

Artigos

Modelagem Numérica do Sistema Aquífero Içá-Solimões para Fins de Disponibilidade e Demanda Hídrica da Província Petrolífera de Urucu, Amazonas, Brasil

Numerical Modeling of the Içá-Solimões Aquifer System for Purposes of Water Availability and Demand of the Province Urucu Petroleum, Amazonas, Brazil

Paulo Galvão¹; José Geilson Alves Demétrio²; Eliene Lopes de Souza³; Marcus Martins Baessa⁴

¹ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG

² Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE.

³ Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA.

⁴ Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), Rio de Janeiro, RJ

✉ hidropaulo@gmail.com; jose.demetrio@ufpe.br; eliene@ufpa.br; marcus.baessa@petrobras.com.br

Palavras-chave:

Água subterrânea;
Sistema Aquífero Içá-Solimões;
Sustentabilidade;
Modelagem numérica;
Região Amazônica.

Keywords

Groundwater;
Içá-Solimões Aquifer System;
Sustainability;
Numerical Modeling;
Amazon Region.

Revisão por pares.
Recebido em: 05/03/2023.
Aprovado em: 17/04/2023.

Resumo

As águas subterrâneas desempenham um papel essencial no ciclo hidrológico da região amazônica, constituindo uma reserva significativa de água de alta qualidade, utilizável para diversos fins. No entanto, dados hidrogeológicos na região são ainda escassos, com estudos concentrados particularmente em centros mais urbanizados. Na Província Petrolífera de Urucu, município de Coari/AM, onde está instalada a Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), da Petrobras, estudos realizados na área já caracterizaram hidrogeologicamente os aquíferos locais revelando um cenário hidrogeológico complexo, devido ao Sistema Aquífero Içá-Solimões (SAIS). Apesar dessas informações, são necessários estudos mais aprofundados para entender como a água subterrânea pode ser usada de forma sustentável para atender as demandas futuras da BOGPM, garantindo a sustentabilidade hídrica. O objetivo da pesquisa é avaliar o impacto da exploração de água subterrânea para abastecimento das unidades na área na BOGPM, por meio da primeira modelagem numérica em diferenças finitas (MODFLOW) do SAIS, a fim de realizar um balanço entre disponibilidade e demanda hídrica, considerando os usos atuais e futuros. Dois cenários foram simulados: 1) impacto do bombeamento dos poços atuais pelos próximos vinte anos; e 2) dobrando a vazão adotada no cenário anterior. Os resultados indicam que o SAIS ainda está no início de sua exploração, pois as descargas, mesmo em cenários mais severos, representam menos de 1% da infiltração simulada, indicando que o bombeamento está sendo realizado dentro das condições de sustentabilidade.

Abstract

Groundwater plays a crucial role in the hydrological cycle in the Amazon region, constituting a significant reserve of high-quality water that can be used for various purposes. However, hydrogeological data on the region are still scarce, with studies mainly available for urban centers. In the Petroliferous Province of Urucu, municipality of Coari/AM, where the Petrobras Geologist Pedro de Moura Operational Base (PGPMO) is located, studies have characterized the local aquifers hydrogeologically, revealing a complex hydrogeological scenario due to the Içá-Solimões Aquifer System (ISAS). Despite this information, more in-depth studies are needed to understand how groundwater can be sustainably used to meet the future demands of the PGPMO, ensuring water sustainability. The research aims to evaluate groundwater exploitation's impact on the supply of units in the PGPMO area through the first finite difference numerical modeling (MODFLOW) of the ISAS to achieve a balance between water availability and demand, considering current and future uses. Two scenarios were simulated: 1) impact assessment of pumping in currently active wells within the next twenty years; and 2) doubling the flow rate adopted in the previous scenario. The results indicate that the ISAS is still in the early stages of exploitation, in which even in more severe scenarios, the modeled discharges represent less than 1% of the simulated infiltration, thus indicating that the pumping has been done within sustainable conditions.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30216>

