

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Trabalho de Formatura 24/25

A litoestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani, sua relação com a produtividade de poços e a longevidade da exploração na cidade de Bauru (SP)

JULIA BELANDRINO RUSIG

Monografia apresentada para a disciplina
0440500 - Trabalho de Formatura (2024) sob
orientação de:

RICARDO CÉSAR AOKI HIRATA (orientador)
Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas
(CEPAS|USP) - Instituto de Geociências (IGc
USP)

CARLOS HENRIQUE GIL MARQUES
(coorientador)
Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas
(CEPAS|USP) - Instituto de Geociências (IGc
USP)

SÃO PAULO
2024

RESUMO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é responsável pelo abastecimento de 65% da demanda hídrica na cidade de Bauru (SP). Para enfrentar as crises hídricas recorrentes, especialmente a partir de 2014, o Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE-Bauru) tem recorrido à perfuração de novos poços no SAG. No entanto, o caráter finito deste recurso fóssil torna essencial estimar a quantidade de água que pode ser extraída do aquífero, considerando que parte das águas provém do armazenamento (S) e outra dos fluxos laterais regionais. O SAG em Bauru compreende as unidades hidroestratigráficas Botucatu, Guará e Piramboia, com uma espessura saturada de 63 a 369 m e fluxo preferencial de SSE para NNW. O aquífero está confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral (FSG) no nordeste e, na região central e sudoeste, pelos argilitos da Formação Araçatuba, que compõe a base do Sistema Aquífero Bauru (SAB). A espessura saturada é o principal fator de controle da produtividade dos poços no SAG, dada sua variabilidade mais significativa em relação à condutividade hidráulica. A reserva total do SAG na região da bacia do Rio Bauru é de 28.250 Mm³, com reserva compressível de 60 Mm³. Observou-se um aumento significativo na exploração do SAG de 52% desde 2010, com uma produção atual de 35 Mm³/ano e que hoje é operado por 40 poços. Estes têm apresentado um rebaixamento médio de 2 m/ano (atingindo um máximo de 80 m) em seus níveis estáticos. Na janela de basalto, ocorre um fluxo vertical descendente do SAB para o SAG através da Formação Araçatuba com velocidades entre 0,06 e 6 m/ano, indicando uma nova relação hidráulica resultante do aumento do gradiente hidráulico entre os dois sistemas. A reserva compressível estimada não é suficiente para sustentar a exploração dos poços no SAG por mais de dois anos, fazendo com que a exploração seja, em parte, mantida pelos fluxos laterais regionais do aquífero. Desta forma, um modelo de fluxo 3D com o código FEFLOW foi realizado para averiguar a influência do fluxo lateral frente ao armazenamento do SAG, durante um período de contínuo bombeamento de 2000 a 2022. O modelo do SAG, calibrado para o período de 2005 a 2022, simulou a evolução do bombeamento em Bauru, revelando a formação de cones de rebaixamento e a convergência do fluxo regional (SSE-NNW) em direção ao centro da cidade, onde há maior concentração de poços. Com base nos cenários modelados e raios de interferência estimados, o modelo prevê que o SAG estabilizará as extrações atuais e futuras, mesmo considerando um cenário de aumento da demanda hídrica para 2034. Assim, o modelo permitiu avaliar a importância da relação entre o fluxo lateral regional e o armazenamento do SAG para a longevidade das explorações em Bauru, no entanto, seus resultados ainda são preliminares e adequações para melhor quantificar a contribuição do fluxo lateral ou estender o domínio de modelagem são alternativas previstas para melhor representar o comportamento real do SAG em Bauru.

ABSTRACT

The Guarani Aquifer System (GAS) supplies 65% of the water demand in the city of Bauru, São Paulo. To address recurring water crises, especially since 2014, the Water and Sewage Department of Bauru (DAE-Bauru) has relied on drilling new wells in the GAS. However, the finite nature of this fossil resource makes it essential to estimate the amount of water that can be sustainably extracted from the aquifer, considering that part of the water originates from storage (S) and part from regional lateral flows. The GAS in Bauru includes the hydrostratigraphic units of Botucatu, Guará, and Piramboia, with a saturated thickness ranging from 63 to 369 meters and a preferential flow direction from SSE to NNW. The aquifer is confined by the basalts of the Serra Geral Formation (SGF) in the northeast and by the claystones of the Araçatuba Formation, which is the base of the Bauru Aquifer System (BAS) in the central and southwestern areas. The saturated thickness is the main control factor for the productivity of wells in the GAS, due to its more significant variability relative to hydraulic conductivity. The total reserve of the GAS in the Bauru River basin region is 28,250 Mm³, with a compressible reserve of 60 Mm³. A significant increase of 52% in GAS exploitation has been observed since 2010, with current production at 35 Mm³/year, supported by 40 operational wells. These wells show an average static level drawdown of 2 m/year, reaching a maximum of 80 meters. In the basalt window, there is a vertical descending flow from the BAS to the GAS through the Araçatuba Formation, with flow rates between 0.06 and 6 m/year, indicating a new hydraulic relationship resulting from the increased hydraulic gradient between the two systems. The estimated compressible reserve alone is insufficient to sustain the exploitation of GAS wells for more than two years, meaning that extraction is partly maintained by the aquifer's regional lateral flows. Thus, a 3D flow model was developed using FEFLOW to examine the influence of lateral flow in relation to GAS storage during continuous pumping from 2000 to 2022. The GAS model, calibrated for the period 2005 to 2022, simulated the evolution of pumping in Bauru, revealing the formation of drawdown cones and the convergence of regional flow (SSE-NNW) towards the city center, where there is a higher concentration of wells. Based on the modeled scenarios and estimated interference radii, the model predicts that the GAS will stabilize under current and future extraction rates, even considering an increase in water demand by 2034. Therefore, the model allowed for an assessment of the importance of the relationship between regional lateral flow and GAS storage for the longevity of extractions in Bauru. However, its results are still preliminary, and adjustments to better quantify the contribution of lateral flow or to extend the modeling domain are considered necessary to better represent the actual behavior of the GAS in Bauru.

AGRADECIMENTOS

Durante estes cinco anos de graduação, diversas pessoas tiveram participação na minha trajetória e contribuíram, de forma direta ou indiretamente, para a existência desta monografia. Gostaria, portanto, de compartilhar o meu mérito e expressar o meu sincero agradecimento a todos.

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Hirata, pelo voto de confiança em me deixar fazer parte do seu grupo de pesquisa apenas tendo uma rápida entrevista como base. Agradeço pelos ensinamentos sobre hidrogeologia, pela oportunidade de fazer o meu estágio no Canadá, mas principalmente pelos conselhos de vida profissional e por me ajudar a decidir qual caminho seguir após graduada.

Ao Carlos Gil, não haveria agradecimentos suficientes para expressar quão necessária foi a sua coorientação. Obrigada pelo apoio nos diversos momentos de ansiedade, pela gentileza com que lidou com as minhas muitas dúvidas e pela paciência infinita, mesmo no final de semana.

À doutoranda Fernanda Souto, agradeço por ter me acolhido quando entrei no projeto SACRE e pela coorientação durante o meu primeiro ano de iniciação científica. Estendo meus agradecimentos a toda a equipe do SACRE, pois sei que é necessária a contribuição de todos para que um projeto grande funcione bem.

Na figura do Prof. Dr. Renato Moraes, que me introduziu no mundo da pesquisa acadêmica em plena pandemia, enfatizo o meu agradecimento a todos os professores, motoristas e funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pela atenção e contribuição ativa na minha formação.

Agradeço imensamente à minha mãe, Marcia, meu principal porto seguro, que sempre esteve ao meu lado tanto nos dias de maior felicidade quanto nos mais cansativos, me dando carinho e suporte incondicional. À minha irmã, Carla, por ser meu exemplo de dedicação e persistência, minha melhor amiga e estar presente todas as vezes que precisei. À minha mãe e irmã, agradeço por serem as mulheres mais corajosas que conheço. Ao meu pai, Celso, por me ensinar a desenhar, o que se mostrou extremamente útil na geologia, e por se manter ao meu lado ao longo das minhas escolhas.

Aos meus amigos, minha segunda família, agradeço o companheirismo, que mesmo muitas vezes estando longe, fazem questão de se mostrarem presentes de alguma forma, fornecendo amparo e momentos de felicidade. Agradeço por todos os almoços no bandejão, por terem ido até o aeroporto me desejar boa viagem ao Canadá, por irem na minha frente no campo quando eu estava sem perneira e me incentivarem a sair da zona de conforto para conquistar meus sonhos. À minha turma, na totalidade, agradeço pelas diversas horas que passamos juntos, pelas viagens intermináveis de ônibus e por todas as risadas.

Ao Gabriel, agradeço por estar comigo durante esses cinco anos e até mesmo antes! Obrigada por tornar tudo mais leve, por me acalmar só de estar presente, por me lembrar que existem coisas mais importantes na vida e por ser meu sinônimo de amor e conforto.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela Bolsa de Iniciação Científica (2022/16409-4), Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior (2023/07237-8) e pelo Projeto Temático SACRE (2020/15434-0), fundamentais para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à Mel, que nunca será capaz de ler este agradecimento, mas que eu adoro e é a melhor companheirinha de todas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	7
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
3.1. Caracterização da área de estudo	7
3.2. Geologia e Hidrogeologia do SAG	7
4. MATERIAIS E MÉTODOS	8
4.1. Levantamento de informações preexistentes e elaboração de banco de dados	10
4.2. Modelagem Geológica Tridimensional	11
4.3. Modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas em meios porosos	13
4.4. Modelo de circulação de água do SAG	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	16
5.1. Análise e reinterpretação das perfilagens geofísicas de poços	16
5.2. Modelo geológico tridimensional	19
5.3. Modelo hidrogeológico conceitual	21
5.4. Desenvolvimento de modelo numérico para o fluxo de água subterrânea do SAG	27
5.5. Simulação de cenários futuros	35
5.5.1. Cenário 1: Desligamento imediato dos poços	35
5.5.2. Cenário 2: Bombeamento contínuo com as vazões atuais	36
5.5.3. Cenário 3: Alocação de novos poços e aumento das extrações	37
5.6. Estimativa dos raios de interferência	39
6. CONCLUSÕES	41
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um dos mais importantes mananciais para o abastecimento público e privado do Estado de São Paulo (Foster et al., 2009). Em Bauru, cerca de 40 poços tubulares extraem 29,86 Mm³/ano de águas fósseis do SAG, suprindo 65% da demanda hídrica da cidade, enquanto aproximadamente 35% da população é abastecida pela captação no rio Batalha (15,77 Mm³/ano) (Hirata et al., 2022). Por conta das crises hídricas recorrentes, especialmente a partir de 2014, o Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE-Bauru) intensificou a perfuração de novos poços no SAG para garantir a continuidade do abastecimento.

Apesar do SAG ser considerado um recurso estratégico para o Estado de São Paulo, ele é um aquífero fóssil, ou seja, suas águas datam de mais de 700 ka (Aggarwal et al., 2015) na maior parte de sua ocorrência, o que o torna um recurso não renovável (Foster et al., 2009). Em Bauru, o SAG tem águas com idades superiores a 30 ka (Aggarwal et al., 2015), tornando crucial o entendimento de sua geometria e capacidade de armazenamento, pois trata-se de um recurso finito, que tem perdido em média 1 m/ano de carga hidráulica na área de maior exploração na região central da área urbana, segundo levantamento do DAE-Bauru (DAEE, 2015). Esta taxa de rebaixamento contínuo também é observada em Ribeirão Preto, São José do Rio Preto e outras cidades onde o SAG é o principal fornecedor de água (Gonçalves et al., 2020). Nesse contexto, não é possível alcançar uma exploração sustentável, a qual requer um balanço entre recarga e extração (Rörig et al., 2024). Portanto, é necessário encontrar formas para um manejo planejado deste aquífero que concilie ganhos econômicos e sociais com o seu melhor uso, submetendo-o a uma exploração que traga maior longevidade.

Bauru possui atualmente 40 poços municipais ativos no SAG, os quais possuem perfilagens geofísicas, além de testes de bombeamento de vazão máxima, escalonado e recuperação, com dados hidráulicos confiáveis (transmissividade, T; capacidade específica, Q/s). Poucas localidades no país e, sobretudo neste aquífero, têm tal disponibilidade e densidade de dados, tornando Bauru um local valioso para avançar no conhecimento sobre o aproveitamento de águas fósseis, tema ainda muito pouco estudado no país.

Neste contexto, o presente Trabalho de Formatura (TF) integrou bases de dados já existentes com o objetivo de aprimorar o modelo conceitual de fluxo do SAG na área urbana de Bauru (SP) e desenvolver um modelo numérico de fluxo de águas subterrâneas.

Para isso, imagens de satélite, informações geológicas regionais e locais, informações geofísicas, bem como dados hidrogeológicos para a composição de modelos tridimensionais e mapas de avaliação de potencialidade aquífera foram utilizados e interpretados ainda durante o trabalho de Iniciação Científica e o período de estágio de pesquisa no exterior, na Universidade de Waterloo (Canadá), ao longo do ano de 2023.

2. OBJETIVOS

Este estudo objetiva estimar os volumes total e explotável de água do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na área urbana da cidade de Bauru, avaliando a condição atual de bombeamento, as interferências entre poços e projetando seu uso em cenários hipotéticos de aumento das extrações, além da sua capacidade de recuperação com a interrupção do bombeamento. Para alcançar este propósito, foi construído um modelo numérico de fluxo de água subterrânea, calibrado em estado transiente até as condições atuais de bombeamento. O modelo se fundamenta em um estudo detalhado da distribuição tridimensional das unidades hidrolitológicas que controlam a produtividade (transmissividade - T) e a longevidade da exploração de suas águas (armazenamento - S - e fluxos laterais regionais), com dados provenientes de testes de bombeamento e perfilagens geofísicas interpretadas anteriormente ao início deste trabalho.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Caracterização da área de estudo

O município de Bauru localiza-se no centro do Estado de São Paulo e possui uma população de 379.146 habitantes, dos quais 98% vivem na área urbana (IBGE, 2022). A área de estudo está inserida na sub-bacia do rio Bauru, na Unidade de Gerenciamento de Recurso Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI-13) e uma pequena parcela, na UGRHI-16 (Tietê-Batalha), na sub-bacia do rio Batalha.

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022) indicam que 99% da população de Bauru tem acesso ao abastecimento público de água, operado pelo Departamento de Água e Esgoto (DAE-Bauru). De acordo com o DAEE (2015), o volume total de água produzido pelo abastecimento público e pelas soluções alternativas particulares foi de 61,11 Mm³ em 2015. Desse valor, cerca de 26,4% provêm do rio Batalha, 47,8% dos poços tubulares do DAE-Bauru no SAG, 17,8% de poços particulares no Sistema Aquífero Bauru (SAB), e 7,9% de captações superficiais de uso consuntivo.

3.2. Geologia e Hidrogeologia do SAG

A hidroestratigrafia da área de estudo compreende o Sistema Aquífero Bauru (SAB), o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG), tendo como limite basal dessa sequência, o Aquiclude Passa Dois (APD) (Simonato et al., 2016). O SAG é constituído pelas unidades hidroestratigráficas Botucatu, porção superior, Guará (Paula e Silva et al., 2023), porção intermediária e Piramboia, porção basal, do Grupo São Bento - com o topo do contato em profundidades que variam de 58 m a 193 m na área urbana de Bauru (Silva e Chang, 2010).

Em determinadas regiões, o SAG pode apresentar-se como confinado no topo pelos basaltos do SASG, enquanto na área da janela estrutural de basalto - na região sudoeste de

Bauru - encontra-se sotoposto ao SAB. De acordo com Silva e Chang (2010) e DAEE (2015), não há uma conexão hidráulica em condições naturais entre o SAG e o SAB, provavelmente devido às porções argilosas existentes na base da Formação Adamantina, reconhecida como Formação Araçatuba, que atua como um aquitarde. Observa-se que, no geral, as espessuras do SAG são maiores na região a nordeste da área de estudo, com uma espessura média do SAG na ordem de 350 m na porção nordeste e 60 m na porção sudoeste do município de Bauru, próximo à cidade de Piratininga (Boico et al., 2018; DAEE, 2015).

As Formações Piramboia, Guará e Botucatu são compostas principalmente por arenitos, depositados em condições sedimentares eólicas distintas, sendo a primeira associada a um sistema eólico úmido, a segunda a um sistema flúvio-eólico - no qual os depósitos eólicos em direção ao topo indicam um sistema deposicional variando de úmido a seco - e a última a um sistema eólico seco (Giannini et al., 2004; Gesicki, 2007; Paula e Silva et al., 2023). Em Bauru, a Formação Piramboia é caracterizada por corpos de arenitos róseos esbranquiçados muito finos a finos, intercalados com siltitos. A Formação Guará é marcada por arenitos quartzosos avermelhados de granulação muito fina a média, no topo, e arenitos conglomeráticos intercalados com siltitos e folhelhos, na base (Paula e Silva et al., 2023). Já na Formação Botucatu há a predominância de arenitos bem selecionados de granulação fina a média. (Gesicki, 2007; Hirata et al., 2011, Paula e Silva et al., 2023).

Os poços do SAG localizados no Estado de São Paulo são aqueles que possuem as maiores produtividades. Várias captações fornecem mais de 600 m³/h nas porções confinadas e 150 m³/h nas porções não confinadas do aquífero (Hirata et al., 2011). Esta alta produtividade dos poços está ligada a valores elevados de condutividade hidráulica, sendo que os valores médios obtidos no SAG são de $2,31 \times 10^{-5}$ a $1,74 \times 10^{-4}$ m/s com uma média de $1,50 \times 10^{-4}$ m/s (Hirata et al., 2011). Na cidade de Bauru, estudo de Boico et al. (2018) indica uma condutividade hidráulica de $3,70 \times 10^{-5}$ m/s.

