vertical do modelo tridimensional. As camadas de nós estão indicadas em cor preta e as camadas de elementos em cor vermelha.

Figure 3 - Vertical discretization of the tridimensional model. The node layers are indicated in black color and the element layers are indicated in red.

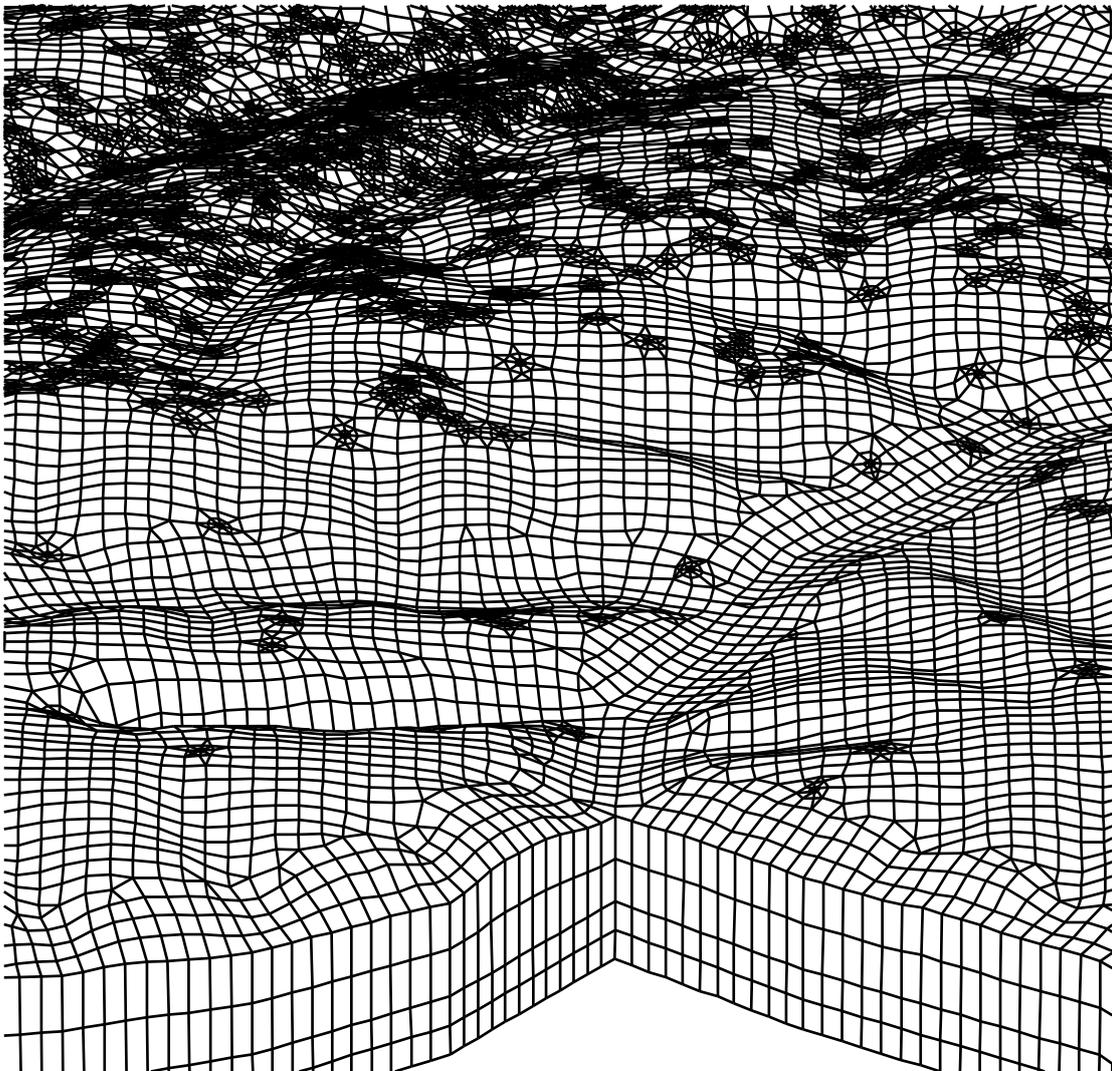


Figura 4 - Detalhe da visão em perspectiva da malha tridimensional para o modelo numérico de São José do Rio Preto.

Figure 4 - Detail view of the tridimensional mesh for the São José do Rio Preto numerical model.

Os dados espacializados no Sistema de Informações Geográficas (SIG) foram exportados para o formato padrão do pacote SPA e atribuídos à malha a partir de elementos estruturais.

Modelo pré-exploração

A elaboração do modelo de fluxo subterrâneo iniciou pela reconstrução da situação de escoamento anterior à ocupação da área e exploração do Aquífero Bauru na região de estudo. Essa situação corresponde às condições normais de recarga e drenagem sem a interferência de poços no aquífero.

Parâmetros hidrogeológicos

Considerando que existe conexão hidráulica entre a água subterrânea e os principais corpos d'água superficiais, a condição de contorno escolhida para os contornos naturais do modelo é do primeiro tipo ou de Dirichlet (carga hidráulica conhecida). Ao longo dos divisores de águas superficiais, a condição de contorno especificada é do segundo tipo ou de Neumann (fluxo nulo através do contorno).

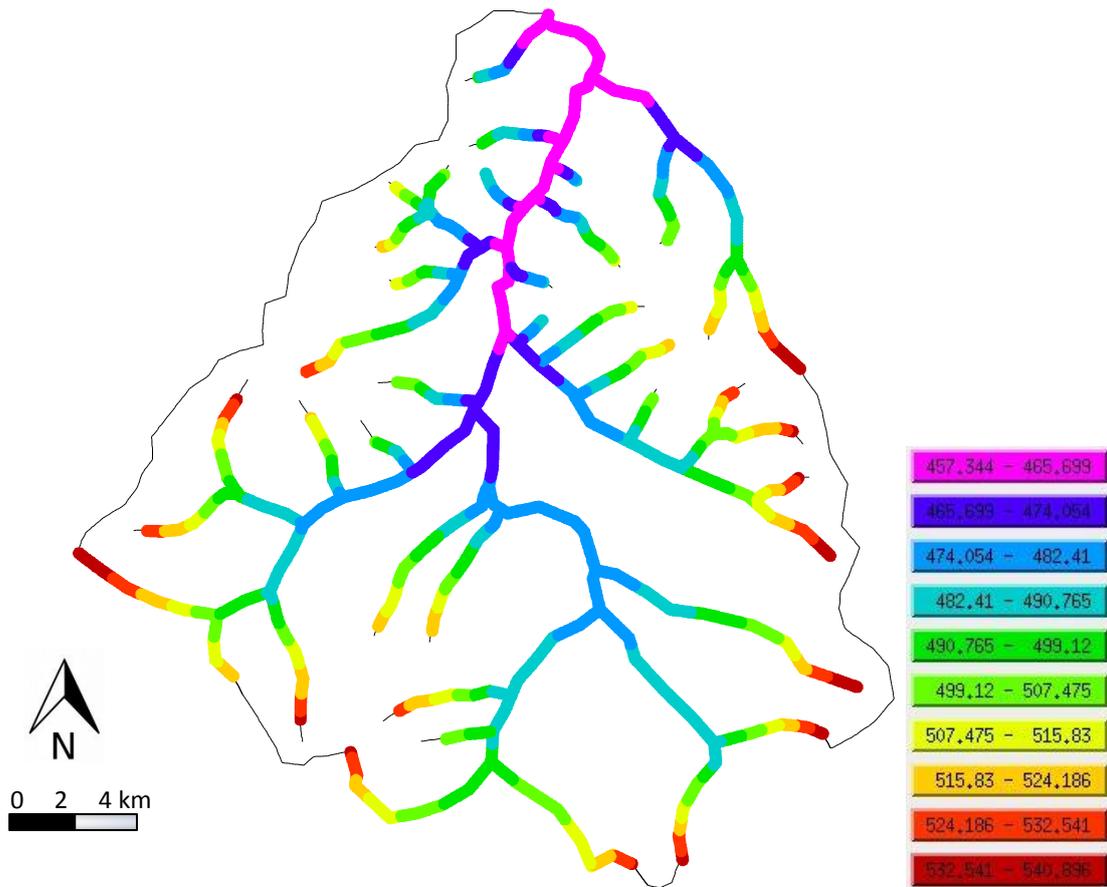


Figura 5 - Condições de contorno para o modelo numérico. Os círculos indicam os pontos com carga hidráulica conhecida e correspondem aos valores determinados a partir de mapas topográficos para os corpos d'água superficiais. Os contornos sem especificação de carga correspondem a divisores de água com fluxo nulo.