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel fundamental no ciclo hidrológico na região amazônica e constituem uma reserva expressiva de água de boa qualidade, podendo ser utilizada para diversos fins (GALVÃO *et al.*, 2012). Apesar dessa importância, dados hidrogeológicos na região são ainda

escassos, com estudos concentrados particularmente em centros mais urbanizados, como Manaus/AM (SOUZA, 2003; ROCHA *et al.* 2006; SOUZA; VERMA, 2006; GONÇALVES; MIRANDA 2015; PITA *ET AL.* 2018) E BELÉM, MARAJÓ, MONTE ALEGRE, ALTER DO CHÃO E SANTARÉM, NO PARÁ (REIS *ET AL.*, 1977; TANCREDI, 1996; LOPES, 2005, ROCHA; HORBE, 2006, PALHETA; ABREU, 2011; BEZERRA *et al.* 2012; AZEVEDO,

2019).

A região da Amazônia Central, de pouca ocupação humana, devido ao adensamento da floresta e difícil acesso, possui incipientes estudos hidrogeológicos, apenas limitados à região da Província Petrolífera de Urucu, município de Coari/AM, onde está instalada a Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), da Petrobras. Nessa região, estudos sobre caracterização hidrogeológica, geometria dos aquíferos locais, bem como avaliação da relação entre águas subterrâneas e superficiais já foram realizados, constatando-se tratar de um cenário hidrogeológico complexo, devido ao Sistema Aquífero Içá-Solimões - SAIS (GALVÃO, 2011; GALVÃO *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2013, SOUZA *et al.*, 2015; GALVÃO *et al.* 2020).

Apesar de um relativo aprofundamento dessas informações sobre o sistema aquífero local, são necessários, ainda, estudos mais sistemáticos para se entender qual o uso ótimo da água subterrânea na região, de modo a garantir a sustentabilidade hídrica e, ao mesmo tempo, suprir demandas futuras da BOGPM. Dessa forma, uma ferramenta importante que pode ser utilizada, e de eficácia comprovada, para estimativas futuras seguras, é a modelagem numérica (FEITOSA *et al.* 2008).

A modelagem numérica, e a subsequente simulação de cenários hidrogeológicos, é importante na hidrologia das águas subterrâneas, principalmente por dar suporte na tomada de decisões e na gestão de bacias hidrográficas. Quando um modelo hidrogeológico é calibrado satisfatoriamente, ele permite fazer previsões de longo prazo sobre o comportamento hidrodinâmico do aquífero em estudo (FETTER, 1994). Segundo Anderson e Woessner (1992), um modelo matemático (analítico ou numérico) simula o fluxo de água subterrânea de forma indireta por meio de uma equação governante que represente os processos físicos que ocorrem no sistema, juntamente com equações que descrevem as cargas hidráulicas ou fluxos ao longo dos limites (condições de contorno) do modelo. Essa técnica é capaz de prever direções preferenciais de fluxo da água subterrânea, analisar alternativas de locação de poços (CLEARY, 1989) e dar suporte ao planejamento e previsões de situações reais, bem como estimar vazões globais de exploração do aquífero (FEITOSA *et al.*, 2008).

Assim, esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar o impacto da exploração de água subterrânea para abastecimento das diversas unidades na área na BOGPM, por meio da modelagem numérica em diferenças finitas (MODFLOW) do Sistema Aquífero Içá-Solimões, a fim de realizar um balanço entre disponibilidade e demanda hídrica, considerando os usos atuais e futuros, contribuindo para um uso sustentado e integrado das águas subterrâneas. A região é considerada um ótimo laboratório, pois está completamente isolada de outros tipos de ocupações. Como há 100% de controle das taxas de bombeamento das malhas de poços, sem explorações de poços desconhecidos, os dados de entrada são considerados mais confiáveis.

2. Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na Base Operacional Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), na Província Petrolífera de Urucu, município de Coari/AM. Situada a 630 km a sudoeste da capital Manaus, essa província petrolífera compreende uma área com cerca de 120 km², inserida na bacia hidrográfica do rio Urucu, afluente da margem direita do rio Solimões (Lima *et al.*, 2008). A BOGPM tem uma produção diária acima de 1.200 toneladas de gás natural, incluindo mais de 40 mil barris de petróleo, considerada um enclave no meio da floresta amazônica central (PETROBRÁS, 2016) (Figura 1).

Geologicamente, a BOGPM está inserida na Bacia do Solimões, localizada no interior da região norte do Brasil, onde ocupa uma área sedimentar total de aproximadamente 948.600 km² (BARATA; CAPUTO, 2007). O registro sedimentar da Bacia do Solimões é marcado por múltiplos eventos de regressão e transgressão marinha, ligados a processos de subsidência e soerguimento controlados pela atividade nos arcos estruturais, influenciados também por mudanças climáticas e do nível relativo do mar (CAPUTO; SILVA, 1991). As principais formações desses depósitos cenozoicos na região, da base para o topo, são:

Formação Alter do Chão: arenitos grossos, friáveis e de cores variadas que se interpõe em discordância angular entre o Grupo Tefé e a Formação Solimões (CAPUTO *et al.*, 1971; 1972). A idade estimada é Neocretácea para a parte superior da formação via correlação com a vizinha Bacia do Amazonas, a partir de um grande dente de Theropoda em um testemunho do poço 1-NO-1-AM (PRICE, 1961). O ambiente de deposição da Formação Alter do Chão é continental, com fácies associadas a ambientes de planície e leques aluviais.

- Formação Solimões: sucessão de pelitos cinza claro e cinza esverdeado, maciços e laminados, com linhitos intercalados em camadas de 2 m a 10 m de espessura, e arenitos finos a grossos, sub-angulares a sub-arredondados (CAPUTO *et al.*, 1972; CAPUTO, 1984). Associações esporopolínicas estabelecem três zonas palinológicas, correspondendo ao Mioceno, Mioceno/Plioceno e Plioceno (CRUZ, 1987). O ambiente deposicional é fluvial meandrante dominado por material pelítico e lacustre, com lagos formados por canais abandonados;
- Formação Içá: recobre discordantemente a Formação Solimões; formada por arenitos finos a médios e siltitos, onde, localmente, podem apresentar conglomerados argilosos com colorações amarelo avermelhadas (NOGUEIRA, 2003).
- Climatologicamente, a região é caracterizada por alta pluviosidade, limitada pelas isoietas 2250 mm/ano e 2750 mm/ano. O período chuvoso se inicia em outubro, atingindo os maiores índices nos meses de janeiro, fevereiro e março. As temperaturas médias são entre 24° e 26°C, enquanto a umidade relativa do ar é elevada, entre