Em contraste com a alta condutividade hidráulica, as velocidades lineares de fluxo de águas subterrâneas médias são baixas como consequência de um gradiente hidráulico regional reduzido (normalmente 0,0001 e 0,0003 m/m) (Hirata et al., 2011). Na cidade de Bauru, Boico et al. (2018) apresenta um valor de gradiente hidráulico de 0,0008 m/m, na direção do escoamento. Ademais, considerando valores efetivos de porosidade de 15% (de 10 a 30%), observa-se regionalmente uma velocidade linear média na porção confinada do aquífero de 0,5 m/dia, em contraste com a velocidade observada na porção não confinada, que atinge 5 m/dia (Hirata et al., 2011).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas de desenvolvimento deste Trabalho de Formatura encontram-se na Figura 1.

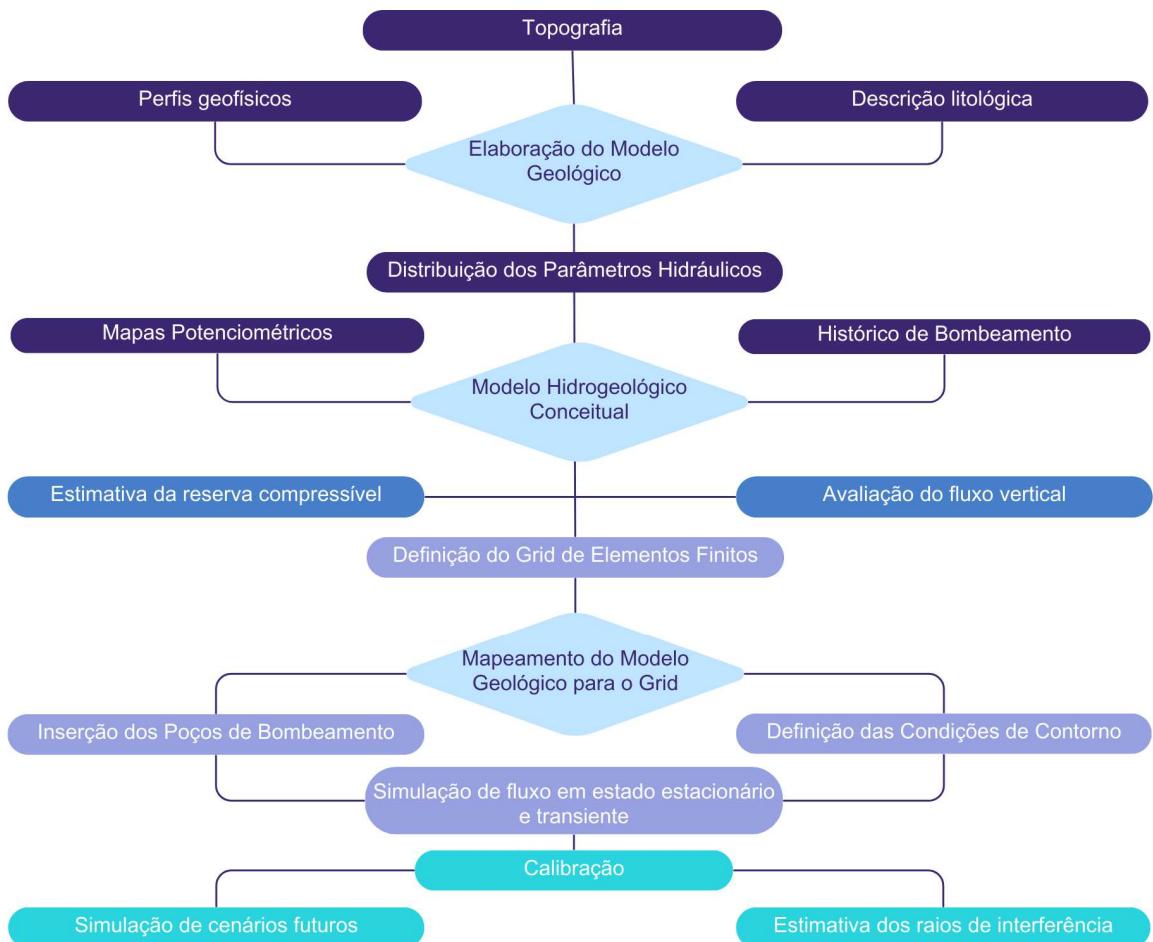


Figura 1. Fluxograma para a elaboração do Trabalho de Formatura.

As etapas iniciais de tratamento e importação de dados começaram ainda durante o trabalho de iniciação científica, com a compilação de relatórios de poços, testes de bombeamento, perfilagens geofísicas, vazões e níveis d'água fornecidos pelo DAE-Bauru. O foco inicial foi a reinterpretar das perfilagens geofísicas e dos perfis litológicos para desenvolver um modelo de blocos que representasse a geologia do SAG. A geometria deste aquífero foi definida utilizando o software Leapfrog Works®.

A análise dos parâmetros hidráulicos dos poços, a distribuição espacial e o histórico de bombeamento da cidade, correlacionados com as litologias discretizadas na modelagem, resultaram na elaboração de um modelo hidrogeológico do SAG para a região de Bauru, o qual permitiu estimar suas reservas total e compressível. Estas informações foram mapeadas para a modelagem de fluxo no software FEFLOW, onde foram definidas as condições de contorno e o domínio da modelagem. As simulações de fluxo foram realizadas em estado estacionário e transiente, partindo-se de uma condição inicial de baixo bombeamento e calibrada para a evolução do bombeamento da cidade. Modelos previsionais de cenários hipotéticos de interrupção imediata do bombeamento, de manutenção das extrações atuais e

de aumento das extrações através da alocação de novos poços foram simulados. Por fim, os raios de interferência dos poços no SAG foram estimados.

Os principais estágios que compõem este fluxograma estão descritos nos respectivos subtópicos deste capítulo de materiais e métodos.

4.1. Levantamento de informações preexistentes e elaboração de banco de dados

Esta etapa envolveu o desenvolvimento de um banco de dados utilizando informações de relatórios técnicos de 68 poços tubulares profundos operados pelo DAE-Bauru, fornecidos em formato digital e em papel. Os dados foram compilados e organizados segundo os seguintes parâmetros: nome do poço e identificação do DAE-Bauru (UP), qualidade da descrição geológica, ano de instalação, coordenadas de localização, cota, profundidade do poço, existência de perfilagem geofísica (métodos utilizados e escala vertical disponível) e testes de bombeamento (Tabela 1).

Foram priorizados os poços de abastecimento público em vez dos particulares, uma vez que apresentavam relatórios mais completos, com descrições litológicas detalhadas, perfis geofísicos, dados construtivos, além de possuírem volumes de extração mais significativos no SAG em comparação aos poços privados.

Tabela 1. Modelo da planilha de dados gerada no programa Excel a partir das informações dos poços tubulares operados pelo Departamento de Água e Esgoto do Município de Bauru (DAE-Bauru).

UP	Nome DAE	Ano de Instalação	UTM E (X)	UTM N (Y)	Cota (m)	Profundidade (m)	Perfilagem Geofísica/ Escala Vertical	Perfil Geofísico			
								G	R	D	S
								R	E	T	P
<i>Perfuração</i>											
UP33	Parque Real II	1995	692940	7529457	540	188,5	Sim, 1:500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Alto Paraíso	2021	695361	7529477	592	253,0	Sim, 1:500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
UP68	Praça Portugal	2021	698979	7528707	589	326,0	Sim, 1:200 e 1:500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
UP66	Nações Unidas	2012	700153	7528975	561	320,0	Sim, 1:200 e 1:500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
UP53	Geisel III	2019	702004	7528655	547	300,0	Sim, 1:200 e 1:500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
UP64	Bauru XXV	1995	704433	7529088	524	300,7	Sim, 1:500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

No âmbito dos relatórios de poços de abastecimento fornecidos pelo DAE-Bauru, foram adquiridos 44 poços com perfis geofísicos que abrangem várias localizações na área urbana de Bauru (Fig. 2). Dentre as perfilagens geofísicas compiladas, encontram-se perfis de raios gama (GR), perfis elétricos, como potencial espontâneo (SP), resistividade normal (SN) e condutividade por indução (DIR), além de perfis sônicos (DT). A análise de cada perfilagem foi integrada às descrições litológicas das amostras de calha obtidas na perfuração de cada poço estudado, permitindo delimitar contatos litoestratigráficos que seriam posteriormente incorporados ao modelo geológico.

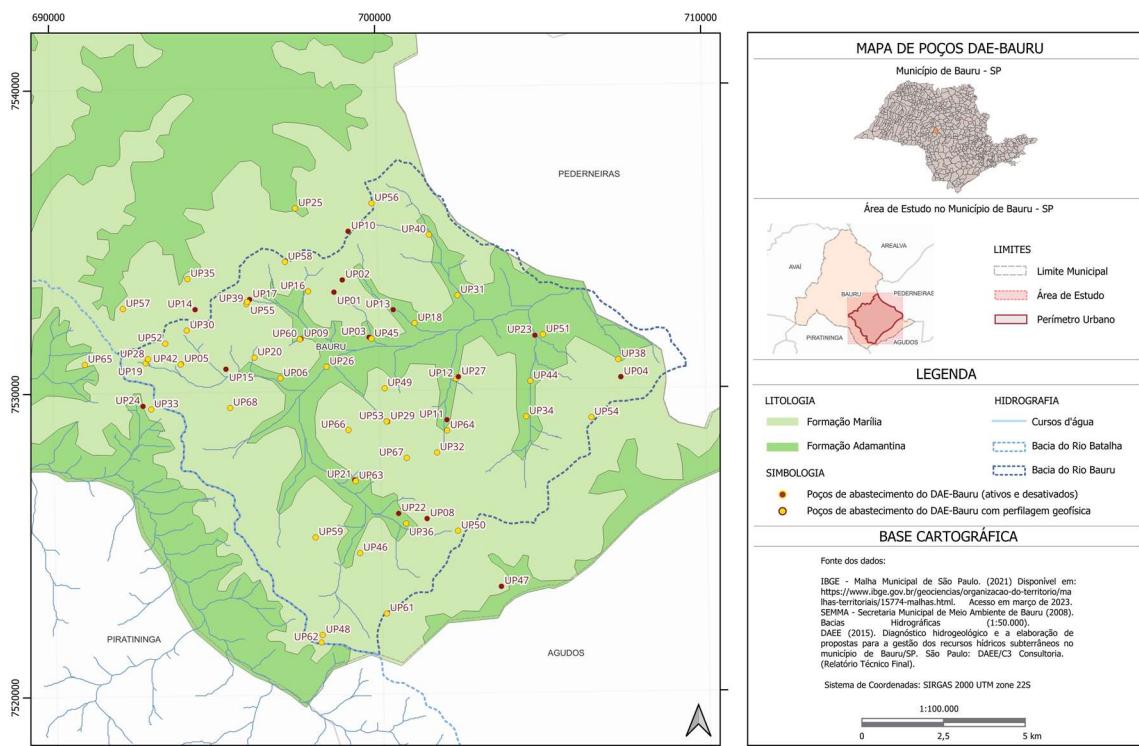


Figura 2. Distribuição dos poços de abastecimento operados pelo DAE-Bauru.

4.2. Modelagem Geológica Tridimensional

Modelos geológicos construídos a partir de técnicas numéricas vêm sendo adotados amplamente na hidrogeologia (Yang et al., 2009; Hassen et al., 2016; D’Affonseca et al., 2020).

Dentre os tipos de modelagem, destacam-se a explícita, implícita e mista, todas elas, pertencentes à classe de modelagem geológica determinística (Aldous, 1999). Segundo Cowan et al. (2003), a modelagem explícita é um método manual, que depende da digitalização de linhas, muitas vezes a partir de seções geológicas preexistentes e previamente interpretadas. Trata-se de um método de difícil replicabilidade, pois com os mesmos dados é possível chegar a modelos distintos, uma vez que estes dependem da interpretação do modelador. Além disso, essa modelagem também pode levar mais tempo

para ser finalizada, dependendo da complexidade das seções a serem digitalizadas, e consistem em modelos estáticos, ou seja, a adição de novas informações implicará, necessariamente, na elaboração de um novo modelo.

Por sua vez, a modelagem implícita consiste em um método automatizado, capaz de modelar superfícies a partir de dados espacializados através de algoritmos (Gou et al., 2016). Nesse contexto, uma série de metodologias foram propostas para a aplicação da modelagem implícita como a krigagem (Pereira et al., 2017), função da distância (Wilde e Deutsch, 2012) e *Radial Basis Function (RBF)* (Vollgger et al., 2015). Esse último, trata-se de uma série de funções que são apresentadas por Caumon et al. (2012):

$$f(x) = \sum_{l=1}^L c_l \cdot p_l(x) + \sum_{n=1}^N \lambda_n \cdot \Phi(|x - x_n|) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$p_l(x)$: São funções polinomiais de base

c_l : Coeficientes de drifte

L: Total de termos polinomiais

N: Número de pontos de dados

$\Phi(|x - x_n|)$: É uma função de covariância entre um ponto de dado (x_n) e um ponto desconhecido (x).

λ_n : São os coeficientes de interpolação desconhecidos

Para encontrar os coeficientes, é necessário resolver o seguinte sistema linear:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \Phi & P \\ P^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \\ & \Phi = \begin{bmatrix} \phi(0) & \cdots & \phi(|x_1 - x_N|) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(|x_N - x_1|) & \cdots & \phi(0) \end{bmatrix} \quad \text{Equação 2} \\ & P = \begin{bmatrix} p_1(x_1) & \cdots & p_L(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1(x_N) & \cdots & p_L(x_N) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Este trabalho utiliza o software Leapfrog Works® 2024.1 que aborda a modelagem implícita. Dentre as metodologias que foram propostas para a aplicação da modelagem implícita, destaca-se o *Fast Radial Basis Function (Fast RBF™)*. Esse algoritmo tem a capacidade de interpolar uma série de dados, consumindo de forma inteligente a capacidade computacional, além de conseguir extrapolar os dados em locais com vazios de dados.

A modelagem geológica tridimensional baseou-se na reinterpretAÇÃO dos perfis de 44 poços operados pelo DAE-Bauru. Esta iniciou-se com a importação de um arquivo raster da superfície topográfica da Bacia do Rio Bauru para que as camadas superiores do modelo geológico (Grupo Bauru) fossem ajustadas para coincidir com a superfície do terreno da área de estudo, permitindo uma representação mais precisa da geometria das unidades. A localização e profundidade das unidades litoestratigráficas identificadas foram interpoladas

para definir superfícies de contato, que foram validadas ao comparar as superfícies modeladas com os intervalos descritos nos poços.

Os volumes finais de cada unidade litoestratigráfica foram gerados da mais recente à mais antiga: Grupo Bauru, Grupo São Bento (Formações Serra Geral, Botucatu, Guará e Piramboia) e, por fim, Grupo Passa Dois.

4.3. Modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas em meios porosos

Este trabalho utilizou o software FEFLOW 8.0 (Diersch, 2014) para modelagem de fluxo na zona saturada, que parte da derivação da equação de fluxo em meios porosos, a partir da combinação do balanço de água e da lei de Darcy, permitindo simular, por exemplo, aquíferos heterogêneos e anisotrópicos em regime transiente. O programa utiliza o método de elementos finitos para solucionar a equação geral de fluxo de águas subterrâneas em cada elemento (triângulos em 2D e prismas em 3D) do *mesh* da grade, combinando recursos gráficos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) com técnicas de solução de elementos finitos. O sistema flexível de geração do *mesh* permite refinamentos, a partir de pontos, linhas e/ou polígonos.

As condições de contorno podem ser do Tipo Dirichlet (carga especificada), tipo Neumann (fluxo especificado) e tipo Cauchy (fluxo dependente da carga). Restrições também podem ser definidas para fluxo ou carga através de nós, elementos ou limites de domínio. O Leapfrog Works® é compatível com o FEFLOW, tornando possível incorporar seus resultados na modelagem de fluxo.

Para a simulação em estado transiente, os volumes explotados de referência foram oriundos de uma série de dados de bombeamento contínua e anual, partindo dos poços existentes entre 2001 até 2022, considerando poços desativados ou construídos ao longo deste período.

O critério de calibração adotado é relativo às diferenças de cargas hidráulicas calculadas pelo modelo dentro do domínio em comparação aos valores observados nos poços, calculando-se a Raiz do Erro Médio Quadrático Normalizado, assumindo-se um valor inferior à 10% como nível de acurácia aceitável (Anderson et al., 2015). A raiz do erro médio quadrático (REMQ) é calculada a partir da raiz da somatória das diferenças quadráticas (ou o quadrado do resíduo do modelo) de cada uma das amostras (calculadas e observadas) divididas pela quantidade total de amostras (T):

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (x_{1,t} - x_{2,t})^2}{T}} \quad \text{Equação 3}$$

A normalização (REMQN) é feita dividindo-se o resultado pela diferença entre o máximo e mínimo dos valores observados:

$$REMQN = \frac{REMQ}{(x_{max} - x_{min})} \quad \text{Equação 4}$$

Este modelo foi calibrado para o estado estacionário e transiente. A calibração estática representa somente uma condição inicial para o SAG, calibrada qualitativamente a partir da análise de mapas potenciométricos baseados nas medições de nível estático obtidas na perfuração dos poços mais antigos (entre 1978 e os anos 2000), quando o bombeamento ainda era bastante inferior às condições atuais. A calibração em estado transiente baseou-se nas medições de cargas hidráulicas dinâmicas disponíveis nos poços de abastecimento do DAE nos anos de 2005, 2010, 2015, 2020 e 2022, representando o resultado de anos de extrações do SAG. Foi considerada toda a distribuição de dados para comparação entre valores observados e modelados.

Atentando-se ao nível de detalhe deste estudo, os objetivos da modelagem e prazos, a calibração para o conjunto é suficientemente adequada. Ademais, uma calibração qualitativa também foi feita, como a reprodução das zonas críticas de rebaixamento observadas na modelagem conceitual e o sentido de avanço do cone de rebaixamento ao longo dos anos de simulação, corroborando estudos de Boico et al., 2018.