Figure 5 - Boundary condition for the numerical model. The circles indicate nodes with known hydraulic head, determined for the superficial water bodies from topographic maps. Boundaries without specified head correspond to water divides with no flux condition.

A Figura 5 apresenta as condições de contorno definidas para o modelo. Os círculos em tons de cor indicam os pontos com carga hidráulica conhecida e correspondem ao nível da água nos corpos d'água superficiais. Esses valores foram

interpolados linearmente ao longo dos córregos. Valores não disponibilizados foram estimados a partir de dados topográficos obtidos de mapas topográficos (IBGE, 2005) e de imagem de satélite (EMBRAPA, 2008). Os contornos sem especifica-

ção de carga hidráulica, representados aproximadamente por linhas de fluxo naturais, correspondem a divisores de água subterrânea (condição de contorno do tipo dois ou de Neumann, com fluxo normal nulo).

A definição da taxa de recarga (mm/a) para o modelo pré-exploração considera que anteriormente à ocupação da área e exploração do aquífero, a recarga ocorria em taxas superiores à situação atual, uma vez que o escoamento superficial era reduzido pela presença de vegetação. Para a área central do modelo foi adotada uma taxa de recarga de 240 mm/a e nas áreas mais elevadas, próximas aos divisores de água da bacia hidrográfica, foi

adotada a taxa de 300 mm/a. Esses valores correspondem aproximadamente a 20% e 25% da precipitação anual (média) de 1.220 mm, calculada com dados do período 1941 a 2004 da estação pluviométrica do DAEE (B6-020) em São José do Rio Preto.

Os níveis estáticos registrados nos poços e as cotas das nascentes foram utilizados para a construção de um mapa potenciométrico para calibração (Figura 6). Esse mapa potenciométrico representa as cargas hidráulicas existentes em condições naturais, anteriormente ao início da exploração do aquífero.

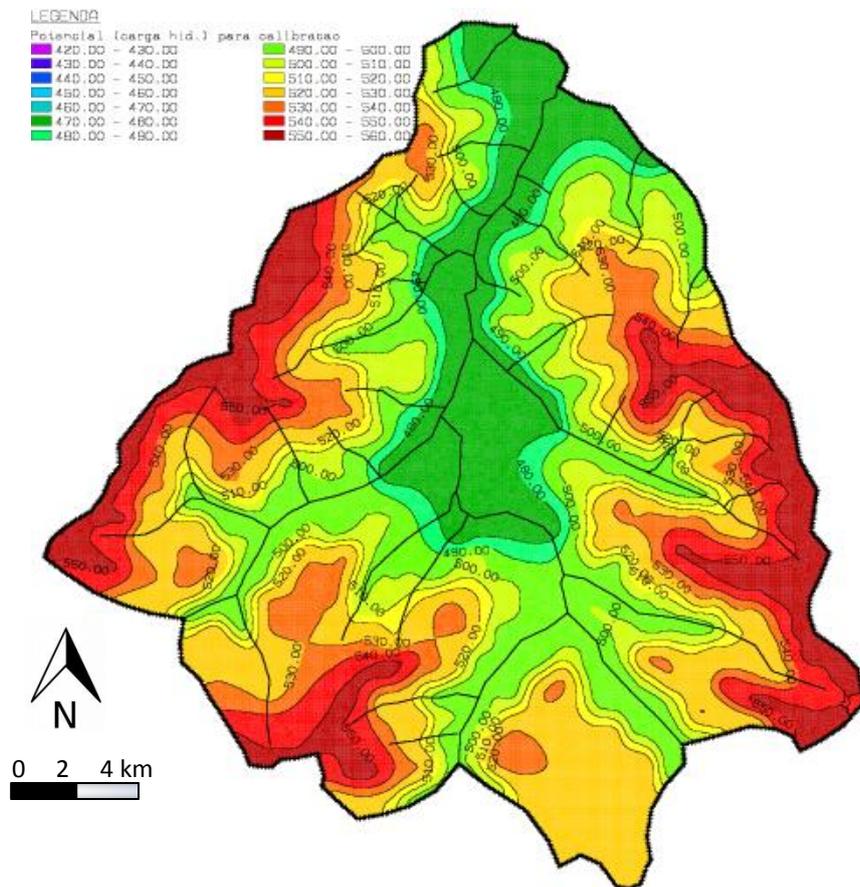


Figura 6 - Mapa potenciométrico para calibração, construído a partir de níveis estáticos de poços e nascentes observados em campo.

Figure 6 - Potentiometric map for calibration, constructed from well heads and springs observed at the field.

Calibração do modelo

Para a calibração do modelo foram considerados os valores de condutividade hidráulica disponíveis para as formações Adamantina e Santo Anastácio. Levantamento de dados publicados em literatura especializada e ensaios de campo indicam os valores orientadores apresentados na Tabe-

la 1. Os valores obtidos em ensaios de campo não fazem distinção entre as formações Adamantina e Santo Anastácio, uma vez que os poços utilizados nos ensaios apresentam filtros em ambas as formações.

Tabela 1 - Valores de condutividade hidráulica (m/d) para a região de São José do Rio Preto.**Table 1** - Hydraulic conductivities (m/d) for the São José do Rio Preto region.

	Mínimo (m/d)	Máximo (m/d)	Médio (m/d)
Adamantina	0,20	0,80	0,50
Santo Anastácio	0,30	3,66	1,98
Ensaio campo	0,05	1,07	0,26

Para a atribuição de parâmetros ao modelo numérico, optou-se pela utilização dos valores médios indicados na Literatura como referência. Para a Formação Adamantina foram adotados valores de condutividade hidráulica horizontal de $K_{HO-RI_{ad}} = 3,0 \cdot 10^{-6}$ m/s (0,26 m/d) e vertical de $K_{VERT_{ad}} = 8,0 \cdot 10^{-7}$ m/s, portanto, com uma anisotropia de 1:3,75. Para a Formação Santo Anastácio foram adotados valores de condutividade hidráulica horizontal de $K_{HORI_{sa}} = 10,0 \cdot 10^{-6}$ m/s (0,86 m/d) e vertical de $K_{VERT_{sa}} = 3,0 \cdot 10^{-6}$ m/s, portanto, com uma anisotropia de 1:3,33. Os valores adotados são aproximadamente 50% menores que os valores médios indicados na Literatura, porém superam os valores obtidos em testes de bombeamento realizados em campo (SERVMAR, 2008). Deve ser observado que esses valores foram definidos após uma série de simulações para calibração do modelo.