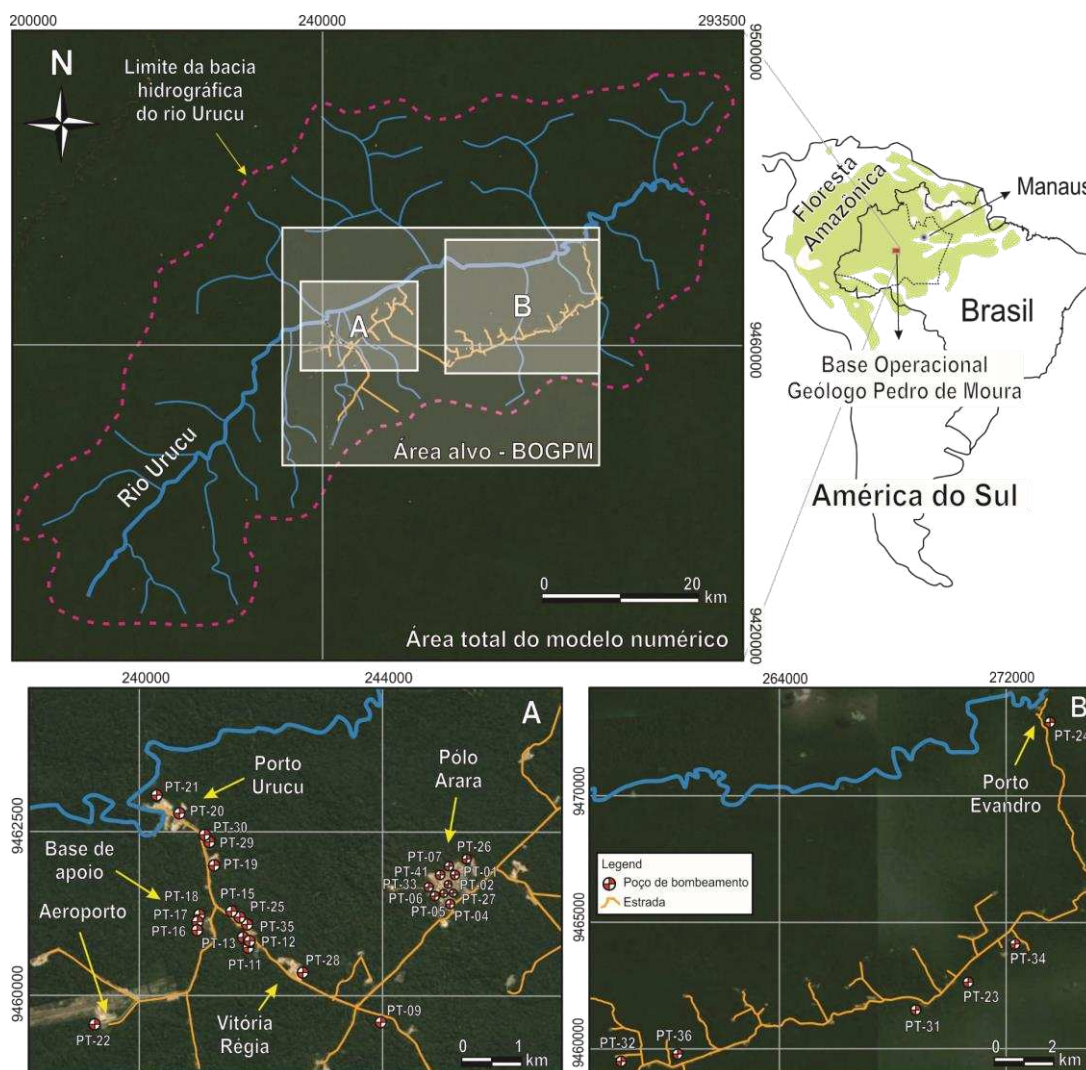
85% e 90%. De acordo com Köppen (1948), o clima dominante na área pertence ao Grupo A (clima tropical chuvoso), caracterizado por temperaturas médias do mês mais frio superiores a 18°C (GALVÃO, 2011).

Hidrogeologicamente, a BOGPM extrai água do Sistema Aquífero Içá-Solimões (SAIS) (GALVÃO et al., 2012), caracterizado por arenitos finos a médios com profundidades de até 120 m (espessuras médias de 50 m). As lentes de argilas permitem, em algumas áreas, a individualização de dois aquíferos: um superficial, com topo e base de profundidades 20 m e 70 m, respectivamente; e um profundo, com profundidades que variam de 80 m a 130 m. Como esses dois aquíferos são hidraulicamente conectados, se trata de um sistema aquífero do tipo livre-confinado. Logo abaixo do SAIS, ocorre uma espessa camada de argilito, variando entre 150-180 m de espessura, denominada Aquicluda Solimões, que faz contato basal, em torno de 300 m de profundidade,

com o Aquífero Alter do Chão, constituído por arenitos grossos e algumas lentes de argila (GALVÃO, 2011; GALVÃO et al., 2012; SOUZA et al. 2015).