4.4. Modelo de circulação de água do SAG

Após a construção do modelo geológico de blocos no programa Leapfrog Works®, foi possível reconhecer as diferentes litologias e suas relações hidráulicas dentro do SAG (estimativas de transmissividade -T e condutividade hidráulica - K), com base nos 37 testes de bombeamento dos poços do Departamento de Água e Esgoto (DAE) e o monitoramento das cargas hidráulicas no tempo. Desta forma, foram identificados os principais condicionantes geológicos que desempenham um papel de controle da produtividade dos poços tubulares, além de construídos mapas potenciométricos da evolução dos níveis d'água, através da interpolação pelo método de krigagem simples no software QGIS 3.28.3, e calculados os volumes extraídos do SAG historicamente.

Considerando que o SAG possui dois níveis de confinamento: (I) na porção nordeste, onde o SAG se encontra confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral e (II) na porção central e sudoeste, onde se encontra confinado pelos níveis argilosos da base do Grupo Bauru, relativos à Formação Araçatuba, foi estimado o grau de conexão hidráulica entre o Sistema Aquífero Bauru (SAB) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG).

A partir de estudos realizados na cidade de Bauru, foi obtida a potociometria dinâmica do SAB do ano de 2022 (Marques et al., 2024) e a espessura da Formação Araçatuba (Freitas et al., 2024). O gradiente hidráulico foi, posteriormente, calculado comparando-se com a potociometria dinâmica de 2022 do SAG e determinada a velocidade de fluxo real e o seu sentido.

A reserva compressível também foi estimada. Esta representa o volume de água que um aquífero confinado é capaz de armazenar - ou liberar - a partir da variação da compressão dos seus grãos (Woessner e Poeter, 2020). A estimativa teve como base o volume total da geometria do SAG, calculado com a modelagem geológica, e a partir dos parâmetros de armazenamento específico [1/m] e espessura saturada média [m] do SAG.

O DAE-Bauru tem acompanhado os níveis potenciométricos mensais desde 2007 em todos os poços em operação. Com a interpretação conjunta entre o modelo geológico e os dados hidrogeológicos foi possível compor o modelo de fluxo, através do software FEFLOW.

Com base no modelo calibrado, foram criados três cenários hipotéticos de variação da exploração para avaliar o comportamento hidráulico do SAG nas condições propostas:

- I. A primeira simulação previsional considera um cenário hipotético no qual o bombeamento atual é cessado imediatamente, permitindo analisar a capacidade de recuperação do aquífero ao longo do tempo apenas pelo fluxo lateral.
- II. A segunda simulação considera o volume atual de extração dos poços e apenas a mantém para os instantes seguintes, possibilitando reconhecer o tempo necessário para a estabilização dos cones de rebaixamento.
- III. O último cenário proposto simula a alocação de novos poços, considerando fatores como a produtividade do aquífero, a distribuição das unidades hidrogeológicas e parâmetros hidráulicos. Nesta última simulação, o volume de extração dos poços é projetado para um intervalo de 10 anos, levando em conta a tendência de aumento observada ao longo dos últimos anos (2010 - 2022).

Vale destacar que este estudo não inclui uma análise aprofundada de projeções populacionais para avaliação da demanda hídrica futura ou dos impactos socioeconômicos para a estratégia de alocação e, portanto, estes fatores não foram considerados nos cenários hipotéticos futuros.

Os raios de interferência dos poços foram estimados considerando o limite em que o bombeamento passa a exercer uma interferência mínima nas linhas equipotenciais. Este critério implica em uma distância que a diminuição da carga hidráulica foi relativamente baixa, permitindo delimitar as áreas de influência dos poços com maior precisão. A partir desta definição de alcance, foram geradas zonas de interferência específicas para poços situados em diferentes unidades hidrogeológicas do SAG: na região onde a Formação Botucatu está presente, na janela de basalto onde se tem apenas as Formações Guará e Piramboia e na área que abrange somente a Formação Piramboia.

Outro ponto relevante é que as estimativas foram feitas após a estabilização dos cones de rebaixamento, tornando o fator tempo irrelevante para a análise. Isso assegura que os

dados obtidos refletem uma configuração estável, independentemente da duração do bombeamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise e reinterpretação das perfilagens geofísicas de poços

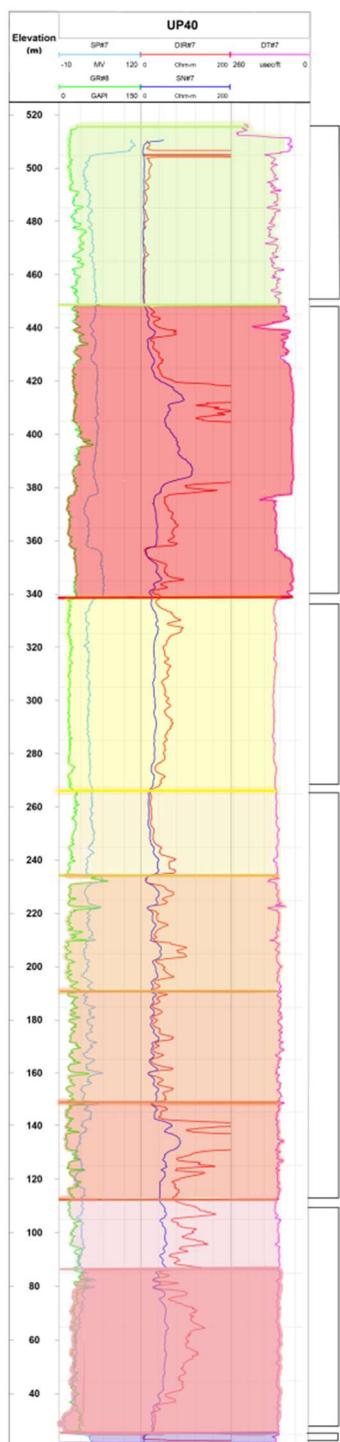
Em um primeiro momento, é importante destacar que neste Trabalho de Formatura não houve um aprofundamento nos conceitos de perfilagem geofísica, mas sim nas respostas encontradas nos perfis que foram utilizadas para reconhecer as unidades geológicas. Dentre os 44 poços com perfilagem geofísica, descritos no item 4.1, foram selecionados os poços UP40 (Lotes Urbanizados), situado na região NE, e o UP49 (Cardia), situado na região central, para demonstrar a reinterpretação da perfilagem geofísica e a análise lito-hidroestratigráfica (Figs. 3 e 4). Estes poços penetram completamente o SAG e se encontram em dois cenários diferentes de confinamento. O UP40 está localizado em uma área confinada pelo basalto da Formação Serra Geral, enquanto o UP49 se encontra na região da janela estrutural de basalto, estando confinado apenas pela Formação Araçatuba, base do Grupo Bauru.

Em relação aos sinais geofísicos utilizados para identificação das formações, tem-se:

- I. A Formação Serra Geral é facilmente distinguível no perfil sônico (DT) devido à sua composição basáltica, que apresenta alta velocidade de propagação das ondas sonoras, refletindo seu caráter de uma rocha densa e dura. Este sinal foi importante para também identificar pequenos *sills* de diabásio no meio das unidades do SAG, com espessuras de 10-30 m;
- II. A Formação Botucatu é caracterizada por um baixo valor de gama em comparação com o restante do perfil, sendo bastante homogêneo, com um formato mais planar e alta resistividade com poucas variações. Estas respostas são associadas a um baixo conteúdo de argila e alta porosidade na área de estudo (Paula e Silva et al., 2023). Isto é consistente com sua descrição na bibliografia e nos relatórios de poços do DAE como um arenito fino a médio com grãos bem arredondados e bem selecionados, tipicamente eólicos;
- III. A Formação Guará é marcada pela interação de um ambiente transicional flúvio-eólico, tornando-se muito mais heterogênea. Conforme destacado no artigo de Paula e Silva et al. (2023), a Formação Guará inicia com baixos valores de gama e alta porosidade, representando um nível de arenito grosso que aparece, dependendo da espessura da formação, sempre no topo (GR1). Em seguida, há uma variação no conteúdo de silte e argila intercalados em um arenito siltoso a argiloso, onde o gama demonstra um aumento combinado a uma alta oscilação e a resistividade diminui (GR2 e GR3). Por fim, encontra-se o arenito conglomerático, com alta resistividade e diminuição do sinal

- de gama em comparação com as intercalações da litologia anterior (GR4). Esta resposta conglomerática final está sempre na base da Formação Guará e é amplamente consistente ao longo da área de estudo;
- IV. A Formação Piramboia retoma um ambiente eólico, com baixo sinal de gama relativo. No entanto, a unidade de topo ainda contém níveis siltosos e/ou argilosos (PB1), o que confere uma resistividade reduzida em alguns perfis quando comparada à unidade basal da Formação Guará. Em seguida, ocorre uma diminuição no sinal de gama e um aumento na resistividade, representando possivelmente um arenito fino a médio para a base da Formação Piramboia (PB2). Na maioria dos perfis interpretados, a base da Formação Piramboia tende a ser mais arenosa do que sua unidade de topo;
- V. O Grupo Passa Dois é facilmente identificado por um aumento abrupto no sinal de gama e uma diminuição na resistividade, características de litologias de granulação muito fina e pouco permeáveis, como os siltitos argilosos descritos nos relatórios de poços.

Os poços UP40 e UP49 indicam que o SAG possui espessura variável ao longo da Bacia do Rio Bauru, relacionada à sua condição de confinamento. Na região nordeste, onde é confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral, o aquífero inclui todas as suas unidades hidrogeológicas, alcançando uma espessura de até 317 m no poço UP40 (Fig. 3). No caso do poço UP49 (Fig. 4), onde o SAG está sob o Grupo Bauru, a Formação Botucatu está ausente, resultando em uma espessura reduzida de 221 m e um confinamento decorrente apenas da Formação Araçatuba. Dessa forma, observa-se um afinamento do SAG da porção nordeste para sudoeste (NE-SW), mais bem discutido no item 5.2.



Grupo Bauru

Formação Serra Geral

Formação Botucatu

Formação Guará

Formação Piramboia

Grupo Passa Dois



LEGENDA

Grupo Bauru

Formação Serra Geral (SG)

SG: Formação Serra Geral
(basalto e diabásio)

Formação Botucatu (BT)

BT: Formação Botucatu
(arenito fino a médio avermelhado, com grãos bem arredondados e bem selecionados)

Formação Guará (GR)

GR1: Unidade 1 da Formação Guará
(arenito quartoso médio avermelhado)

GR2: Unidade 2 da Formação Guará
(arenito fino avermelhado intercalado com siltito)

GR3: Unidade 3 da Formação Guará
(arenito fino avermelhado intercalado com siltito e folhelho)

GR4: Unidade 4 da Formação Guará
(arenito conglomerático esbranquiçado)

Formação Piramboia (PB)

PB1: Unidade 1 da Formação Piramboia
(arenito argiloso bege muito fino a fino)

PB2: Unidade 2 da Formação Piramboia
(arenito fino a médio avermelhado)

Grupo Passa Dois (PD)

PD: Grupo Passa Dois
(siltito argiloso cinza arroxeados)

Figura 3. Perfilagem geofísica do poço UP40, com caracterização das unidades lito-hidroestratigráficas do SAG.

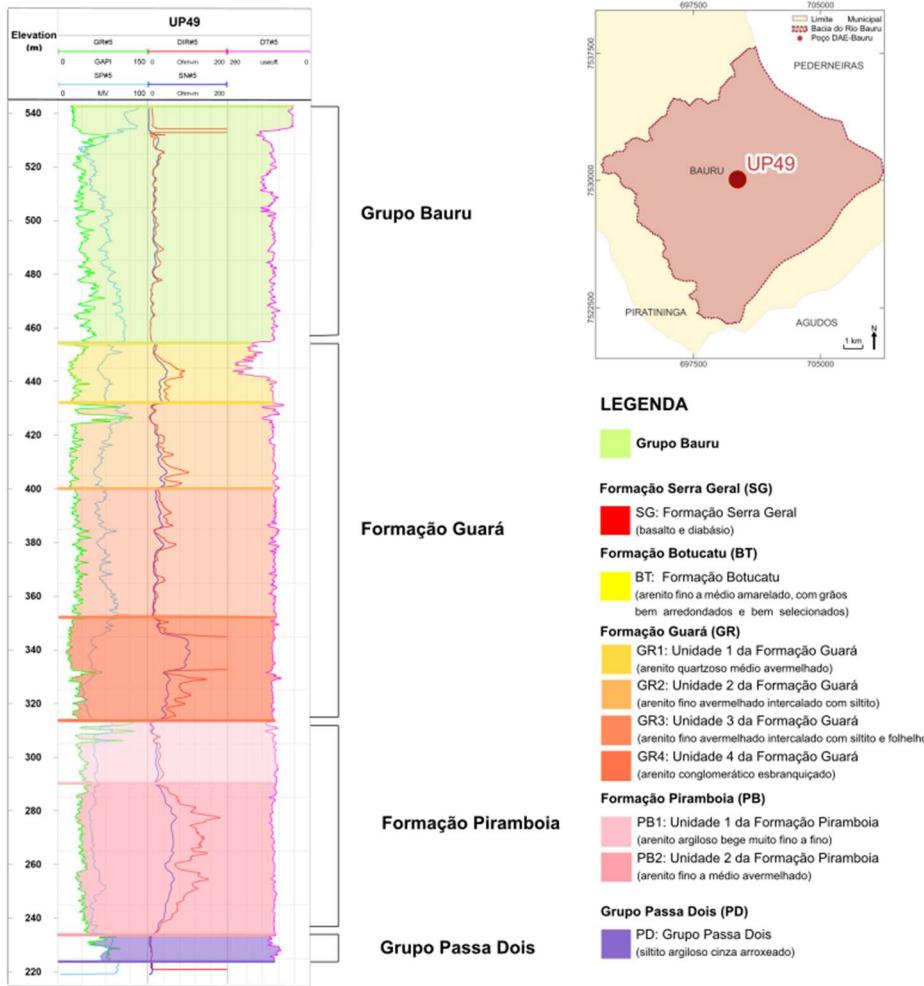


Figura 4. Perfilagem geofísica do UP49, com caracterização das unidades lito-hidroestratigráficas do SAG.

5.2. Modelo geológico tridimensional

Como descrito no item 5.1., foi realizada uma divisão detalhada, considerando as unidades hidrolitológicas do SAG, que são apresentadas no modelo como subdivisões das formações (Fig. 5).

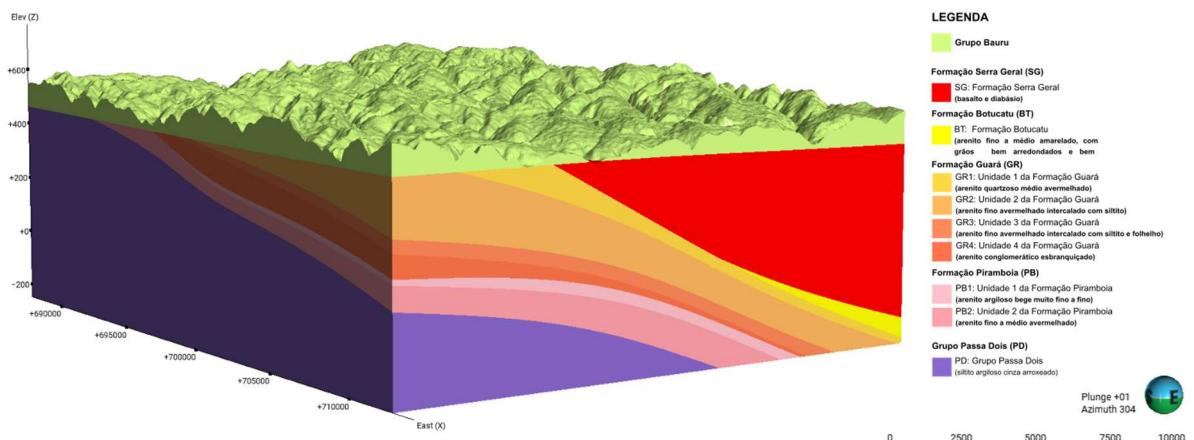


Figura 5. Modelo geológico tridimensional para a área urbana de Bauru - SP.

A partir do modelo, observa-se que a Formação Serra Geral se encontra entre as cotas 480 e 290 m (referenciado como metros sobre o nível do mar), com uma espessura variando de 8 m (UP16) a 175 m (UP51). A Formação Botucatu está presente entre as cotas 466 e 277 m e possui espessura variando de 36 m (UP38) a 118 m (UP56). A Formação Guará encontra-se entre as cotas 472 e 205 m e possui espessura de 11 m (UP20) a 164 m (UP56). Já a Formação Piramboia é encontrada entre as cotas 452 e 61 m e possui uma espessura que varia de 60 m (UP06) a 119 m (UP46).

O modelo geológico apresentado destaca uma variação nas espessuras das Formações Serra Geral, Botucatu, Guará e Piramboia, que apresentam suas maiores espessuras na porção confinada do SAG, localizada a nordeste da Bacia do Rio Bauru, onde basaltos de até 175 m da Formação Serra Geral são encontrados. Há uma relação entre essa variação e o controle estrutural da área. A presente área de estudo está inserida no contexto geológico da bacia intracratônica do Paraná, que compreende sequências sedimentares depositadas desde o Siluriano-Devoniano até o Cretáceo Inferior, marcado pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral, que delimitam o embasamento do Grupo Bauru (Fernandes e Coimbra, 1996).