O modelo numérico reproduz o sistema de fluxo esperado pelo modelo conceitual (Figura 6), indicando que as taxas de recarga e as condutividades hidráulicas são consistentes. Deve ser observado que o mapa potenciométrico para calibração resulta da interpretação de informações pontuais de níveis estáticos de poucos poços obtidos em diferentes décadas e, dessa forma, corresponde a uma indicação inicial. A obtenção de dados históricos confiáveis consiste na maior dificuldade para a elaboração de modelos de fluxo em aquíferos no Brasil. Por essa razão, a elaboração de estatísticas de erro quadrático médio e gráficos de correlação entre valores observados e calculados, visando avaliar quantitativamente a qualidade da calibração, não foi realizada neste estudo. A otimização desses gráficos, a partir da calibração pontual de valores de condutividade hidráulica, cria uma falsa impressão de precisão do modelo, que não pode ser assegurada tendo em vista a ausência de dados confiáveis. Neste estudo, a avaliação da consistência do modelo é qualitativa, baseada na interpretação dos resultados a partir dos fundamentos teóricos de Hidrogeologia, que indicam as direções de fluxo em condições naturais.

Com os parâmetros hidrogeológicos uni-

formemente atribuídos às formações geológicas existentes na área, o mapa potenciométrico calculado é compatível com o modelo conceitual, demonstrando a capacidade do modelo de reproduzir a situação de escoamento anterior ao início da exploração na área de estudo. Tendo em vista a boa concordância, esse modelo foi considerado calibrado e pode ser utilizado para a simulação do cenário atual de exploração de água do aquífero. De acordo com o modelo, as maiores cargas hidráulicas ocorrem nas regiões topograficamente mais altas, correspondendo às áreas de maior recarga. A carga hidráulica máxima atinge 560,0 m nas nascentes (regiões mais elevadas) da área de estudo. Na região central, as cargas hidráulicas são mais baixas, sendo influenciadas pelas drenagens. A cota mínima é de aproximadamente 457,0 m, próximo ao exutório da bacia hidrográfica.

Balanco hídrico

A análise do balanço hídrico na área de estudo visa fornecer estimativas preliminares para a ordem de grandeza das variáveis hidrológicas relevantes ao estudo proposto. O balanço de massa é realizado para toda a área do modelo, separadamente para entradas e saídas em unidades de m^3/a .

A comparação entre os totais de entrada ($97.335.371,768 m^3/a$) e os totais de saída ($-97.335.371,785 m^3/a$) indica que o balanço de massa é consistente, com um erro de apenas 0,017 m^3/a (17 l/a) para todo o modelo.

Essa taxa de recarga anual (média de 252 mm/a) corresponde a uma vazão de base de aproximadamente $3,08 m^3/s$ para uma área de contribuição de $385,75 km^2$. Para o posto fluviométrico de Ipiгуá (Prefixo DAEE 6B-011), que drena uma área de $567 km^2$, a vazão de base correspondente seria de $4,53 m^3/s$, superior à vazão de base observada atualmente (aproximadamente $4,0 m^3/s$), indicando que as alterações no uso e ocupação do solo provocaram uma redução da vazão média.

Modelo atual com exploração do aquífero

Considerando que os parâmetros hidrogeológicos atribuídos ao modelo são compatíveis com

a situação de escoamento esperada na região, o modelo pode ser alterado, incorporando as alterações de uso e ocupação do solo, bem como as respectivas alterações nas taxas de recarga. Adicionalmente, os poços em operação na área de estudo podem ser incluídos, visando à avaliação das alterações provocadas no sistema de escoamento subterrâneo.

Parâmetros hidrogeológicos

As condutividades hidráulicas obtidas no modelo pré-exploração continuam válidas, uma vez que não se espera alteração significativa devido a fenômenos de compactação devido à redução de níveis no aquífero.

No modelo numérico foram incluídos 1888 poços com vazão definida. A vazão total explorada pelos poços é de 35.750.000 m³/a. Uma variável adicional, que deve ser considerada em modelos

tridimensionais, consiste na profundidade dos poços e comprimento da seção filtrante. Essa informação define qual é a formação ou camada do aquífero que está sendo explorada. Para incorporar essa variável no modelo numérico, adotou-se o seguinte procedimento:

- para cada poço, determinou-se a cota do fundo do poço a partir da diferença entre a cota fornecida pelo MDT e a profundidade fornecida pelo cadastro geral;

- essa cota foi comparada com as cotas das camadas da malha de elementos finitos, conforme apresentado na seção **Parâmetros geométricos**;

- a vazão do poço foi atribuída à camada identificada.

Esse procedimento é apresentado esquematicamente na **Figura 7**.

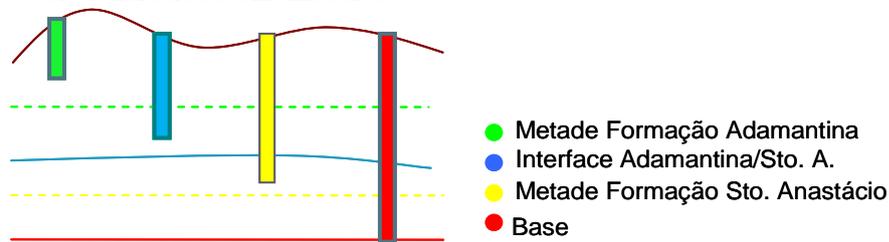


Figura 7 - Esquema para definição da camada explorada em função da profundidade dos poços.

Figure 7 - Relation between well depth and tapped aquifer layer.

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial dos poços nas diferentes camadas do modelo numérico tridimensional. As cores correspondem às camadas às quais foi atribuída a vazão. O fundo da figura corresponde ao MDT.

As taxas de recarga sofreram significativas alterações em função da mudança no uso e ocupação do solo, tanto na área urbana (devido à impermeabilização), quanto na área rural (devido às atividades agropastoris e consequente substituição da vegetação nativa). Na área rural, foi considerada uma redução de recarga de 15%, resultando em valores de 255 mm/a nas áreas mais elevadas e 204 mm/a nas áreas de maior declividade topográfica. Na área urbana, o impacto da urbanização resulta na composição de dois fatores: impermeabilização e recarga artificial devido às perdas nas redes de distribuição de água e coleta de esgotos. A impermeabilização resulta em uma diminuição da taxa de recarga natural, proporcional à densidade de urbanização. A perda total na distribuição de água é estimada em 13.029.040 m³/a. Admitindo que 20% da perda seja de faturamento, a perda física

corresponde a 10.423.232 m³/a, representando ainda 29% da vazão bombeada pela totalidade dos poços. Esse volume de água retirado anualmente representa uma recarga artificial, que garante o funcionamento dos poços na região central. No presente modelo, a área urbanizada foi dividida em três setores com diferentes taxas de perda nas redes de distribuição e rede de esgoto. Considera-se que as maiores perdas ocorrem na região central da cidade, que apresenta redes mais antigas, as menores cotas topográficas e maiores pressões na rede de distribuição. Admite-se que nas zonas mais afastadas do centro, as redes são mais novas e as perdas menores. A Tabela 2 apresenta resumidamente as taxas de recarga natural e artificial consideradas para cada uma das cinco zonas de recarga definidas no modelo numérico (Figura 9). De acordo com os valores adotados, a recarga artificial na área urbana é de 10.123.000 m³/a, próxima do valor indicado para as perdas físicas na rede de distribuição.