O fluxo da água subterrânea local é em direção ao rio principal Urucu (NNW/SSE), concordante com a superfície topográfica. Em outras palavras, os diversos divisores de água superficial coincidem com divisores de água subterrânea, pelo menos em condições naturais, que só são alteradas mediante bombeamentos que resultam em significativos cones de rebaixamento, especialmente onde há uma maior concentração de poços tubulares (Figura 1) (GALVÃO et al., 2012). Sobre os parâmetros hidráulicos do SAIS, os valores médios de transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e coeficiente de armazenamento (S) são 3×10^{-3} m²/s (260 m²/d), 10^{-4} m/s (8,6 m/d) e 5×10^{-4} , respectivamente (GALVÃO et al., 2012).

Figura 1- Área de estudo delimitada para a modelagem numérica (retângulo branco central), onde se localiza a área alvo da BOGPM (mapa superior); detalhes das ocupações, plantas e localização de poços de bombeamento (mapas inferiores A e B) (modificados do Google Earth)



3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da modelagem numérica do SAIS,

primeiramente, foi definido o modelo conceitual hidrogeológico da área. Após isso, foi determinada a área de modelagem e delineadas as condições de contorno do modelo

numérico (em diferenças finitas) para, depois, iniciar a etapa de discretização espacial, finalizando com a calibração do modelo e simulação de cenários. Os subitens, a seguir, detalham as etapas.

3.1. Modelo hidrogeológico conceitual

O modelo conceitual adotado foi definido a partir de informações do balanço hídrico da bacia hidrográfica de Urucu, da geometria do aquífero, por meio de perfis litoconstrutivos e geofísicos de poços de abastecimento e de extração de petróleo, de estudos isotópicos e de ensaios de bombeamento em estudos prévios feitos na BOGPM (GALVÃO, 2011; GALVÃO *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2015), descritos no item anterior.

Com relação aos parâmetros hidráulicos do SAIS, especificamente as distribuições de condutividade hidráulica (K) nas três dimensões, essas foram feitas de acordo com variações litológicas observadas nas seções hidrogeológicas de GALVÃO *et al.* (2012), uma vez que, não há nenhum mapeamento geológico em detalhe da região. Para os demais parâmetros, como armazenamento específico (S_s), porosidade total (η) e porosidade efetiva (η_e), estes foram considerados constantes para todo o modelo: $S_s = 10^{-6}$, $\eta = 0,1$; $\eta_e = 0,03$. Esses valores também foram adotados com base nas variações faciológicas vistas nas mesmas seções hidrogeológicas. Manter esses valores constantes prende-se ao fato de que os modelos são pouco sensíveis às suas variações, ou seja, seriam necessárias grandes variações para se perceber alguma mudança significativa nos resultados.

Com relação a informações sobre espessuras médias consideradas para o SAIS, estas foram mencionadas no capítulo anterior; sobre as áreas e taxas de recargas adotadas, estas serão informadas no item a seguir.

3.2. Modelo numérico

3.2.1. Delimitação e geometria do modelo

Para a modelagem, foi selecionado um retângulo de 94 km x 80 km, cujo limite oeste, leste, norte e sul da área são as coordenadas UTM 200.000 mE, 293.500 mE, 9.500.000 mN e 9.420.000 mN, respectivamente (Datum SAD 69 e zona 20S). Entretanto, o alvo do estudo (células ativas) reside onde as atividades e poços de bombeamento da BOGPM são mais concentradas (Figura 1).

O primeiro passo na modelagem numérica de um aquífero é a definição de sua forma, geometria e espessuras. Para as delimitações transversais (espessuras das camadas e dos aquíferos), foram analisados quatro perfis hidrogeológicos confeccionados por Galvão *et al.* (2012) a partir de dados de 30 poços, sendo 15 para extração de petróleo, 12 para a captação de água subterrânea e 3 furos estratigráficos, bem como perfisagens geofísicas (Figura 2). Esses perfis de poços

variam entre 40 m e 400 m em profundidade.