Segundo Paula e Silva e Cavaguti (1994), o Grupo São Bento encontra-se sotoposto ao Grupo Bauru por um contato erosivo. Este contato erosivo está associado à reativação Wealdeniana, que atuou em toda a Bacia do Paraná no Mesozóico pré-Bauru. Na área de estudo, esta tectônica seria responsável pela reativação de falhas pré-cambrianas e pela origem de dois sistemas de falhas normais, com alto grau de mergulho e direções SE-NW e SW-NE, que teriam fragmentado o pré-Bauru em segmentos dispostos estruturalmente na forma de “horsts” e “grabens” próximo a Bauru. É dentro deste contexto que haveria a elevação do Alto Estrutural de Piratininga, localizado a sudoeste de Bauru.

Esta tectônica teria como consequência o soerguimento do embasamento e do Grupo São Bento, seguido por um período de intensa erosão em toda a região. Este último seria responsável pelas variações observadas nas espessuras das unidades, acarretando o afinamento do Grupo São Bento na borda sudoeste e o desaparecimento completo das Formações Botucatu e Guará (Fig. 6). Todo este processo é reafirmado também pela disposição da Formação Teresina, com mergulho abrupto a nordeste.

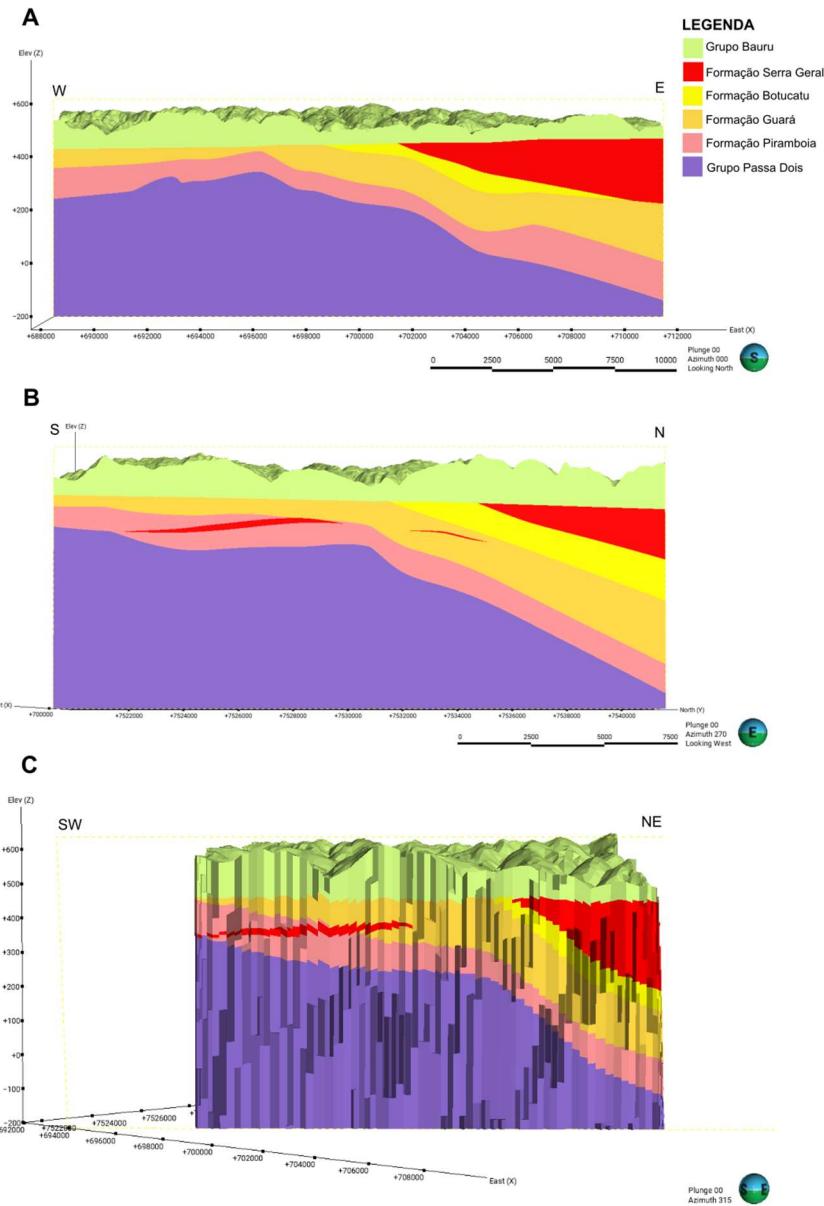


Figura 6. Seções geológicas no modelo geológico: A) Seção transversal de orientação E-W; B) Seção transversal de orientação N-S e C) Seção transversal de orientação NE-SW.

5.3. Modelo hidrogeológico conceitual

A espessura saturada média do SAG é variável, com valores de até 369 m, para a porção nordeste (NE) da bacia, e de 63 m na porção sudoeste (SW). A partir destes valores, considerando uma porosidade efetiva de 15%, uma espessura saturada média de 207,67 m foi calculada. Em relação aos volumes, tem-se que para a Bacia do Rio Bauru, a Formação Botucatu possui um volume de 3.660 Mm³, a Formação Guará possui 14.100 Mm³ e a Formação Piramboia possui 10.480 Mm³, totalizando um volume de 28.250 Mm³ para todo o SAG. Considerando um armazenamento específico de 10⁻⁵ e 10⁻⁶, obtém-se um volume compressível do SAG de 60 e 6 Mm³, respectivamente.

Nos mapas potenciométricos de carga estática (Fig. 7), é possível observar a direção preferencial de fluxo do SAG, que segue predominantemente de SSE para NNW. Notam-se alguns baixos de carga estática principalmente na porção central, associados à interferência entre poços durante a própria medição estática ao longo dos anos. Essa potenciometria foi buscada na modelagem estacionária para representar a condição inicial de fluxo. É importante destacar que as cargas máximas foram observadas a sudeste (SE), com valores em torno de 460 m, enquanto as cargas mínimas foram registradas a noroeste (NW), apresentando valores próximos a 400 m.

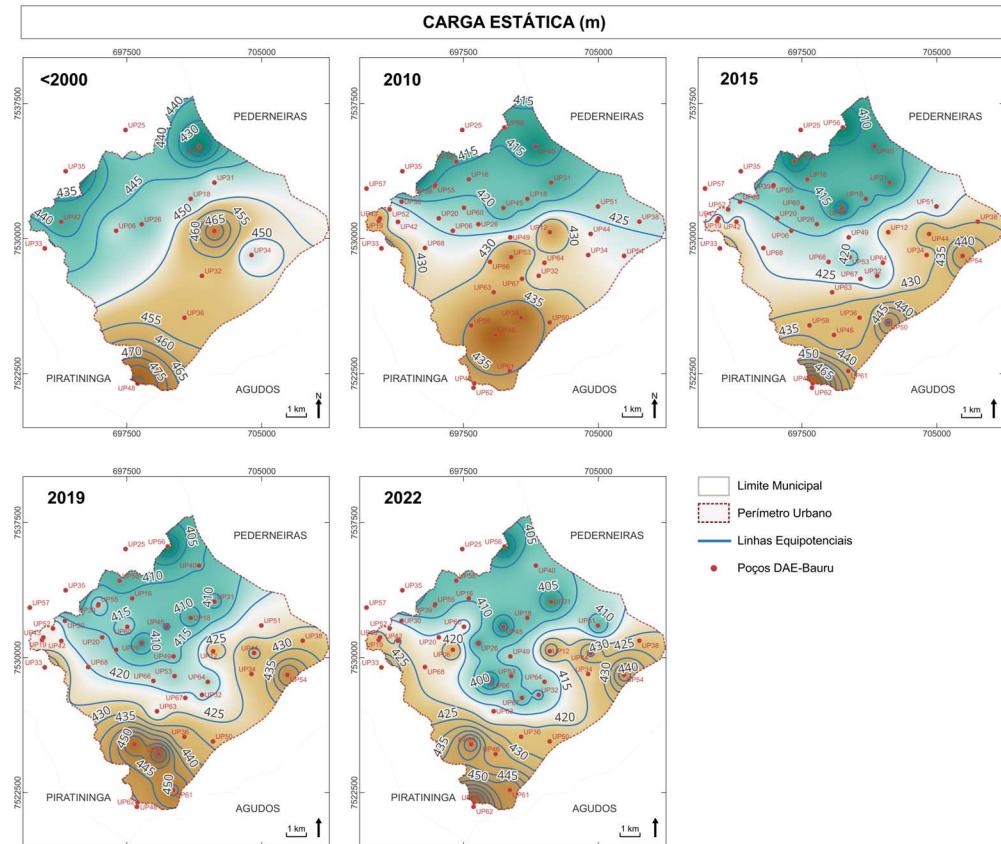


Figura 7. Monitoramento da carga estática entre o período de 2000 e 2022.

O aumento no bombeamento ao longo dos anos tem exercido influência na potenciometria do SAG (Fig. 8), gerando um cone de rebaixamento mais nítido no centro da área urbana, mas também presente nas bordas NE e SW. Considerando que as espessuras saturadas na porção NE e até mesmo em parte da porção central se mantém acima de 200 m, estes cones parecem ser resultantes da interferência entre poços, enquanto na região SW, o rebaixamento parece estar mais associado a uma menor espessura saturada, a qual é diretamente proporcional aos valores de transmissividade do aquífero, descrito a seguir.

Os mapas de resíduos (Fig. 9) representam os rebaixamentos observados ao longo dos anos, que aumentaram exponencialmente até 2022, com valores de até 80 m em relação à carga estática inicial, enfatizando um rebaixamento aproximado a uma taxa média de 2 m/ano.

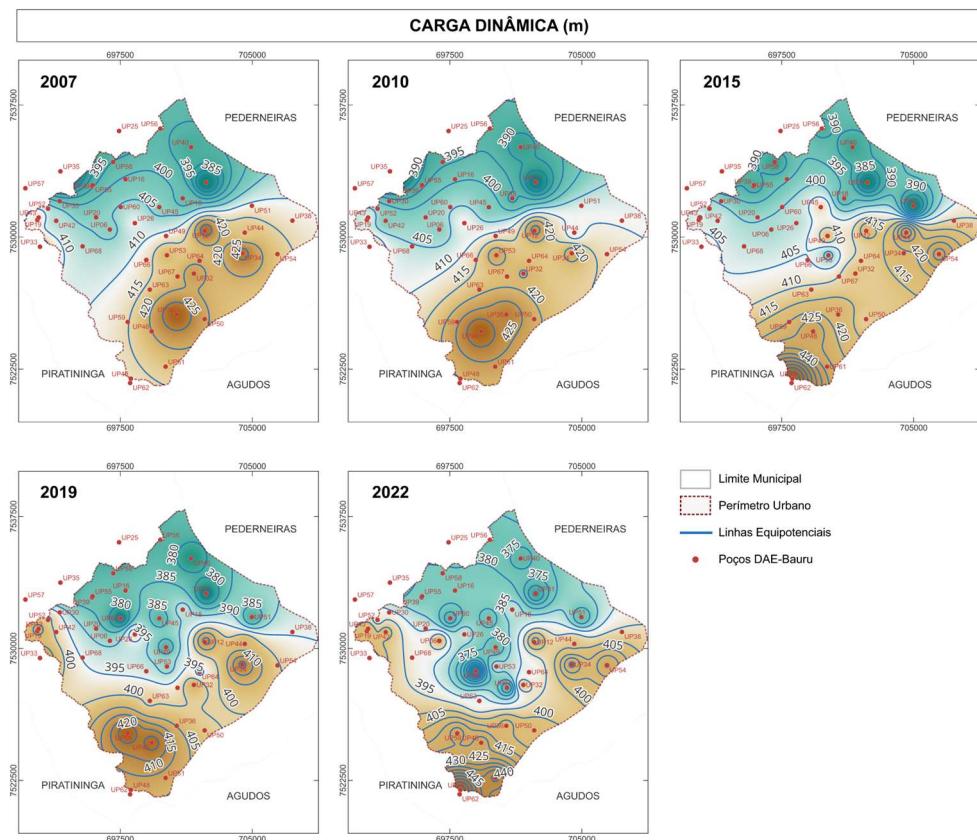


Figura 8. Monitoramento da carga dinâmica entre o período de 2007 e 2022.

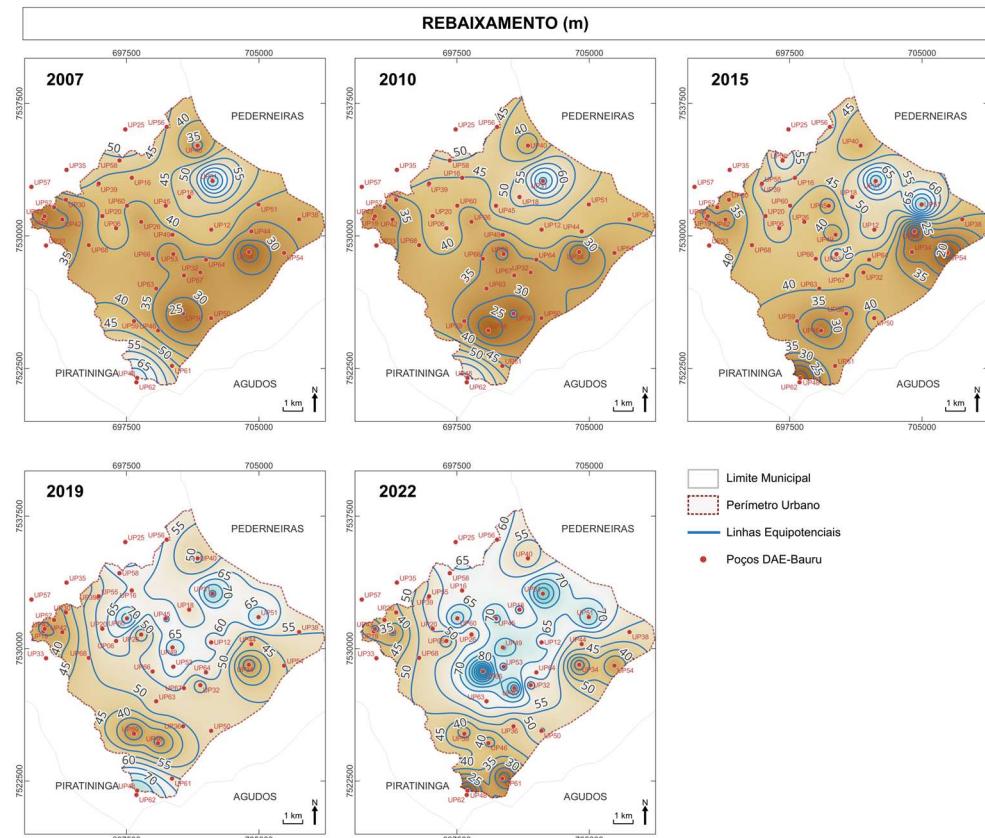


Figura 9. Distribuição dos resíduos para 2007, 2010, 2015, 2019 e 2022, em relação à potenciometria estática de 2000.

A espessura saturada do SAG parece ser o principal condicionante da hidráulica do aquífero (Fig. 10), onde os maiores valores (atingindo mais de 300 m) - localizados na porção NE da bacia - correspondem a valores elevados de capacidade específica (acima de 5 e até 15 m³/h) e transmissividade (15 a 25 m²/h). Importante destacar que, justamente nesta porção da bacia - onde a Formação Botucatu está presente - os poços apresentam uma maior eficiência no bombeamento. Da mesma forma, no sentido SW, direção em que o Grupo Passa Dois se torna mais raso, há perda de espessura saturada do SAG (atingindo até menos de 100 m), ocorrendo apenas a Formação Piramboia. Nessa região, as menores transmissividades e valores de Q/s também foram observados, com ambos não ultrapassando 5 m³/h. Enfatiza-se que estes valores de baixa transmissividade não são atribuídos a uma baixa condutividade hidráulica da Formação Piramboia comparativamente às demais, mas a uma perda de espessura saturada do SAG como um todo.

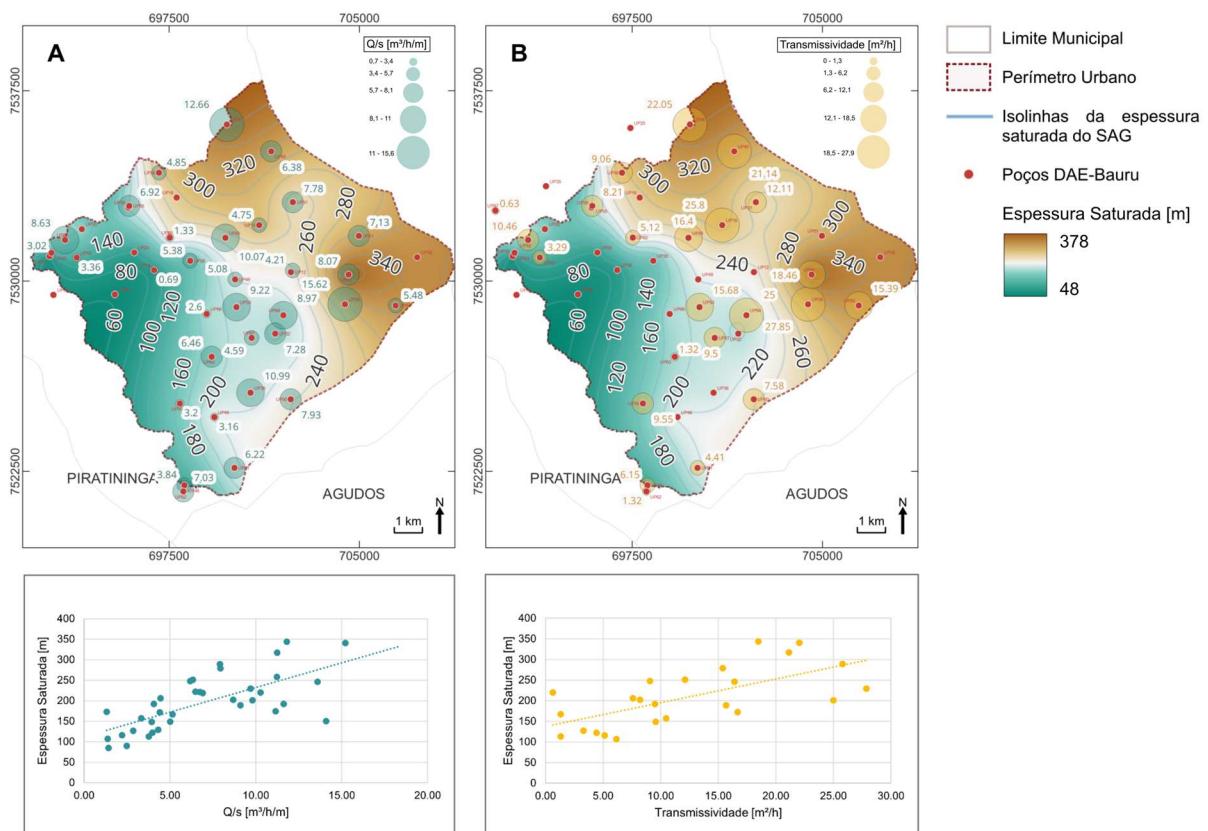


Figura 10. Correlação entre capacidade específica (Q/s), transmissividade (T) e espessura saturada: A) Correlação entre Q/s e espessura saturada; B) Correlação entre T e espessura saturada.