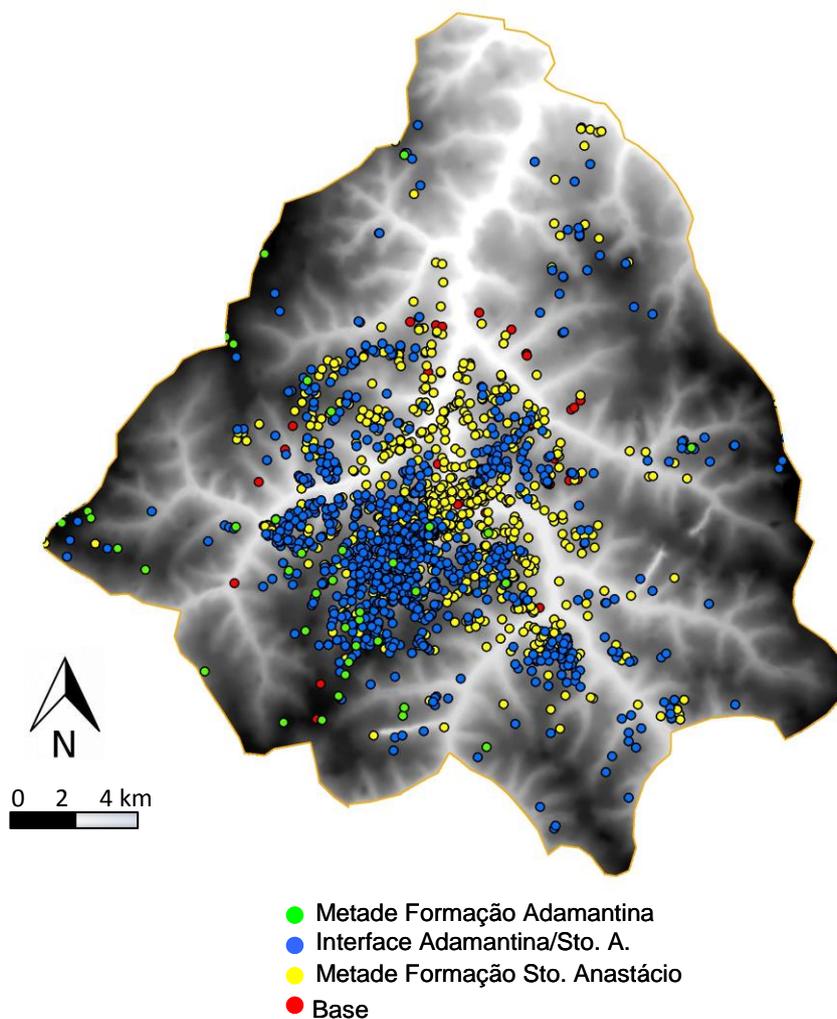


Figura 8 - Distribuição dos poços existentes no modelo nas diferentes camadas do modelo tridimensional. As cores correspondem às camadas às quais foi atribuída a vazão. O fundo da figura corresponde ao MDT.

Figure 8 - Well distribution in the different layers of the tridimensional model. The colors identify the tapped layers. Figure background corresponds to DEM.

Tabela 2 - Taxas de recarga adotadas para o modelo numérico para as zonas rural e urbana.

Table 2 - Recharge rates for the rural and urban areas.

Zona	Área (km ²)	Taxa de recarga (mm/a)		Volume anual (m ³ /a)
		Natural	Artificial	
1	13,78	50	350	5.510.074
2	15,87	100	200	4.760.570
3	42,52	150	50	8.503.948
4	236,63	204	-	48.272.871
5	76,94	255	-	19.619.710
TOTAL	385,74		225	86.667.173

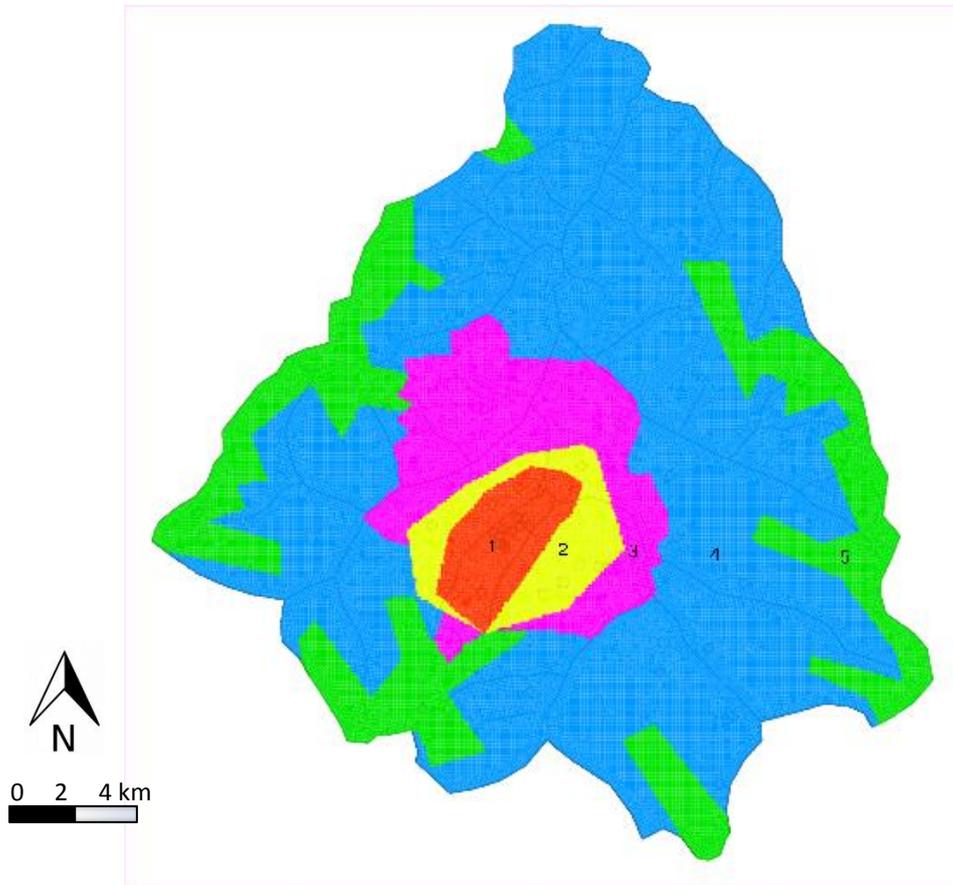


Figura 9 - Taxas de recarga definidas no modelo numérico: Zona 1 (400 mm/a), Zona 2 (320 mm/a), Zona 3 (200 mm/a), Zona 4 (204 mm/a), Zona 5 (255 mm/a).

Figure 9 - Recharge rates defined for the numerical model: Zone 1 (400 mm/a), Zone 2 (320 mm/a), Zone 3 (200 mm/a), Zone 4 (204 mm/a), Zone 5 (255 mm/a).

RESULTADOS

Os dados definidos na seção anterior foram atribuídos à malha para a elaboração de um modelo numérico para simulação da situação com bombeamento. Na região central, próximo às represas, foi definida a condição de contorno do terceiro tipo (drenança ou condição de Robin), uma vez que os níveis da superfície livre encontram-se abaixo do nível dos rios, devido à superposição de cones de rebaixamento. Os trechos com os respectivos valores adotados para o nível d'água são apresentados na Figura 1. Para esses rios foram adotados os coeficientes de drenança de 3,01 a 4,16 m/s, definidos durante a calibração do modelo.

A Figura 11 apresenta as vazões de reação, após o ajuste das condições de contorno. De acordo com o resultado apresentado, nas regiões topográficas mais elevadas, o aquífero é drenado, dando origem às nascentes. Nas regiões topograficamente mais baixas, onde a concentração de poços de bombeamento é maior, os cursos d'água alimentam o aquífero, contribuindo para o abastecimento dos poços. Nos trechos com condição do terceiro tipo (drenança), a carga hidráulica no aquífero é menor e o aquífero é alimentado pelo curso d'água. Essa situação ocorre na região central da cidade, onde a concentração de poços é excessiva.