Quanto à superfície do terreno, foram utilizadas informações de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da área e dados de elevações dos poços de bombeamento. No caso do uso das imagens SRTM, há uma probabilidade de 92,8% para o erro ficar entre -2,0 e 6,0 m, tornando-as uma fonte viável e econômica, principalmente em menores escalas de estudo (DEMÉTRIO *et al.*, 2006).

O limite da bacia do rio Urucu na área da BOGPM foi considerado como o limite do modelo, pois o mapa de superfície potenciométrica da área (GALVÃO *et al.*, 2012) mostrou que o SAIS na região deve ser drenado pela malha de rios (Figura 2); assim sendo, os diversos divisores de água superficial coincidem com divisores de água subterrânea, pelo menos nas condições atuais, que poderiam ser alteradas mediante bombeamentos que rebaixassem a superfície potenciométrica de forma generalizada, rompendo o equilíbrio observado.

3.2.2. Discretização do modelo

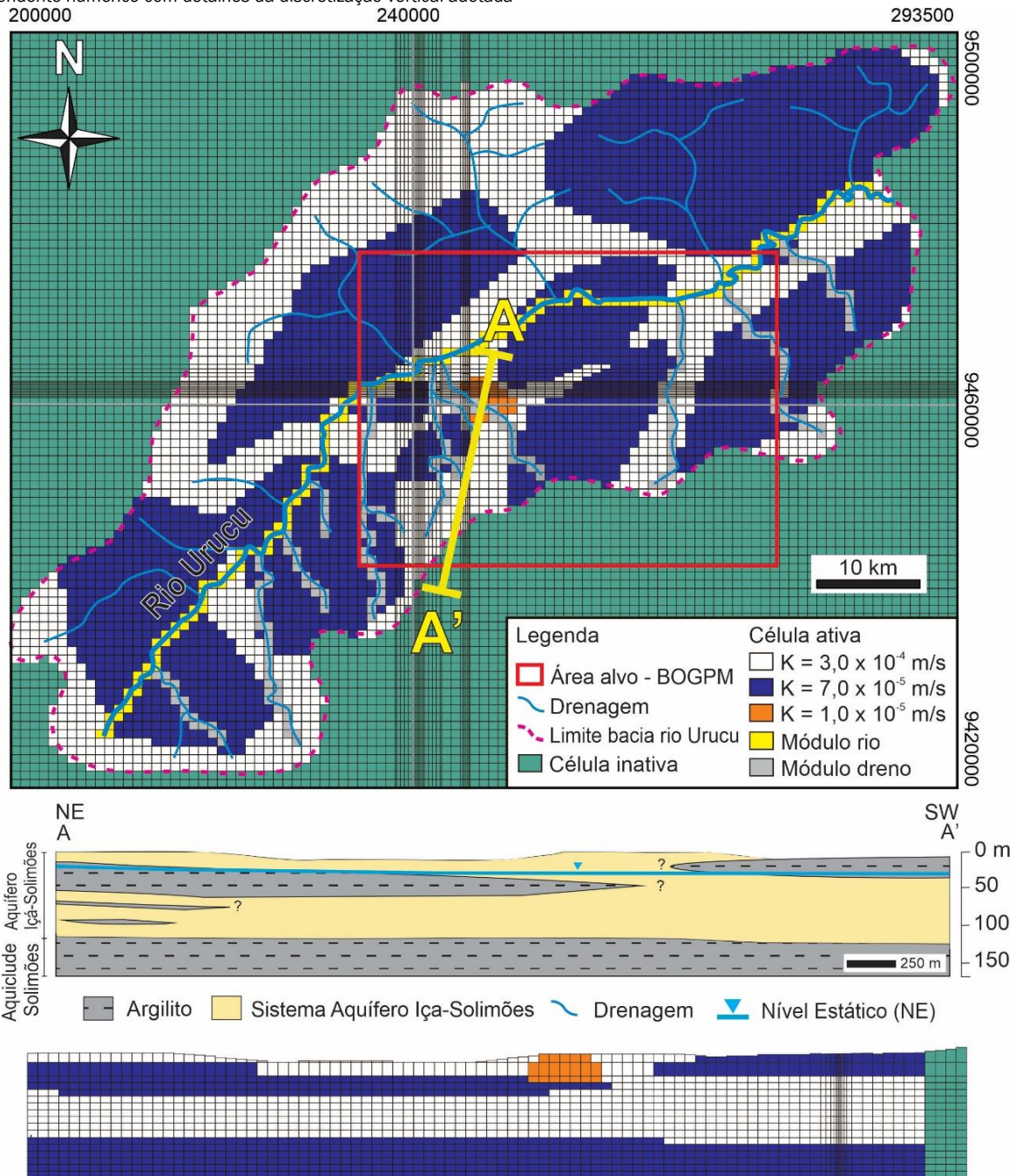
Os aspectos conceituais e matemáticos do modelo numérico de fluxo fundamentaram-se em Freeze e Cherry (1979), Cleary (1989), Anderson e Woessner (1992), Fetter (1994) e Feitosa *et al.* (2008). O software usado foi o MODFLOW (McDonald e Harbaugh 1988) para a modelação matemática em diferenças finitas (NISWONGER *et al.* 2011; HUNT; FEINSTEIN, 2012).