Os volumes extraídos (Fig. 11) mostram que a cidade tem explotado cada vez mais o SAG ao longo das décadas. Considerando uma reserva compressível de 60 Mm³ (definida a partir de um armazenamento específico de 10⁻⁵ e espessura saturada média de 207 m para a geometria modelada no tópico anterior) e os volumes explotados na Figura 11, tem-se que a extração em relação a reserva compressível nos limites da cidade para os anos de 2010 e 2023 foi de 40,89% e 60,65%, respectivamente. Isto representa um aumento de 48% em 13

anos. Se considerada uma extração constante a partir de 2023 (considerando o volume anual extraído de 35 Mm³ deste mesmo ano) e a ausência de fluxo lateral de águas subterrâneas para repor o armazenamento, a reserva existente suportaria a extração atual por apenas dois anos. Isso torna indiscutível a necessidade de se estimar o fluxo lateral no SAG para qualquer modelagem de fluxo na área.

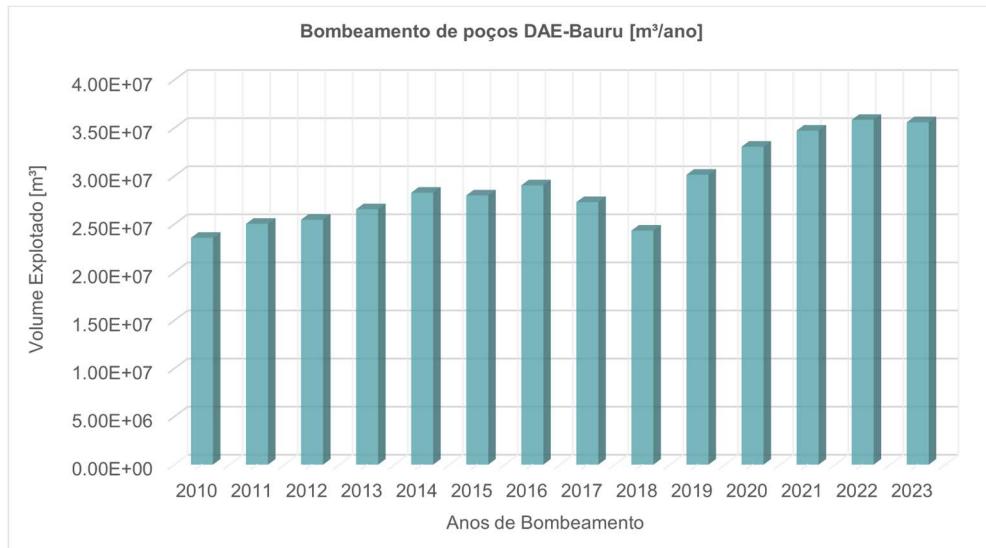


Figura 11. Volume explorado anualmente do SAG pelos poços do DAE-Bauru.

Neste contexto, a interação entre o Sistema Aquífero Guarani (SAG) e o Sistema Aquífero Bauru (SAB) deve ser analisada. A Formação Araçatuba (base do Grupo Bauru), atuando como um importante aquitarde, desempenha um papel crucial na compreensão da relação hidráulica entre o SAG e o SAB, uma vez que seu isolamento é significativamente menor em comparação aos espessos basaltos da Formação Serra Geral, os quais estão restritos à porção nordeste da Bacia do Rio Bauru. Historicamente, os gradientes hidráulicos do SAG eram substancialmente mais elevados do que os valores atuais (Fig. 7), uma diferença atribuída à intensificação dos volumes extraídos ao longo do tempo (Fig. 11). Ao comparar esses valores com a atual potociometria do SAB, observa-se um fluxo vertical descendente que ocorre em toda a área de estudo (Fig. 12).

A velocidade vertical de fluxo real no aquitarde foi estimada entre 0,06 e 6 m/ano, considerando uma condutividade hidráulica vertical (K_v) entre 1×10^{-9} e 1×10^{-11} m/s, típica de materiais argilosos (Domenico e Schwartz, 1998; Fetter, 2001), e uma porosidade efetiva de 5% para a Formação Araçatuba, que apresentou espessuras de 2 a 22 m (afinando em direção à Formação Serra Geral).

Embora o gradiente hidráulico entre os dois sistemas nunca tenha sido tão alto, o que reforça a baixa conectividade entre eles, o contínuo rebaixamento dos níveis potociométricos do SAG pode representar uma nova relação hidráulica para a cidade de Bauru, podendo ocasionar inclusive uma recarga de águas mais jovens para o SAG.

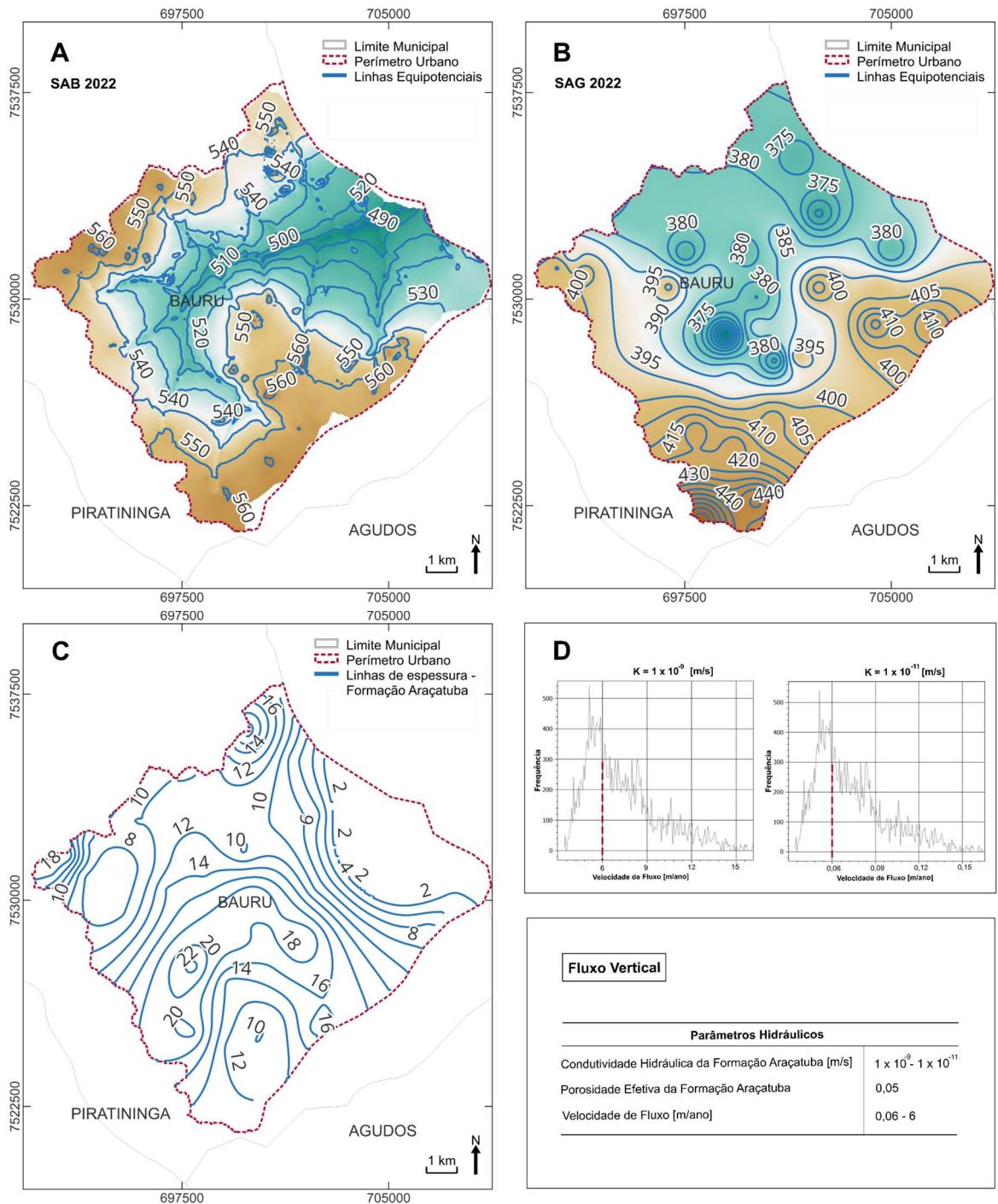


Figura 12. Fluxo vertical de água subterrânea através da Formação Araçatuba, indicando uma baixa conexão entre o Sistema Aquífero Bauru (SAB) ao Sistema Aquífero Guarani (SAG): A) Potociometria dinâmica do SAB para o ano de 2022 (adaptada de Marques et al., 2024); B) Potociometria dinâmica do SAG para o ano de 2022; C) Espessura da Formação Araçatuba na Bacia do Rio Bauru (adaptada de Freitas et al., 2024); e D) Histograma das velocidades de fluxo [m/ano], considerando uma condutividade hidráulica (K) para a Formação Araçatuba de 1×10^{-9} e 1×10^{-11} m/s - linha vermelha representa a tendência central dos valores de velocidade.

5.4. Desenvolvimento de modelo numérico para o fluxo de água subterrânea do SAG

Após desenvolver o modelo geológico, uma malha estruturada de elementos finitos 3D foi construída no software FEFLOW. Este *grid* possui dimensões superiores às da Bacia do Rio Bauru, cobrindo suficientemente a área dos poços e com a maior extensão possível sem comprometer a resolução. A escolha por um domínio mais extenso possui vantagens ao evitar extrações de poços próximos às condições de contorno que poderiam induzir um influxo lateral irrealista, além de ter como consequência o aumento do armazenamento total. O limite superior deste *grid* é definido pela superfície de contato entre as unidades confinantes do SAB e do SAG. Isto significa que a geometria de topo do modelo é a superfície de contato do SAG com as Formações Araçatuba ou Serra Geral. Já a superfície de contato entre a Formação Piramboia e o Grupo Passa Dois define o limite inferior.

Este modelo numérico é composto por 21 camadas, variando entre 2 e 20 m de espessura, e contendo 521.808 elementos formando um *mesh* estruturado. O *mesh* triangular foi refinado por todo o domínio e suavizado, resultando em uma alta qualidade para os elementos triangulares, com 0,3% de ângulos obtusos ($>120^\circ$) e 91,6% abaixo de 90° (Fig. 13C).

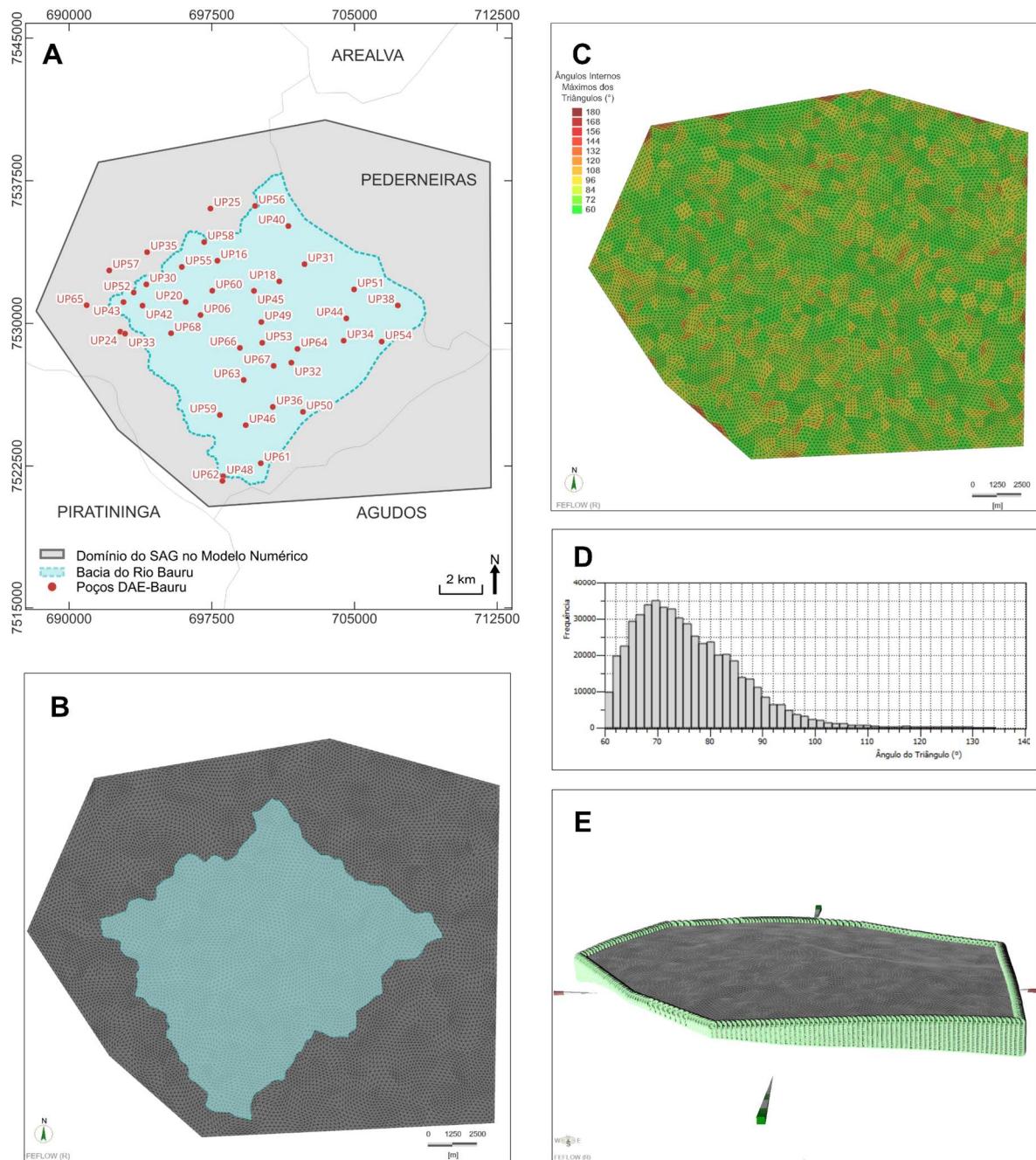


Figura 13. A) Extensão do domínio do modelo numérico em relação à Bacia do Rio Bauru, com os poços utilizados na modelagem geológica; B) Malha de elementos finitos vista em planta (*mesh*); C) Qualidade do *mesh* - distribuição espacial dos ângulos internos máximos dos triângulos do *mesh*; D) Histograma com a distribuição dos ângulos internos máximos dos triângulos do *mesh*; e E) Condições de contorno de fluxo dependente da carga (*general head boundary - GHB*).

Neste modelo, optou-se pela condição de contorno do tipo Cauchy (fluxo dependente da carga), denominado de *General Head Boundary (GHB)*. Este é utilizado para simular as condições de contorno em que a carga hidráulica em uma fronteira é influenciada por uma carga de referência situada fora do domínio modelado. Essa carga de referência é considerada fixa e representa o potencial hidráulico de uma área distante que exerce influência sobre o sistema, mas encontra-se posicionada a uma distância suficiente para

garantir que não haja interferência do bombeamento. As cargas de referência utilizadas foram baseadas no mapa potenciométrico de Silva (1983) para o Estado de São Paulo (Fig. 14).

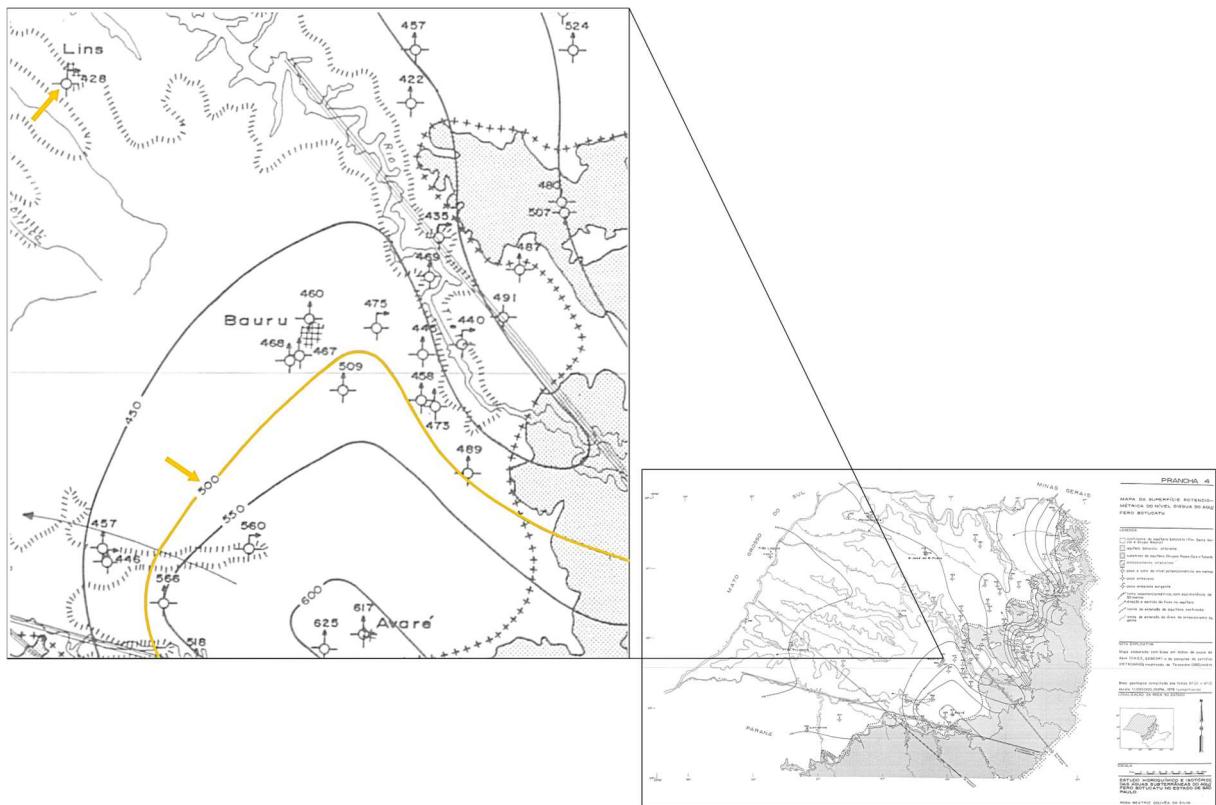


Figura 14. Mapa potenciométrico do SAG para o Estado de São Paulo com indicação (em amarelo) das cargas hidráulicas de referência utilizadas na modelagem numérica (Modificado de Silva, 1983).