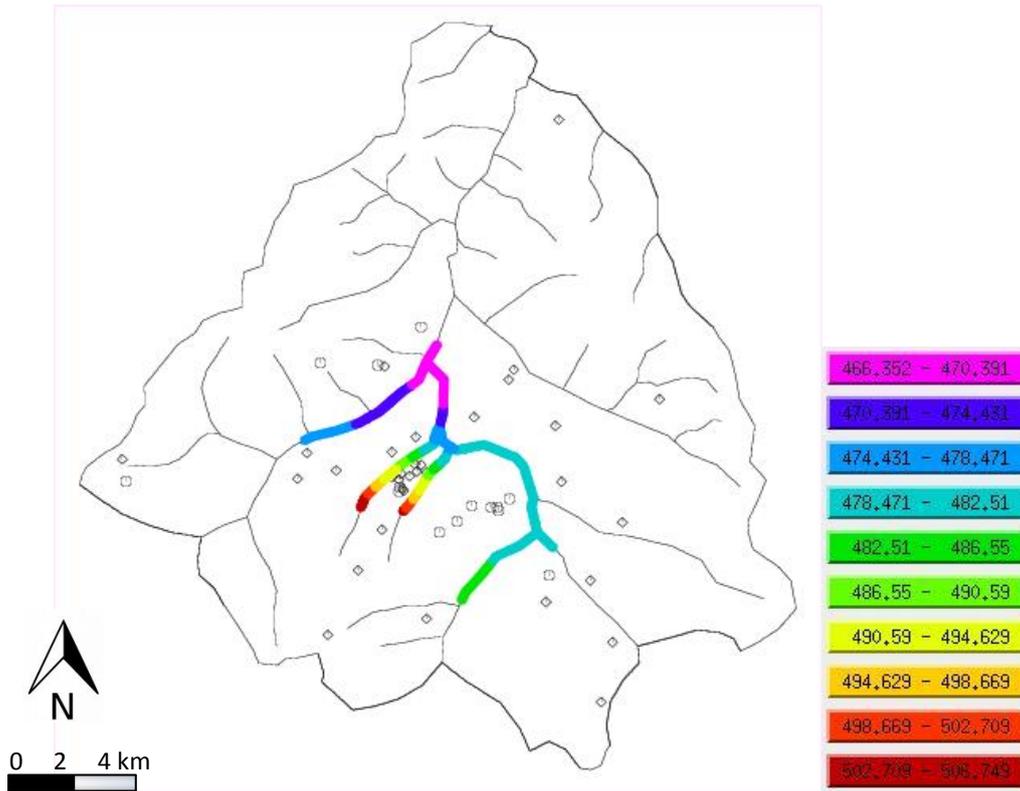


Figura 10 - Nível d'água nos trechos de rio com condição de contorno de terceiro tipo ou Robin (drenança ou leakage).

Figure 10 - Water level in the rivers with leakage (3rd. type or Robin) boundary condition.

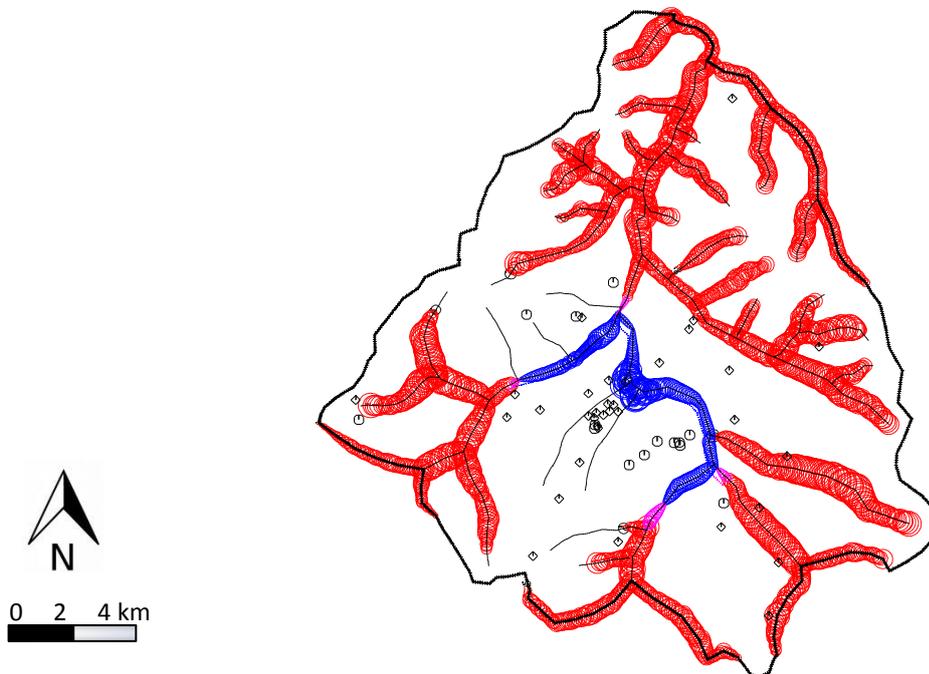


Figura 11 - Vazão de reação nos pontos do modelo com carga conhecida (drenagem em vermelho; recarga em preto). Os círculos azuis indicam a recarga do aquífero em trechos com condição de drenança, A escala dos círculos azuis é menor.

Figure 11 - Discharge in the nodes with specified head (drainage in red; infiltration in black). The blue circles indicated aquifer recharge in with leakage condition. The scale for the blue circles is smaller.

O mapa potenciométrico calculado pelo modelo para a camada 4 (Formação Santo Anastácio) para a situação atual é apresentado na Figura 12 em distribuição de isoáreas. A distribuição de cargas hidráulicas é compatível com o modelo conceitual, demonstrando a capacidade do modelo calibrado de reproduzir a situação de escoamento atual na área de estudo. As cargas hidráulicas mais elevadas são observadas nas áreas próximas aos contornos do modelo, com valores máximos próximos a 560,0 m. Na região central, as cargas hidráulicas são baixas, indicando a formação de um grande cone de rebaixamento. No entorno dos poços com vazões elevadas

formam-se cones de rebaixamento mais intensos. A cota mínima é de aproximadamente 390,0 m, nos poços de maior vazão. Deve ser observado que os níveis dinâmicos observados nos poços durante as operações de bombeamento não podem ser reproduzidos com exatidão, uma vez que as vazões especificadas no modelo numérico são estimadas (os dados operacionais disponíveis indicam a capacidade máxima de produção dos poços, em m³/h, e o tempo diário de operação, geralmente 20 h/d. Essas informações são transformadas em m³/a, unidade compatível com um modelo numérico em regime permanente).