A área modelada foi dividida em 108 linhas e 111 colunas. Os espaçamentos entre as linhas e colunas não foram iguais, variando de acordo com a presença de poços. Nos locais dos poços foi feito um adensamento da malha, com a distância entre as linhas variando entre 800 m e 80 m, enquanto entre as colunas o espaçamento variou de 935 m a 233 m (Figura 2).

Na vertical, o modelo foi discretizado em seis camadas, sendo que as camadas necessariamente não precisaram coincidir com camadas geológicas ou com aquíferos. Localmente, se usou uma discretização na vertical diferente da geológica para se verificar a influência das componentes de fluxo vertical. No caso do modelo da BOGPM, não houve a necessidade de detalhamento do fluxo vertical. Dessa forma, a discretização usada na vertical foi para simular a variação vertical da formação Içá/Solimões (Figura 2).

No total, o modelo foi configurado com 71.928 células, onde, muitas das células foram definidas como inativas por estarem fora da bacia hidrográfica do rio Urucu (Figura 2). Cada uma das células foi representada por um nó, ponto no centro da uma dada célula, onde todas as características da célula e valores de carga hidráulica estão associadas (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

Figura 2 - Acima, delimitação e discretização das áreas modeladas, com a distribuição de condutividades hidráulicas e condições de contorno, onde, para o rio Urucu, foi utilizado o módulo rio, enquanto para drenagens afluentes, o módulo dreno foi adotado. Notar detalhamentos dentro da área alvo da BOGPM, onde estão localizadas maiores atividades e poços de bombeamento. Abaixo, seção hidrogeológica conceitual A-A' e o correspondente numérico com detalhes da discretização vertical adotada



3.2.3. Condições de contorno e calibração do modelo

Além da necessidade do conhecimento dos valores dos parâmetros hidrodinâmicos em cada nó, também foi necessário definir as condições de contorno, estabelecendo as relações dos aquíferos modelados com o meio contíguo. Se o limite de um aquífero se dá com rochas impermeáveis, não haverá fluxo entre o aquífero modelado e a formação limítrofe (contorno de fluxo nulo); por outro lado, se o aquífero modelado se limita com um grande corpo de água, cuja carga hidráulica não varia no tempo, o limite é definido como o de

carga constante (HUNT; FEINSTEIN, 2012). Ainda são consideradas como parte da definição das condições de contorno, as influências causadas pelos rios (influyente ou efluente), os efeitos da recarga por infiltração e evapotranspiração.