A taxa de transferência, parâmetro adicional necessário na modelagem em FEFLOW, foi calculada com base na condutividade hidráulica horizontal média do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e na distância entre o ponto de referência arbitrário e o domínio do modelo.

As cargas hidráulicas foram configuradas para refletir a direção do fluxo estático do SAG na área de estudo, permitindo um fluxo lateral suficiente para suportar o bombeamento contínuo do histórico de poços da cidade de Bauru. Este procedimento é essencial para avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos a longo prazo. A configuração correta de cargas no GHB assegura que o modelo possa prever com precisão os impactos do bombeamento no sistema aquífero ao longo do tempo, incluindo rebaixamentos e alterações no fluxo lateral.

Durante o processo de calibração, as condutividades hidráulicas foram ajustadas (Tabela 2), de forma a serem coerentes com as características das formações predominantemente arenosas, variando principalmente entre 10^{-4} e 10^{-5} m/s.

Tabela 2. Parâmetros hidráulicos das unidades do SAG utilizados na modelagem numérica.

Parâmetros Hidráulicos			
Unidades Hidrolitológicas	Condutividade Horizontal [m/s]	Anisotropia Vertical	Armazenamento Específico [1/m]
<i>Formação Serra Geral (SG)</i>	1×10^{-8}	5	1×10^{-8}
<i>Formação Botucatu (BT)</i>	1×10^{-4}	5	1×10^{-6}
<i>Formação Guará (GR1)</i>	6×10^{-5}	5	1×10^{-6}
<i>Formação Guará (GR2)</i>	3×10^{-6}	5	1×10^{-6}
<i>Formação Guará (GR3)</i>	4×10^{-6}	5	1×10^{-6}
<i>Formação Guará (GR4)</i>	9×10^{-5}	5	1×10^{-6}
<i>Formação Piramboia (PB1)</i>	3×10^{-5}	5	1×10^{-6}
<i>Formação Piramboia (PB2)</i>	7×10^{-5}	5	1×10^{-6}

Uma exceção a essa tendência são as unidades GR2 e GR3, que correspondem às respostas dos materiais mais finos observados continuamente nos perfis interpretados. Essas unidades pertencem à Formação Guará e representam a interação entre ambientes fluvial e eólico, o que resulta em uma maior variação nas condutividades dentro desta formação. É importante enfatizar que a Formação Serra Geral, presente dentro do modelo, consiste em pequenos corpos de diabásio (até 20 m) no meio das unidades arenosas que compõem o SAG.

A potociometria estática modelada (Fig. 15) reflete uma condição inicial que não é mais possível observar em Bauru devido às interferências entre poços de bombeamento e à nova condição dinâmica estabelecida por ininterruptas extrações de um aquífero fóssil ao longo de décadas. Por essa razão, apenas as primeiras medições de nível estático até os anos 2000 foram consideradas. Ainda assim, buscou-se realizar uma modelagem em estado estacionário sem bombeamento que refletisse o fluxo regional do SAG através das condições de contorno pré-definidas. Não há necessidade de calibração pontual desta condição pois ela foi mapeada com base no modelo conceitual da potociometria inicial. Desta forma, a potociometria estática apresentou uma direção de fluxo predominante SE-NW e um gradiente hidráulico variando de 0,001 a 0,003 (ou 1 a 3 m/km), condizentes com demais estudos regionais do SAG (Silva, 1983; Foster et al., 2009).

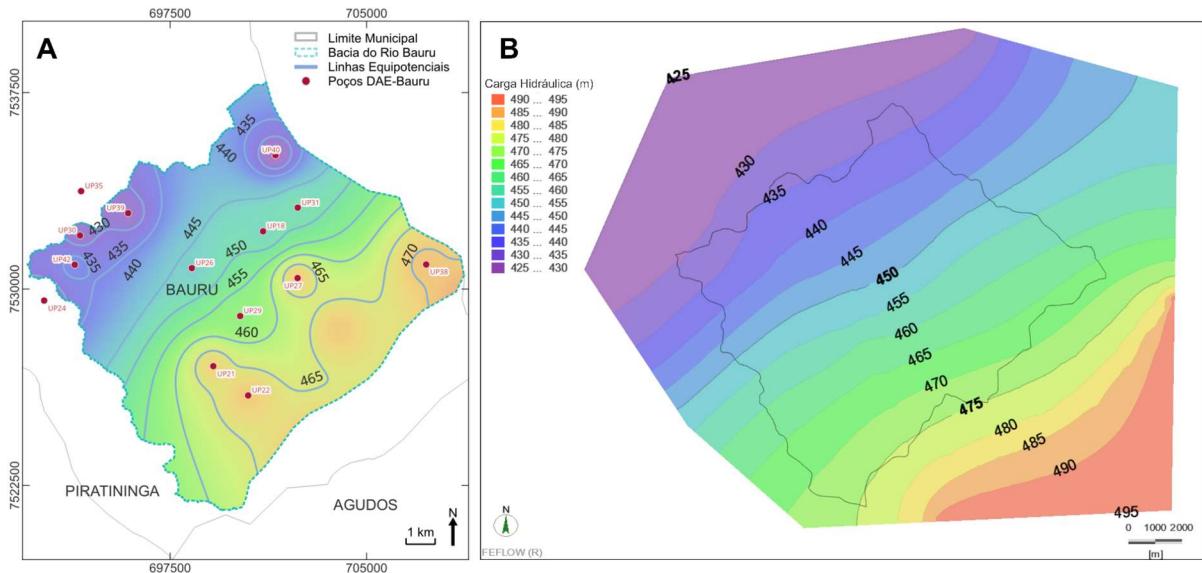


Figura 15. Condições estacionárias iniciais do SAG: A) Potociometria estática do SAG a partir dos dados mais antigos da região, mas ainda refletindo algum nível de interferência (nível estático de poços existentes entre 1970 e 2000); B) Condição estacionária inicial do SAG resultante da modelagem numérica, considerando-se apenas os dados do fluxo regional.

A Figura 16 apresenta os resultados da calibração em estado transitório, na qual foram considerados valores de carga hidráulica de uma série histórica entre 2005 e 2022, como descrito no item 4.3. Obteve-se um valor para REMQ equivalente a 8 m, REMQN de 10% e um valor de R^2 igual a 0,80 para o conjunto de dados.

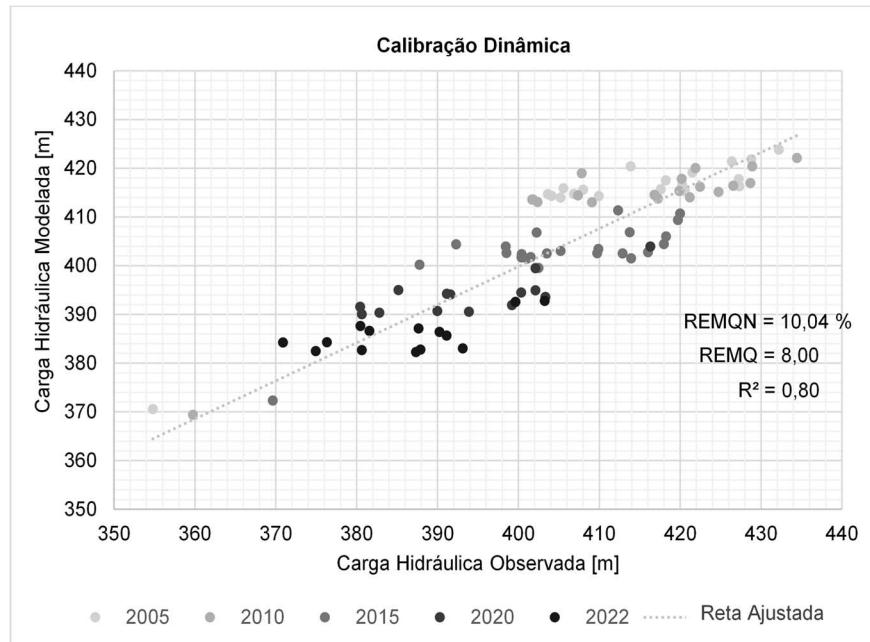


Figura 16. Scatter plot mostrando valores de carga hidráulica observados e modelados.

As potociometrias apresentadas na Figura 17 são resultado de 22 anos de bombeamento, considerando os volumes reais explotados pelos poços entre os anos 2000 e

2022. Devido ao refinamento do *mesh*, é possível observar alguns cones individuais, assim como pequenas inflexões das equipotenciais resultante do bombeamento individual de alguns poços.

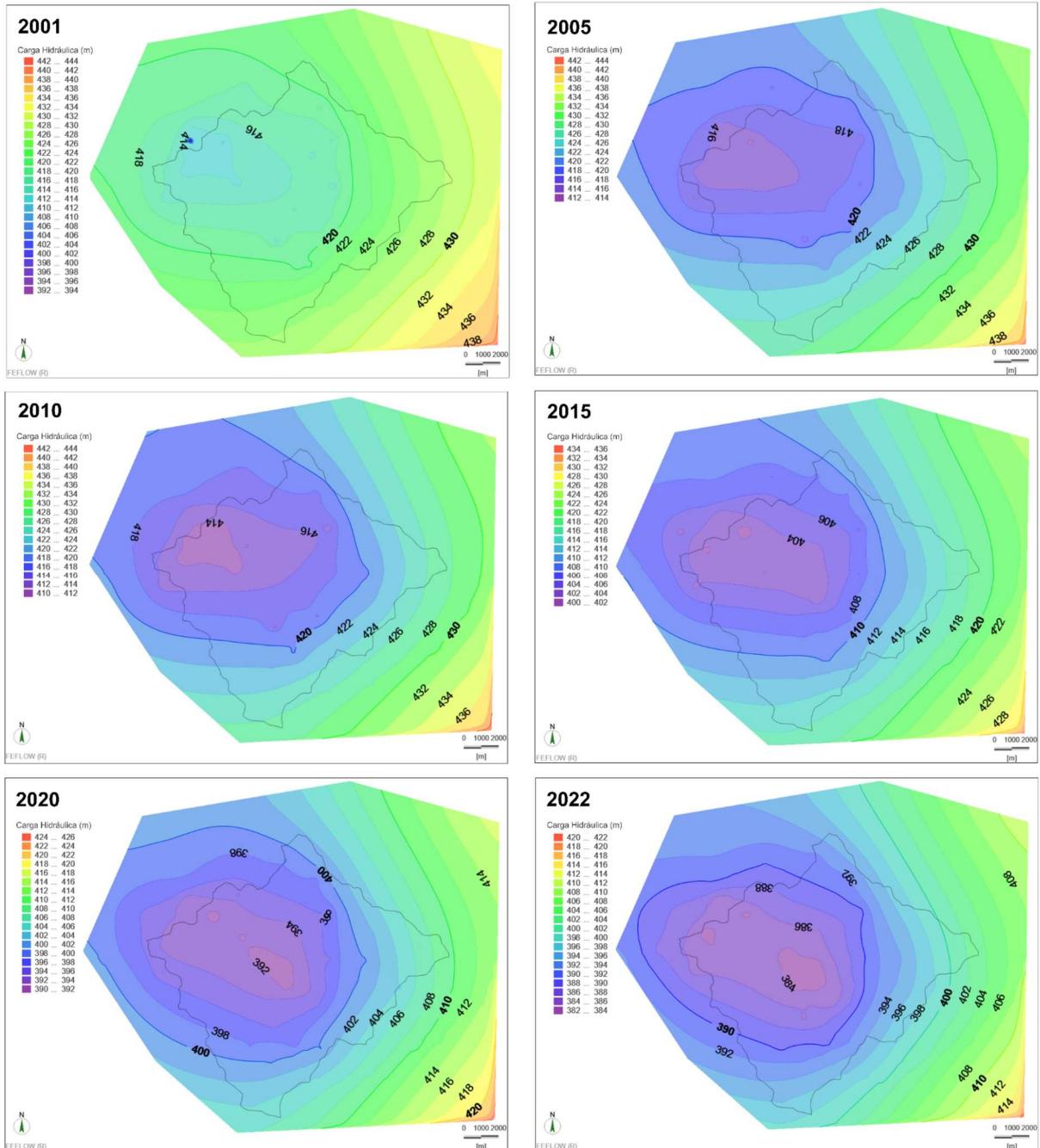


Figura 17. Condições dinâmicas do SAG ao longo de 22 anos de bombeamento.

Observa-se um grande cone de rebaixamento migrando da região NW para a região central da Bacia do Rio Bauru ao longo do tempo, onde se concentram a maior quantidade de poços, e uma tendência de redução das cargas hidráulicas no aquífero. As cargas dinâmicas variaram entre 384 e 420 m nessa região, muito próximas dos valores monitorados por poços

de abastecimento do DAE ao longo das últimas duas décadas e as potenciometrias apresentadas na Figura 8.

A análise do mapa de rebaixamentos (Fig. 18) revela cones de depressão que se concentram na região central da cidade, onde a densidade de poços é maior, com uma área crítica onde se encontram os poços UP66 (Praça Portugal), UP49 (Cardia) e UP53 (Nações Unidas II). Nessa área, o rebaixamento é de 14 m em 2015, 24 m em 2020 e 32 m em 2022. Isto representa, para a região central, um rebaixamento de 0,9 m/ano até 2015, 1,2 m/ano em 2020 e 1,5 m/ano em 2022.

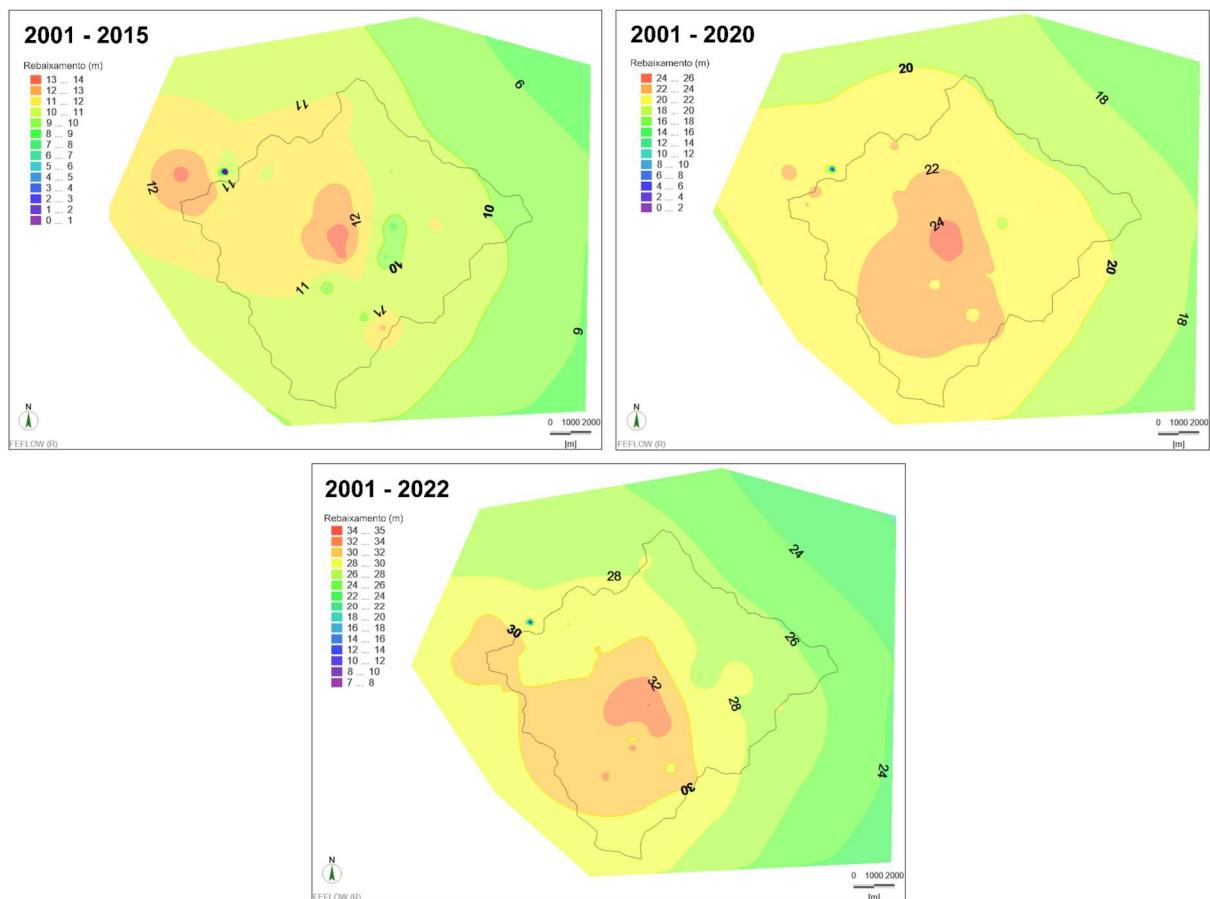


Figura 18. Distribuição dos resíduos considerando a potenciometria dinâmica do SAG após 15, 20 e 22 anos de bombeamento em relação à condição estática inicial, resultantes da modelagem numérica.