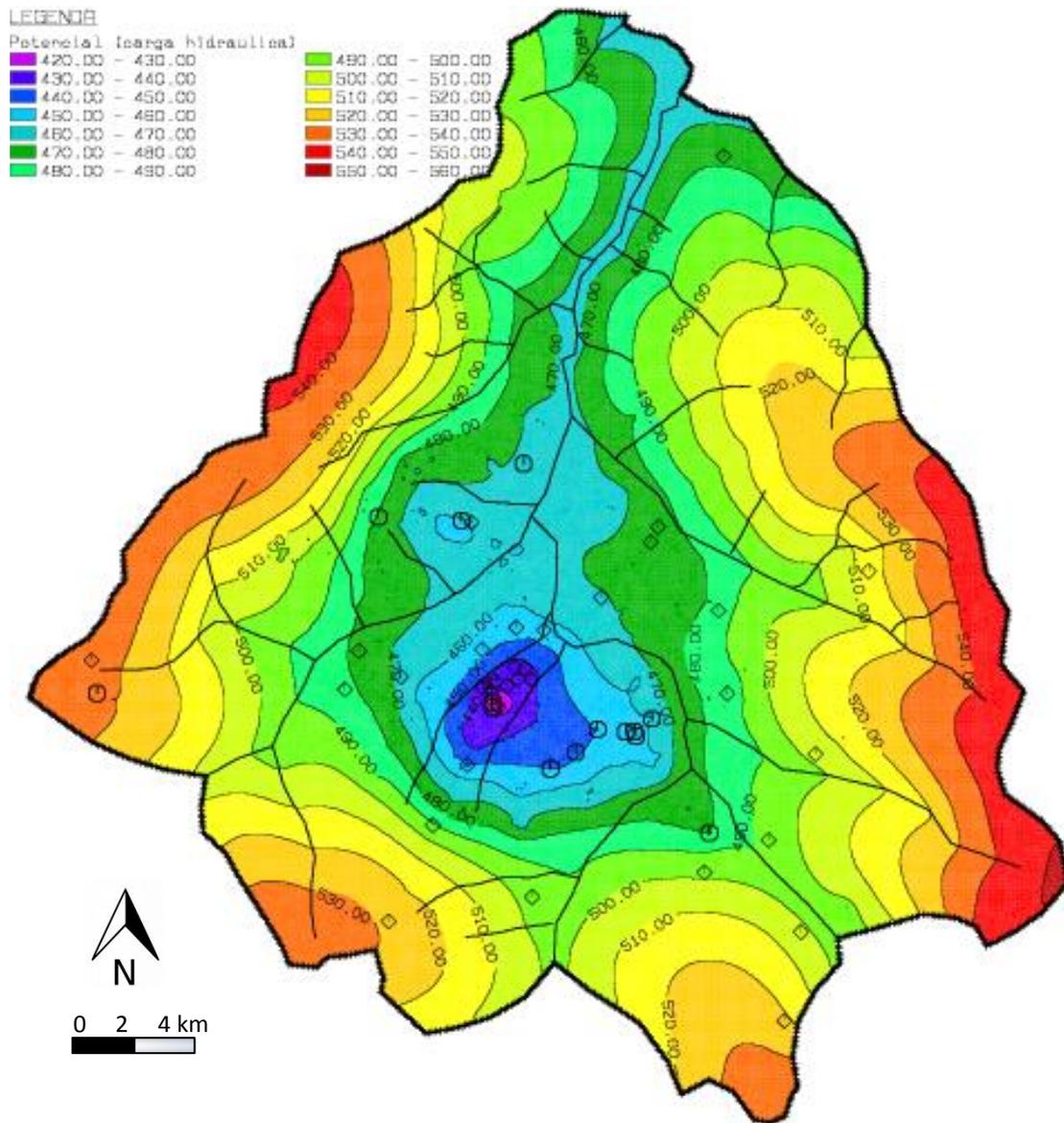


Figura 12 - Mapa potenciométrico calculado pelo modelo para a camada 4 (Formação Santo Anastácio).
Figure 12 - Potentiometric map calculated for the 4th layer (Santo Anastacio Formation).

A Figura 13 apresenta uma visão tridimensional da superfície potenciométrica calculada pelo modelo calibrado para a camada 4 (Formação Santo Anastácio). As regiões de cor azul apresentam as menores cargas hidráulicas.

Essa visualização permite avaliar o rebaixamento causado pelos poços e as alterações nas isolinhas de carga hidráulica. O detalhe indica claramente o impacto causado pela superposição de cones de rebaixamento na região central da cidade.

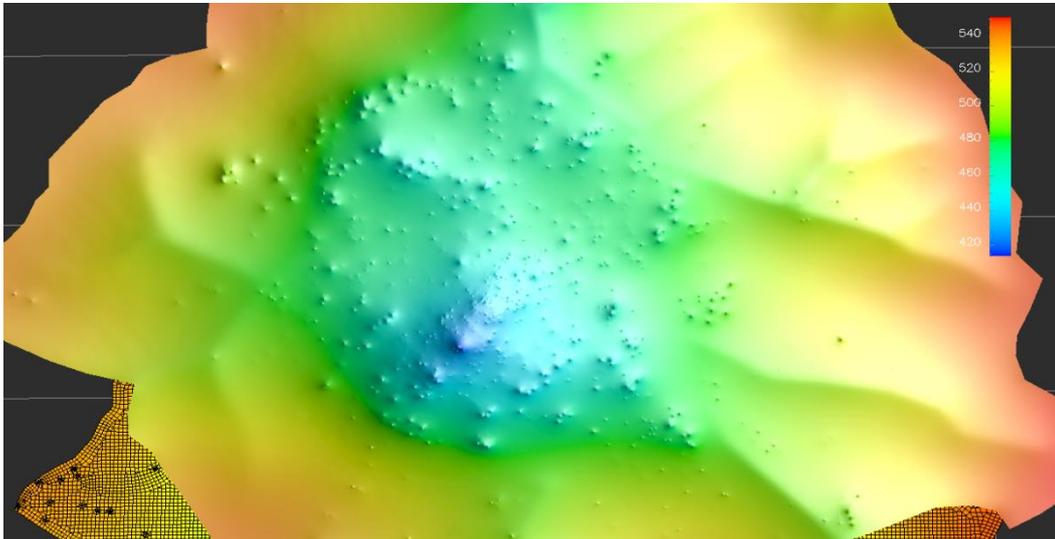


Figura 13 - Visualização espacial da superfície potenciométrica calculada pelo modelo com detalhe para o rebaixamento provocado pela superposição de cones de rebaixamento na região central.

Figure 13 - Calculated potentiometric surface visualization with detail to the drawdown in the central area.

Na Figura 14 é apresentada uma visualização lateral (direção Sul-Norte) da superfície potenciométrica. Essa figura permite visualizar os cones de rebaixamento formados pela interferência entre vários poços com pequeno afastamento. Os cones de rebaixamento dos poços

de alta vazão são visíveis, indicando o impacto provocado pela alta exploração de água do aquífero. Na região central, a superposição dos cones de rebaixamento provoca uma redução da superfície livre em uma área de grande extensão.

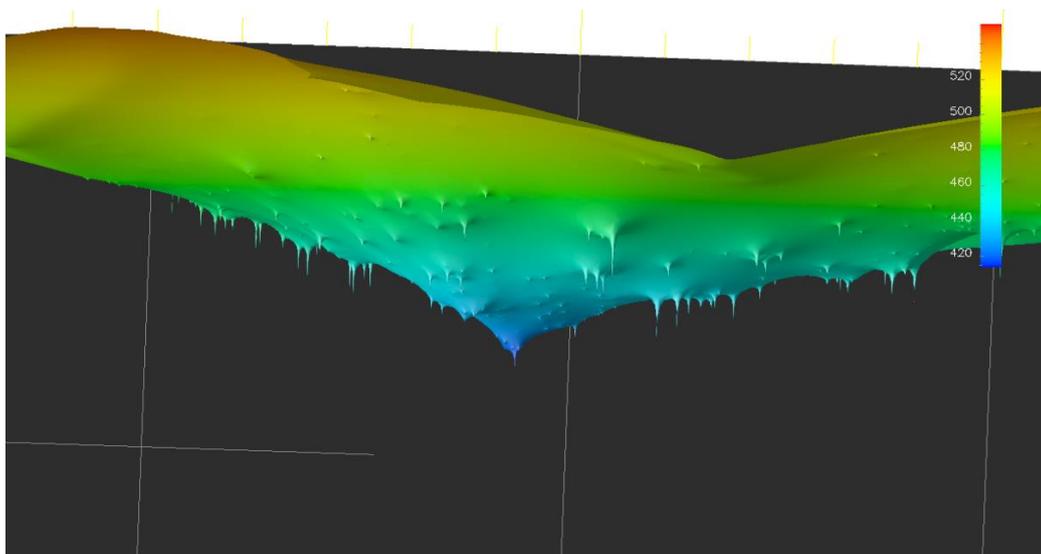


Figura 14 - Vista lateral da superfície potenciométrica, com detalhe dos cones de rebaixamento.

Figure 14 - Side view of the potentiometric surface, with detail to the drawdown cones.

O rebaixamento da superfície livre, provocado pela urbanização da área, é apresentado na Figura 15. Essa figura resulta da diferença entre as cotas da superfície livre anterior (Figura 6) e posterior à urbanização (Figura 12). O

rebaixamento é provocado pelos poços na região central e pela redução da taxa de recarga nas áreas rurais. Na região central, pontualmente, a diferença máxima atinge -90,5 m.

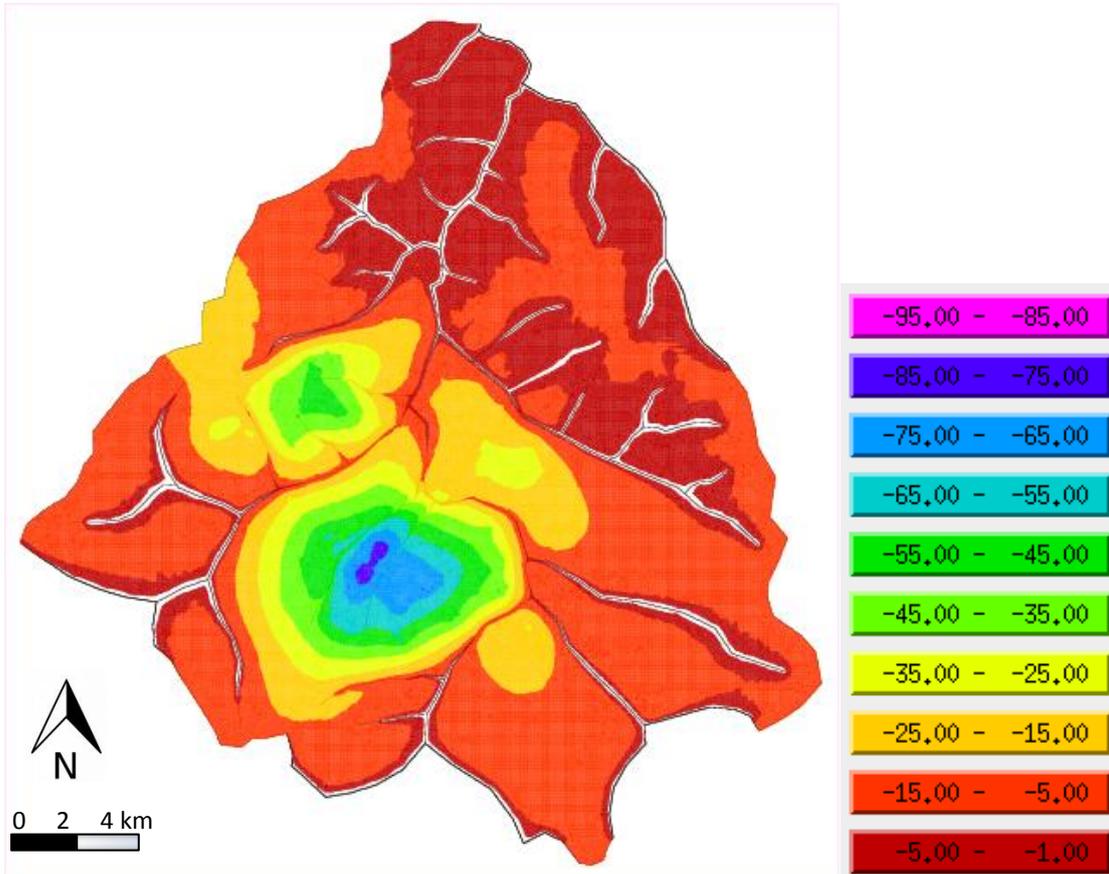


Figura 15 - Rebaixamento da superfície livre provocado pela urbanização da área de estudo.
Figure 15 - Free surface drawdown due to the urbanization of the study area.

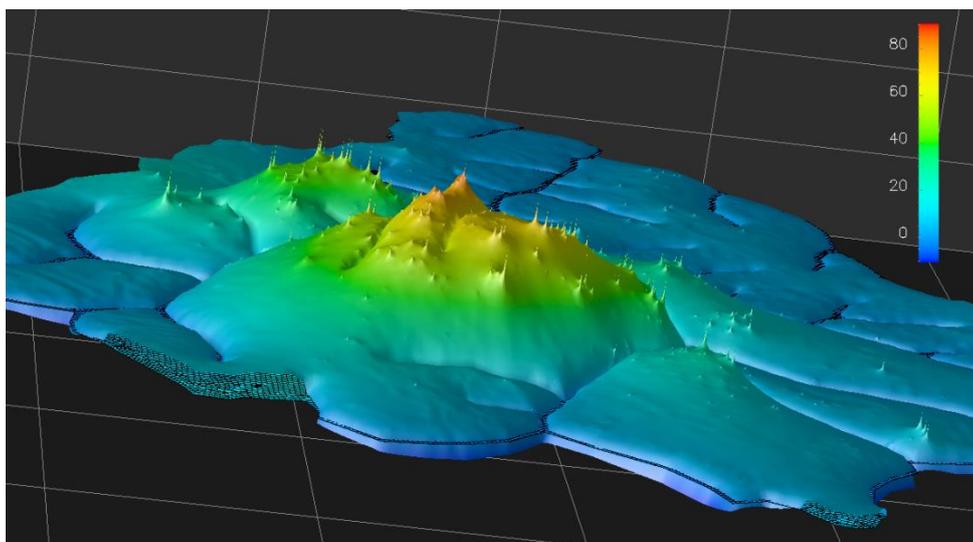


Figura 16 - Visualização do rebaixamento provocado pela urbanização da área.
Figure 16 - Visualization of the free surface drawdown due to the urbanization of the study area.

A Figura 16 apresenta uma visualização tridimensional do rebaixamento, com visada na direção Sul-Norte, apresentando em detalhe as regiões centrais da cidade, afetadas pelos poços de bombeamento.

A análise do balanço hídrico na área de estudo visa fornecer estimativas preliminares para a ordem de grandeza das variáveis hidrológicas relevantes ao estudo proposto. O balanço de massa é realizado para toda a área do modelo, separadamente para entradas e saídas em unidades de m^3/a .

As entradas de água são representadas pela recarga direta através da superfície, resultante da precipitação (infiltração), e perdas na rede de distribuição de água e galerias pluviais. Essa parcela é complementada pela recarga localizada no leito dos rios, representada pela interação rio-aquífero (reinjeção de água drenada de áreas a montante) e drenança (*leakage*).

ENTRADAS:

Recarga	86.667.173	m^3/a
<i>Leakage</i> (drenança)	366.468	m^3/a
TOTAL	87.033.641	m^3/a

As saídas de água do aquífero são representadas pela vazão bombeada dos poços e pela drenagem através do leito dos rios, representando a vazão de base para os cursos d'água considerados.

SAÍDAS:

Poços	- 35.750.000	m^3/a
Drenagem nos rios	- 51.269.398	m^3/a
<i>Leakage</i> (drenança)	- 14.243	m^3/a
TOTAL	- 87.033.641	m^3/a

Considerando-se apenas as entradas por recarga direta ($86.667.173 m^3/a$) e a vazão explorada pelos poços ($-35.750.000 m^3/a$), conclui-se que os poços bombeiam atualmente 41,3% do recurso hídrico renovável disponível na área de estudo.