No modelo hidrogeológico conceitual, os rebaixamentos encontrados foram, em média, em torno de 2 m/ano para esta mesma região, considerando resíduos estáticos entre 2022 e a potenciometria até os anos 2000 (Fig. 9), condizente com os resultados do modelo numérico.

Em toda a Bacia do Rio Bauru, considerando o resultado de 2022, o rebaixamento anual foi de 1,2 a 1,5 m/ano. Além disso, o rebaixamento decresce para a região nordeste, devido ao aumento da transmissividade (juntamente com a própria espessura saturada), e se

expande para sudoeste, onde o SAG possui uma menor transmissividade (assim como espessura saturada reduzida).

Após as simulações em estado transiente, foi feita uma análise da influência do parâmetro de armazenamento (S) no balanço de água do modelo. Com este propósito, variou-se o valor em uma ordem de grandeza superior e inferior ao valor da calibração, compondo toda a faixa típica de aquíferos confinados (Woessner e Poeter, 2020).

Tabela 3. Contribuição da entrada de água por fluxo lateral e liberação de água do armazenamento ao longo do tempo, considerando um armazenamento na ordem de 10^{-3} , 10^{-4} e 10^{-5} .

Tempo de Bombreamento [dias]	$\text{Armazenamento } 1 \times 10^{-3}$		$\text{Armazenamento } 1 \times 10^{-4}$		$\text{Armazenamento } 1 \times 10^{-5}$	
	Fluxo Lateral	Liberação do Armazenamento	Fluxo Lateral	Liberação do Armazenamento	Fluxo Lateral	Liberação do Armazenamento
30	26.49%	73.51%	57.56%	42.44%	97.81%	2.19%
60	32.50%	67.50%	70.50%	29.50%	99.68%	0.32%
90	38.26%	61.74%	79.67%	20.33%	99.99%	0.01%
120	43.34%	56.66%	85.96%	14.04%	99.96%	0.04%
150	47.41%	52.59%	90.18%	9.82%	99.99%	0.01%
180	50.42%	49.58%	93.03%	6.97%	99.99%	0.01%
365	60.40%	39.60%	98.84%	1.16%	99.98%	0.02%
730	74.73%	25.27%	99.95%	0.05%	100.00%	0.00%
1095	97.82%	2.18%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%
1460	88.15%	11.85%	97.46%	2.54%	99.70%	0.30%
1825	89.64%	10.36%	99.02%	0.98%	99.92%	0.08%
3650	98.40%	1.60%	99.90%	0.10%	99.99%	0.01%
5475	95.31%	4.69%	99.97%	0.03%	100.00%	0.00%
7300	87.97%	12.03%	97.96%	2.04%	99.80%	0.20%
8030	90.56%	9.44%	99.26%	0.74%	99.93%	0.07%

O balanço de água (Tabela 3) destaca a importância do parâmetro de armazenamento específico (parâmetro de entrada para o modelo calcular o armazenamento) no

desenvolvimento dos cones de rebaixamento, resultado de simulações em estado transiente para 10^{-5} , 10^{-6} e $10^{-7}/m$ (que multiplicadas pela espessura saturada, resultarão nos valores entre 10^{-3} e 10^{-5}) nas mesmas condições de bombeamento. Inicialmente, os poços extraem água majoritariamente do armazenamento. À medida que os cones de rebaixamento se expandem, a influência do fluxo lateral se intensifica até compensar completamente essas perdas. Um armazenamento maior no aquífero prolonga o tempo necessário para que o rebaixamento se estabilize na bacia e o fluxo lateral passe a ser dominante, pois o aquífero, dentro de seus domínios, tem mais capacidade para liberar água e reduzir a extensão e rebaixamentos dos cones em um primeiro momento, reduzindo também as interferências.

Em resumo, maiores armazenamentos farão com que os cones de depressão dos poços se tornem menores, sendo necessário mais tempo para que eles se expandam e, com mais água disponível, a compensação pelo fluxo lateral será prorrogada ou diminuída.

Para condições de armazenamento específico de 10^{-6} e 10^{-5} , a contribuição do fluxo lateral é progressivamente maior até 2003 ($t = 1095$ dias), com o cone de rebaixamento tendendo à estabilização. Devido à redução nas extrações neste ano, houve a recuperação das cargas do aquífero, tornando a contribuição do armazenamento maior em 2004 ($t = 1460$ dias). Como os volumes totais extraídos pelos poços entre 2005 e 2010 são muito similares, o cone de rebaixamento estabiliza. O aumento súbito e progressivo dos volumes extraídos a partir de 2015 tem como consequência uma maior contribuição do armazenamento a partir deste ano e um cone que ainda não se encontra estabilizado mesmo ao final da simulação.

Em contraste, no cenário com armazenamento de 10^{-7} , o fluxo lateral compensa a extração e a contribuição do armazenamento é praticamente nula já em 90 dias de simulação.

5.5. Simulação de cenários futuros

5.5.1. Cenário 1: Desligamento imediato dos poços

Neste cenário, como detalhado no item 4.4., todos os poços de bombeamento foram desligados simultaneamente, interrompendo completamente o bombeamento na área de estudo. Desta forma, foi possível analisar a capacidade da transmissividade e do fluxo lateral do SAG em compensar o rebaixamento e restabelecer os níveis dinâmicos estabilizados no modelo.

A sequência de superfícies potenciométricas apresentadas na Figura 19 indicam que, ao cessar o bombeamento a partir das condições de 2022, o SAG recupera-se rapidamente, sendo capaz de retornar a níveis próximos às condições regionais em apenas dois anos ($t = 730$ dias).

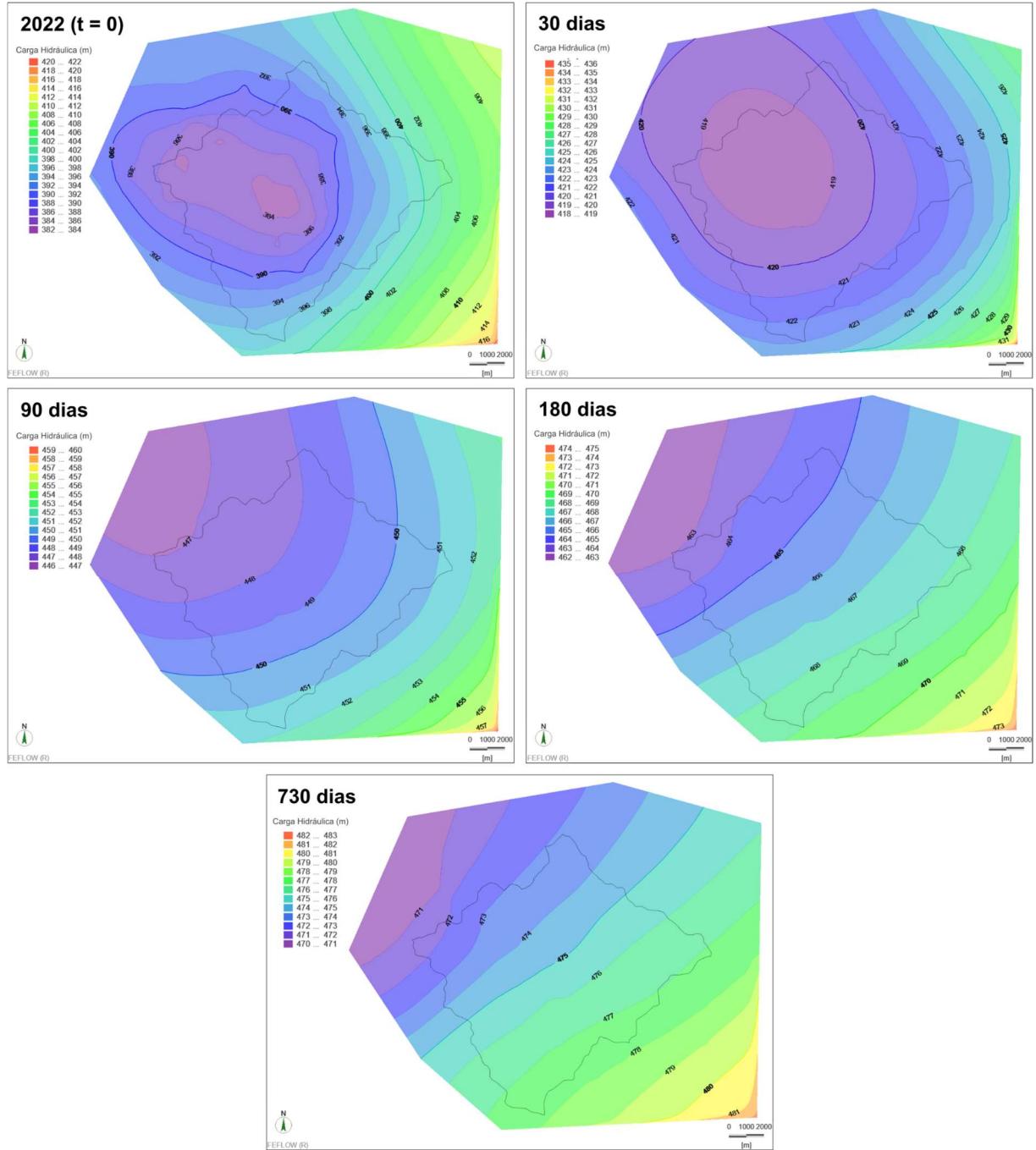


Figura 19. Condições dinâmicas do SAG após desligamento dos poços.

5.5.2. Cenário 2: Bombeamento contínuo com as vazões atuais

Neste cenário, mantém-se o volume total extraído em 2022, equivalente a 35 Mm³/ano, permitindo observar a evolução do cone de rebaixamento sob uma taxa de exploração constante e verificar o tempo decorrido para que os níveis de carga hidráulica sejam estabilizados em uma condição de equilíbrio dinâmico.

A sequência de superfícies potenciométricas mostrada na Figura 20 destaca que em apenas um ano as extrações serão completamente compensadas pelo fluxo lateral, estabilizando a potenciometria dinâmica. No entanto, essa estabilização ocorre em uma

condição limitada, na qual o domínio da modelagem cobre apenas uma fração da extensão total do SAG. Essa restrição impede que o modelo considere a possibilidade de aporte de água do armazenamento de áreas externas ao domínio, o que simplifica a dinâmica real de um aquífero confinado e limita a simulação das interações regionais que poderiam influenciar o comportamento do SAG.

Este modelo representa uma primeira abordagem e os resultados iniciais de uma simulação numérica em desenvolvimento, sujeita a ajustes contínuos para refletir com maior precisão as condições observadas em Bauru. O fluxo lateral, conforme apresentado no modelo com estabilização em apenas um ano, poderia ser reduzido para aumentar o tempo necessário para a estabilização dos cones de rebaixamento.

Alternativamente, a expansão da área do modelo poderia ser considerada para afastar os rebaixamentos dos contornos, com o objetivo de representar de forma mais adequada o contínuo decréscimo dos níveis dinâmicos reportados pelo DAE-Bauru.

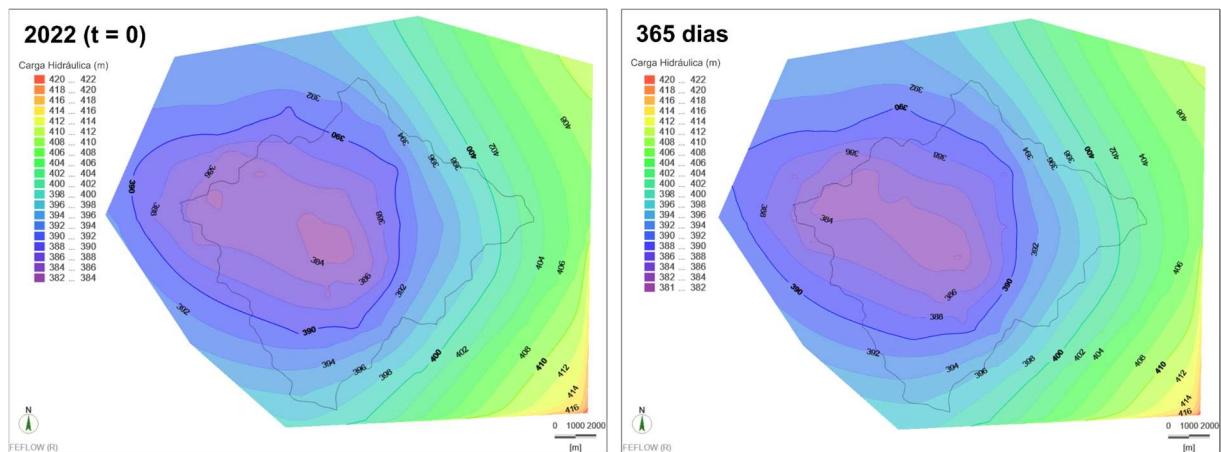


Figura 20. Condições dinâmicas do SAG com uma extração constante de 35 Mm³/ano, correspondente ao volume explorado em 2022.

5.5.3. Cenário 3: Alocação de novos poços e aumento das extrações

Neste cenário, foi feita uma projeção para 2032, considerando um aumento no volume anual de extração, de acordo com a tendência observada entre 2010 e 2022.

Tabela 4. Percentuais dos volumes explotados no SAG

Ano	Volume Explorado [Mm ³]	Crescimento (% em relação a 2010)	Variação Anual (Seqüencial)
2010	23,3	100,00%	0,00%
	24,7	106,18%	6,18%
	25,1	107,98%	1,81%
	26,2	112,60%	4,62%
	27,9	119,91%	7,30%
	27,6	118,71%	-1,20%
	28,6	123,17%	4,46%
	26,9	115,73%	-7,44%
	26,2	112,56%	-3,18%
	29,7	127,82%	15,26%
	32,6	140,18%	12,36%
	34,2	147,27%	7,09%
2022	35,3	152,00%	4,72%
Média			4%

Considerando um aumento percentual anual médio de 4% no volume total das extrações, um aumento percentual de 40% foi considerado para o período de 10 anos decorrido entre 2022 e 2032, resultando em uma extração total de 49,5 Mm³. Para alcançar este volume de exploração a partir da condição dinâmica de 2022 (Fig. 17), foram alocados oito novos poços totalmente penetrantes distribuídos em regiões previamente identificadas no modelo conceitual como zonas com parâmetros hidráulicos ideais (Fig. 10), com valores de transmissividade mais elevados e maior espessura saturada, correspondendo à porção nordeste e leste da Bacia do Rio Bauru.

Foram escolhidos cinco poços na região do SAG confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral (P1 a P5) e três poços não confinados (P6 a P8). A vazão dos primeiros poços foi estimada através de uma média entre os poços do DAE-Bauru já existentes na porção confinada, resultando em uma vazão de 230 m³/h. Isso foi feito para os poços distribuídos na porção não confinada, obtendo uma vazão de 132 m³/h.

Este cenário (Fig. 21) demonstrou que mesmo alocando poços nas regiões mais produtivas do SAG e nos limites da Bacia do Rio Bauru, onde o cone de rebaixamento é menos influente, o bombeamento destes poços gera uma expansão do cone de rebaixamento

para a região leste. Isto reforça que os rebaixamentos observados na área urbana de Bauru não estão condicionados apenas por fatores hidráulicos, sendo a interferência entre poços muito importante para as quedas de nível devido à sobreposição desses cones.

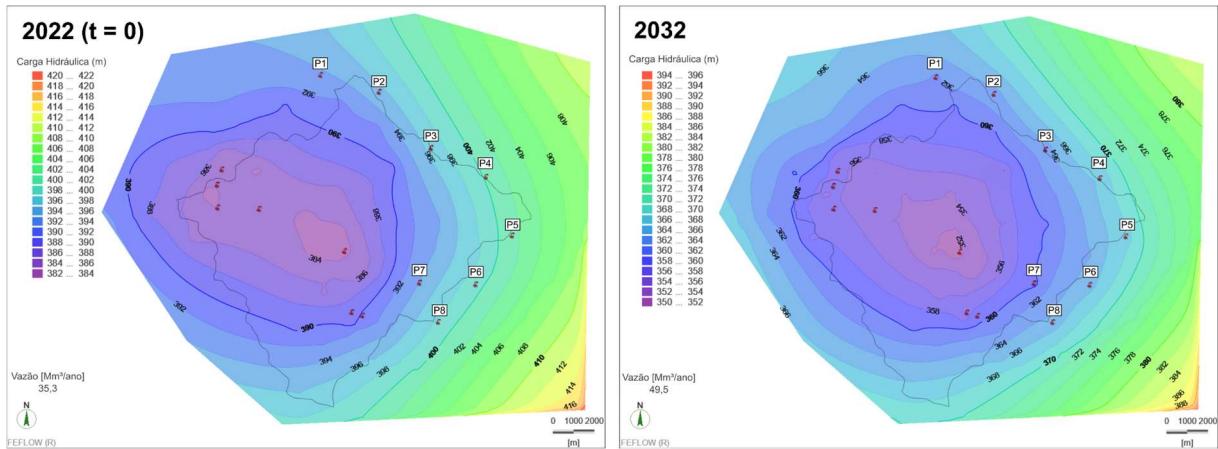


Figura 21. Condições dinâmicas do SAG com uma extração constante de 49,5 Mm³/ano, correspondente ao volume explotado previsto para 2032.