No entanto, deve ser considerado que aproximadamente $10.123.000 m^3/a$ não devem participar desse balanço, uma vez que esse é o volume de água elevado pelos poços, que retorna ao aquífero devido às perdas nas redes de distribuição de água e coleta de esgotos. Esse volume de água fica em constante circulação na zona não-saturada da área urbana e não contribui para o escoamento de base das principais

drenagens. Para efeito de balanço hídrico, deve-se considerar apenas a recarga de $76.544.173 m^3/a$, que corresponde a uma taxa de recarga média de aproximadamente $200 mm/a$. Para o posto fluviométrico de Ipiguá (Prefixo DAEE 6B-011), que drena uma área de $567 km^2$, a vazão de base correspondente seria de $3,60 m^3/s$. Conforme observado anteriormente, a vazão de base atual observada no posto fluviométrico é de aproximadamente $4,0 m^3/s$. Considerando que no restante da bacia hidrográfica não ocorre impermeabilização tão intensa como na área urbanizada de São José do Rio Preto, a vazão de base indicada pelo modelo ($3,60 m^3/s$) mostra-se coerente. Para quantificação da taxa de exploração, as perdas do sistema também devem ser deduzidas da vazão bombeada pelos poços, implicando em uma vazão corrigida de $25.627.000 m^3/a$. Dessa forma, a taxa de exploração dos recursos hídricos subterrâneos renováveis é de 33,5% para a área de estudo. A entrada por drenança nos trechos com condição do terceiro tipo é considerada insignificante em comparação com as demais variáveis. Esse resultado indica que nesses trechos, a interação entre o rio e o aquífero é praticamente inexistente.

CONCLUSÕES

A construção do modelo numérico de escoamento para a área de estudo baseou-se inicialmente na reconstrução das condições anteriores ao início da exploração de água subterrânea na região.

Do ponto de vista hidrogeológico, a atribuição de condutividades hidráulicas e o campo de escoamento são consistentes. A distribuição de cargas hidráulicas é compatível com o modelo conceitual, demonstrando a capacidade do modelo calibrado de reproduzir a situação de escoamento anterior ao início da exploração na área de estudo. De acordo com o modelo, as maiores cargas hidráulicas ocorrem nas regiões topograficamente mais altas, correspondendo às áreas de maior recarga. A carga hidráulica máxima atinge $560,0 m$ nas nascentes (regiões mais elevadas) da área de estudo. Na região central, as cargas hidráulicas são mais baixas, sendo influenciadas pelas drenagens. A cota mínima é de aproximadamente $457,0 m$, próximo ao exutório da bacia hidrográfica.

A taxa de recarga anual (média de $252 mm/a$) corresponde a uma vazão de base de aproximadamente $3,08 m^3/s$ para uma área de

contribuição de 385,75 km². Para o posto fluviométrico de Ipiranga (Prefixo DAEE 6B-011), que drena uma área de 567 km², a vazão de base correspondente seria de 4,53 m³/s, superior à vazão de base observada atualmente (aproximadamente 4,0 m³/s), indicando que as alterações no uso e ocupação do solo provocaram uma redução da vazão média.

Tendo em vista a boa concordância entre resultados calculados e esperados, o modelo foi considerado calibrado e utilizado para a simulação do cenário atual de exploração de água do aquífero.

Para a simulação da situação atual de escoamento, as condições de contorno foram adequadas, devido à presença de grande número de poços e consequente rebaixamento do nível da superfície livre do aquífero. As alterações na ocupação e uso do solo foram consideradas através da correção das taxas de recarga.

A distribuição de cargas hidráulicas é compatível com o modelo conceitual, demonstrando a capacidade do modelo calibrado de reproduzir a situação de escoamento atual na área de estudo. Na região central, as cargas hidráulicas são baixas, indicando a formação de um grande cone de rebaixamento. A cota mínima é de aproximadamente 390,0 m, nos poços de maior vazão. As cargas hidráulicas mais elevadas são observadas nas áreas próximas aos contornos do modelo, com valores máximos próximos a 560,0 m. Na região central, em que ocorre a maior concentração de poços de alta vazão, a profundidade do cone de rebaixamento em regime permanente de exploração pode atingir até 100 m. De acordo com os resultados obtidos, nas regiões topograficamente mais baixas, onde a concentração de poços de bombeamento é maior, os cursos d'água alimentam o aquífero, contribuindo para o abastecimento dos poços. Nos trechos com condição do terceiro tipo (drenança), a carga hidráulica no aquífero é menor e o aquífero é

alimentado pelo curso d'água. Essa situação ocorre na região central da cidade.

Como resultado do estudo realizado, concluiu-se que aproximadamente 10.123.000 m³/a bombeados pelos poços não devem ser considerados no balanço da área de estudo, uma vez que esse é o volume de água elevado pelos poços, que retorna ao aquífero devido às perdas nas redes de distribuição de água e coleta de esgotos (ver discussão na seção **Parâmetros hidrogeológicos**). Esse volume de água fica em constante circulação na zona não-saturada da área urbana e não contribui para o escoamento de base das principais drenagens. Para efeito de balanço hídrico, deve-se considerar apenas a recarga de 76.544.173 m³/a, que corresponde a uma taxa de recarga média de aproximadamente 200 mm/a para a área de estudo. Para o posto fluviométrico de Ipiranga (Prefixo DAEE 6B-011), que drena uma área de 567 km², a vazão de base correspondente seria de 3,60 m³/s. Para quantificação da taxa de exploração, as perdas do sistema também devem ser deduzidas da vazão bombeada pelos poços, implicando em uma vazão corrigida de 25.627.000 m³/a. Dessa forma, a taxa de exploração dos recursos hídricos subterrâneos renováveis é de 33,5% para a área de estudo.

A partir dos resultados apresentados na Figura 12 e das análises de disponibilidade hídrica, os órgãos gestores de recursos hídricos dispõem de parâmetros quantitativos para embasar a delimitação de áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas. O modelo numérico desenvolvido consiste em uma interessante ferramenta para a avaliação de cenários de exploração dos recursos hídricos subterrâneos na área de estudo. Associados a critérios econômicos, ambientais, políticos e sociais, os resultados do modelo numérico compõem uma importante ferramenta de apoio a decisão para a definição de políticas públicas na região.

REFERÊNCIAS

BARISON, M. R.; KIANG, H.C. . Parâmetros Hidrogeoquímicos Regionais do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo. In: **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.**, Cuiabá. p. 1-22. 2004.

BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media.** American Elsevier Pub. Co., 1972.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Modelo digital de terreno a partir do projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>. Acesso eletrônico em julho de 2008.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology.** Macmillan Pub. Co., 4th Edition, 2000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – www.ibge.gov.br, 2005.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande - Relatório nº 40.515, 1999.

SERVMAR. Comunicação pessoal. Dados de campo. 2008.

WENDLAND, E. **Desenvolvimento do pacote computacional SPA** (Simulação de Processos em Aquíferos), Relatório de Pesquisa, Processo FAPESP 02/09696-3, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 78 p., 2004.

WENDLAND, E.; QUARESMA, J. E.; CAVICCHIA, M. E.; PASCUAL, R. M. B. SPA - Simulação de Processos em Aquíferos pelo método de elementos finitos em ambiente LINUX. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004, Cuiabá - MT. São Paulo - SP: ABAS, p. 1-13 , 2004. Disponível em <http://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/view/23642>

WENDLAND, E.; QUARESMA, J. E.; CAVICCHIA, M. E. Ferramentas linux para a simulação de processos em aquíferos pelo método de elementos finitos. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa - PB. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Porto Alegre - RS: ABRH, v. 1. p. 1-15, 2005.