5.6. Estimativa dos raios de interferência

A análise dos raios de interferência entre poços na cidade de Bauru, realizada com base na sua posição em diferentes unidades hidrogeológicas do SAG, revela importantes aspectos sobre a dinâmica de rebaixamento na região. Os resultados da Figura 22 mostram que as zonas de interferência dos poços são bastante amplas, mesmo com os rebaixamentos locais decrescendo com a distância em relação ao poço.

Este comportamento sugere que, na Bacia do Rio Bauru, há uma clara sobreposição dos cones de rebaixamento, sendo o motivo pelo qual poços muito afastados da zona crítica continuam contribuindo para o rebaixamento total, assim como visto na simulação do Cenário 3 (Fig. 21).

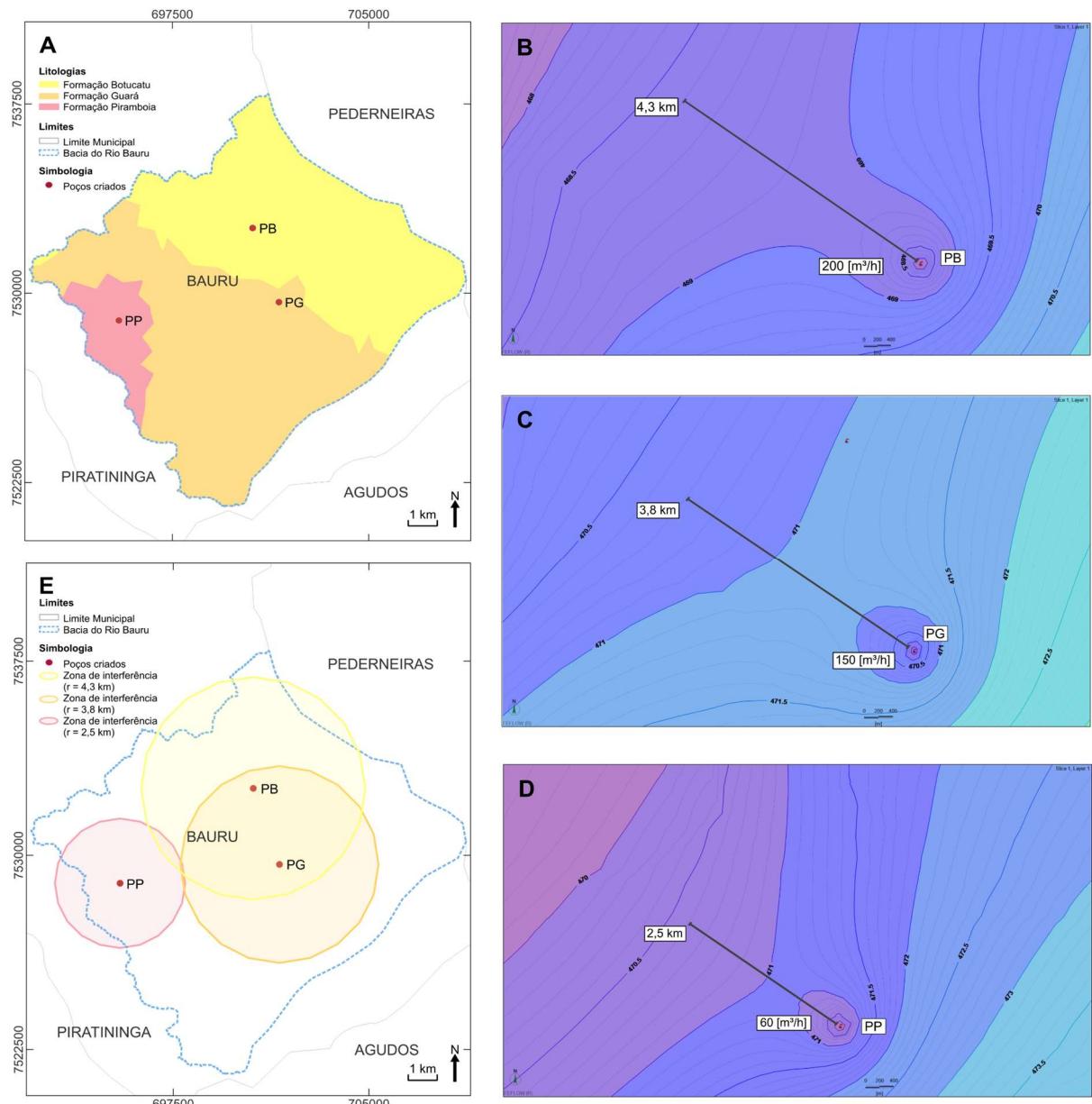


Figura 22. Raio de interferência inferido dos poços, de acordo com as unidades hidrogeológicas do SAG: A) Geologia de subsuperfície, mostrando a distribuição espacial das Formações Botucatu, Guará e Piramboia na Bacia do Rio Bauru, oriundas do modelo geológico, e a escolha das posições dos poços PB, PG e PP; B) Raio de interferência inferido dos poços na Formação Botucatu; C) Raio de interferência dos poços na Formação Guará, onde se encontra a janela de basalto; D) Raio de interferência inferido dos poços na Formação Piramboia, onde o SAG tem sua menor espessura saturada; E) Zonas de interferência dos poços PB, PG e PP.

Para os poços na Formação Botucatu (PB), onde o SAG encontra-se confinado pela Formação Serra Geral, o raio de interferência inferido é de 4,3 km, considerando uma vazão de 200 m³/h. Para os poços na janela de basalto, na Formação Guará, o raio de interferência encontrado é de 3,8 km para uma vazão de 150 m³/h. Por fim, o raio de interferência de poços onde o SAG é menos espesso, na Formação Piramboia, é de 2,5 km, partindo-se de uma vazão de 60 m³/h.

O motivo pelo qual estas zonas de interferência são tão expressivas pode ser atribuído às altas vazões operacionais dos poços e as transmissividades elevadas observadas no SAG, o que expande consideravelmente a área de influência de cada cone de rebaixamento, no entanto essas quedas são mais expressivas na região do bombeamento e decaem significativamente com a distância, evidenciado pela baixa curvatura das linhas equipotenciais ao afastar-se das imediações do poço.

6. CONCLUSÕES

Na área urbana de Bauru, o Sistema Aquífero Guarani (SAG) é constituído pelas seguintes unidades lito-hidroestratigráficas, do topo para a base: Formação Botucatu, Guará e Piramboia. A partir da modelagem geológica e hidrogeológica constatou-se que a produção de poços na cidade de Bauru varia e está condicionada à espessura saturada - variável de 63 a 369 m. A espessura saturada é considerada o principal controlador da hidráulica no SAG, uma vez que a variação da condutividade hidráulica (K) ao longo do sistema é significativamente menor que a variação da espessura (b). A condutividade hidráulica no SAG, como conjunto, é resultado da combinação dos diferentes pacotes identificados nas perfilagens e, como sistema, comporta-se de maneira muito mais homogênea ao longo da área de estudo, frente a significante variação da espessura saturada por conta do controle estrutural na região. Desta forma, áreas com espessuras saturadas similares tendem a apresentar produtividades (Q), e comportamentos hidráulicos (T e Q/s) comparáveis.

O modelo hidrogeológico conceitual demonstrou que o SAG possui uma direção preferencial de fluxo de SSE para NNW. Os rebaixamentos são crescentes e contínuos ao longo do tempo, apresentando rebaixamentos de até 80 m em relação à carga estática inicial e uma taxa média de 2 m/ano, principalmente no centro da área urbana, onde está a maior concentração de poços.

O estudo permitiu avaliar o grau de conectividade hidráulica entre o Sistema Aquífero Bauru (SAB) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG), levando-se em conta o gradiente hidráulico atual, até então inédito para a área. Observou-se um fluxo vertical descendente do SAB para o SAG em toda porção não confinada pelos basaltos. Esse fluxo descendente é atribuído à redução da carga hidráulica no SAG, decorrente do aumento das explorações ao longo dos últimos anos - um crescimento de 52% em 2022 em comparação com 2010. Apesar do fluxo vertical ainda ser recente para gerar misturas significativas no SAG, o que permite considerá-lo como um sistema ainda isolado, essa tendência de aumento do gradiente hidráulico poderia tornar a recarga mais substancial, alterando a dinâmica entre os dois sistemas.

O modelo numérico de fluxo de água subterrânea do SAG expõe o avanço do rebaixamento em direção ao centro da cidade e intensifica sua interferência em direção a noroeste, onde os gradientes regionais do SAG são menores e o aquífero encontra-se em

porções mais confinadas. De acordo com o modelo, o SAG é capaz de suportar as extrações atuais e futuras, como visto no cenário previsto de aumento da demanda para 2034, devido à importante contribuição do fluxo lateral, o qual compensa rapidamente as perdas iniciais do armazenamento e equilibra o volume extraído dos poços no SAG.

Os raios de interferência estimados para as três regiões hidráulicamente distintas no SAG indicam que, devido à alta transmissividade característica do SAG e às elevadas vazões dos poços - operando em sua maioria 24 horas por dia - os poços em Bauru inevitavelmente interferem entre si, mesmo quando inseridos novos poços distantes da zona crítica do rebaixamento. No entanto, o grau dessa interferência pode ser mais bem compreendido, considerando que os rebaixamentos tendem a reduzir significativamente com a distância, resultando em cones largos, mas pouco profundos, o que resulta em zonas de interferências extensas. Essas simulações iniciais do modelo podem fornecer subsídios para estudos futuros de alocação de poços no SAG, contribuindo para uma maior eficiência da produtividade do SAG em Bauru no futuro.

Importante destacar que este modelo constitui uma abordagem inicial com resultados preliminares de uma simulação numérica ainda em desenvolvimento, que passará por ajustes contínuos para representar com maior precisão as condições observadas em Bauru.

Em trabalhos futuros, recomenda-se a redução do fluxo lateral, que no modelo estabiliza as extrações, prolongando o tempo necessário para a estabilização dos cones de rebaixamento. Alternativamente, uma expansão da área modelada ajudaria a distanciar os rebaixamentos dos contornos e a representar de modo mais fiel o declínio gradual dos níveis dinâmicos registrados pelo DAE-Bauru.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aggarwal, P.K., et al., 2015, Continental degassing of 4He by surficial discharge of deep groundwater: *Nature Geoscience*, v. 8, n.º 1, p. 35–39, doi: 10.1038/ngeo2302.
- Aldous, D.J., 1999, Deterministic and stochastic models for coalescence (aggregation and coagulation): A review of the mean-field theory for probabilists: *Bernoulli*, v. 5, n.º 1, p. 3-48, doi: 10.2307/3318611.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., Hunt, R. J., 2015, Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport: Academic press, 630p., doi: 10.1016/C2009-0-21563-7.
- Boico, V.F., Wendland, E., Batista, J.A. do N., 2018, Assessment of the potentiometric drawdown in the Guarani Aquifer System in Bauru/SP by a model of analytical elements: *RBRH*, v. 23, doi: 10.1590/2318-0331.0318170121.
- Caumon, G., Gray, G., Antoine, C., & Titeux, M.O., 2012, Three-Dimensional Implicit Stratigraphic Model Building From Remote Sensing Data on Tetrahedral Meshes: Theory

- and Application to a Regional Model of La Popa Basin, NE Mexico: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 51, n.º 3, p. 1613–1621, doi: 10.1109/tgrs.2012.2207727.
- Cowan, E.J., et al., 2003, Practical implicit geological modelling, *in* Fifth International Mining Geology Conference Proceedings, IMM Publication Series No 8/2003, p. 89-99.
- DAEE— Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2015, Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP: São Paulo: DAEE/C3 Consultoria, (Relatório Técnico Final).
- D’Affonseca, F.M., Finkel, M., Cirpka, O.A., 2020, Combining implicit geological modeling, field surveys, and hydrogeological modeling to describe groundwater flow in a karst aquifer: *Hydrogeology Journal*, v. 28, no. 8, p. 2779-2802.
- Diersch, H.J.G., 2014, FEFLOW: Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 996p, doi: 10.1007/978-3-642-38739-5.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1998, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd Edition: New York, John Wiley & Sons Inc., 506 p.
- Fernandes, L.A., Coimbra, A.M., 1996, A Bacia Bauru (Cretáceo superior, Brasil): Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 68, n. 2, p. 195-205.
- Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology, 4th Edition: Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 598 p.
- Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G. and Garduño, H. 2009. The Guarani Aquifer Initiative – towards realistic groundwater management in a transboundary context. Sustainable Groundwater Management: Lessons from Practice: The World Bank Global Water Partnership Program, Case Profile Collection n.º 9, <https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/GWMATE%20case%20profile%20-%20Guarani.pdf> (acessado Abril 2024).
- Freitas, L.A., Varnier, C., Marques, C.G., Barreto, F.S., Pinhatti, A., Bertolo, R., Hirata, R., 2024, Litoestratigrafia da área urbana de Bauru (SP): Congresso da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, Brasil, Anais, 2024.
- Gesicki, A.L.D., 2007, Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no Estado de São Paulo [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, doi: 10.11606/T.44.2007.tde-18122007-115436.
- Giannini, P.C.F., Sawakuchi, A.D.O., Fernandes, L.A., Donatti, L.M., 2004, Paleoeventos e paleocorrentes subaquosas do sistema deposicional Pirambóia nos estados de São Paulo e Paraná, Bacia do Paraná: Estudo baseado em análise estatística de dados

- azimutais: Revista Brasileira de Geociências, v. 34, n.º 2, p. 282–292, doi: 10.25249/0375-7536.2004342282292.
- Gonçalves, R.D., Teramoto, E.H., y Chang, H.K., 2020, Regional Groundwater Modeling of the Guarani Aquifer System: Water, v. 12, n.º 9, p. 2323, <https://doi.org/10.3390/w12092323>.
- Gou, J., Zhou, W., Wu, L., 2016, Implicit three-dimensional geo-modelling based on HRBF surface: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 42, p. 63–66, doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w2-63-2016.
- Hassen, I., Gibson, H., Hamzaoui-Azaza, F., Negro, F., Rachid, K., Bouhlila, R., 2016, 3D geological modeling of the Kasserine Aquifer System, Central Tunisia: New insights into aquifer-geometry and interconnections for a better assessment of groundwater resources: Journal of Hydrology, v. 539, p. 223–236, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.034.
- Hirata, R., Barbat, D., Marques, C.G., 2022, Quantas águas existem na cidade de Bauru (SP)?: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 22º, ABAS, São Paulo, p. 04.
- Hirata, R., Gesicki, A., Sracek, O., Bertolo, R., Giannini, P.C., Aravena, R., 2011, Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani Aquifer System in São Paulo state, Brazil: Journal of South American Earth Sciences, v. 31, n.º 4, p. 444–456, doi: 10.1016/j.jsames.2011.03.006.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022, Cidades: São Paulo: Bauru, <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/bauru/panorama> (acessado Abril 2024).
- Marques, C.H.G., Freitas, L.A., Rusig, J.B., Barreto, F.S., Suhogusoff, A., Varnier, C., Bertolo, R., Hirata, R., 2024, O intenso bombeamento de poços privados e o risco à segurança hídrica de Bauru (SP): Congresso da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, Brasil, Anais, 2024.
- Paula e Silva, F., Cavaguti, N., 1994, Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na Cidade de Bauru, SP, In: SIMPÓSIO SOBRE BACIAS RETÁCEAS BRASILEIRAS, 2: Boletim de resumos, p. 141-144.
- Paula e Silva, F., Caetano-Chang, M.R., Chang, H.K., 2023, Stratigraphy of the middle Triassic-lower Cretaceous succession in the Paraná and Uruguayan Chaco-Paraná Basins – An overview based on subsurface data: Journal of South American Earth Sciences, p. 104567, doi: 10.1016/j.jsames.2023.104567.
- Pereira, P.E.C., Rabelo, M.N., Ribeiro, C.C., Diniz-Pinto, H.S., 2017, Geological modeling by an indicator kriging approach applied to a limestone deposit in Indiara city-Goiás: REM-International Engineering Journal, v. 70, p. 331-337.
- Rörig, F.S., Hirata, R., Barbat, D.O., 2024, From global to local scale: How international experiences contribute to the fossil water management of the Guarani Aquifer System:

Environmental Science & Policy, v. 157, p. 103777,
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103777>.

- Silva, R. 1983. Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo. [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, doi: 10.11606/T.44.1983.tde-28082015-135247.
- Silva, S.R. da., Chang, H.K., 2010, Hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Bauru e Guarani na Região Metropolitana de Bauru (SP): Águas Subterrâneas, v. 24, n.º 1, doi: 10.14295/ras.v24i1.19648.
- Simonato, M.D., Campos, J.E., Freitas Leitão, A.C., Brandão, D., Paula e Silva, F., de Paula, V.F., 2016, Há conexão hidráulica entre os sistemas Aquíferos Guarani e Bauru na “janela” de basalto, em Bauru- SP?: Águas Subterrâneas, <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28706>.
- SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2022, Painel de Regionalização dos Serviços de Saneamento Básico no Brasil: São Paulo: Bauru. <http://appsnis.mdr.gov.br/regionalizacao/web/mapa/index?id=24> (acessado Abril 2024).
- Vollgger, S.A., Cruden, A.R., Ailleres, L., y Cowan, E.J., 2015, Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia: Ore Geology Reviews, v. 69, p. 268–284, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.020>.
- Wilde, B.J., Deutsch, C.V., 2012, Kriging and simulation in presence of stationary domains: developments in boundary modeling: Springer Dordrecht Geostatistics Oslo 2012, p. 289-300.
- Woessner, W.W., Poeter, E.P., 2020, Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Ground The Groundwater Project, 205 p., <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-2-0> (acessado Novembro 2024).
- Yang, F.R., Lee, C.H., Kung, W.J., Yeh, H.F., 2009, The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of “Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project” in Taiwan: Engineering Geology, v. 103, n.º 1-2, p. 39–58, doi: 10.1016/j.enggeo.2008.07.012.