A infiltração foi considerada uniforme para toda área, de 25 mm/ano, por considerar a bacia como uma área total de recarga de um sistema aquífero livre/confinado. Embora esse valor possa parecer baixo, mesmo tratando-se de uma região de alta taxa pluviométrica (entre 2250 e 2750 mm/ano,

GALVÃO, 2011), a explicação está no fato de o sistema já estar em equilíbrio e totalmente saturado (capacidade de campo quase total); assim, a precipitação atua mais na interação com águas superficiais e evapotranspiração (GALVÃO, 2011).

No limite entre as células ativas e inativas, a condição foi de fluxo nulo. Para as células ativas, a condição foi de carga variável. Para o rio Urucu, foi utilizado o módulo rio, pois se considerou que não haveria rebaixamentos que deixassem a superfície potenciométrica do aquífero abaixo do leito rio; no máximo poderia ocorrer essa condição em pontos isolados. Para a drenagem afluyente ao rio Urucu, foi utilizado o módulo dreno (Figura 2).

O passo seguinte foi a calibração e validação o modelo, a fim de se saber se o modelo reproduz, com aproximações satisfatórias, as solicitações reais dos aquíferos modelados. Para isso, a calibração foi feita em regime de fluxo permanente, tendo em vista a falta de uma série histórica de monitoramento de níveis e descargas, variando-se os parâmetros hidrogeológicos e infiltrações, a fim de reproduzir a superfície potenciométrica inicial conhecida.

3.2.4. Simulação de cenários

Foram simulados dois cenários: 1) avaliação de impacto do bombeamento dos poços atuais pelos próximos vinte anos, considerando 33 poços; e 2) considerando esses 33 poços, entretanto, com o dobro da vazão adotada no cenário anterior. Dados sobre vazões adotadas são informadas no capítulo a seguir.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Validação do modelo numérico

4.1.1. Calibração do modelo

Para se fazer o aferimento da qualidade do modelo, foi utilizada a informação de vinte cinco valores de cargas hidráulicas, obtidas a partir da campanha de medidas de níveis estáticos e dados de Galvão *et al.* (2012). A Figura 3 mostra a relação entre as cargas observadas e as cargas calculadas pelo modelo. A diferença máxima foi de 8,51 m (PT-02), a mínima de -0,02 (PT-09), com média de 1,84 m.

O erro padrão da estimativa foi de 0,89 m, a raiz média quadrática (RMS)¹ de 4,92 m, a normalizada (NRMS) de 23%, com um coeficiente de correlação de 0,54. Em geral, se aceita que, em modelos bem calibrados, o valor de NRMS deve ficar abaixo de 10% (SPITZ; MORENO, 1996).

Porém, ressalte-se que o modelo desenvolvido é de escala regional e carece de dados adequados para uma boa calibração partindo de dados isolados dos elementos dinâmicos, como poços de bombeamento, por exemplo. Sendo assim, considerando a limitação de dados da região, os valores de calibração foram considerados como satisfatórios para o atual nível de conhecimento e complexidade da área. O modelo mostrou ser mais sensível às modificações de recarga do que às da condutividade hidráulica.

A Figura 4 apresenta o mapa de superfície potenciométrica resultante da calibração. Uma vez considerada a potencimetria da calibração como válida, ela foi usada como as cargas iniciais para as simulações posteriores em regime transitório, para simular cenários de utilização do SAIS.

O balanço hídrico apresentado pelo modelo mostra que, em toda a área modelada, são infiltrados 225.065 m³/d, que equivalem a 9.377,7 m³/h, ou 82,15 hm³/ano, correspondente aos 25 mm/ano adotados nas condições de contorno.

¹RMS = $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}$ NRMS = $\frac{RMS}{(X_{obs,max}) - (X_{obs,min})}$; onde: R_i = Resíduo; n = num. de poços de observação; X_{obs,max} = Maior carga hidráulica observada; X_{obs,min} = Menor carga hidráulica observada.

Figura 3 - Relação entre cargas calculadas pelo modelo e cargas observadas de Galvão *et al.* (2012)

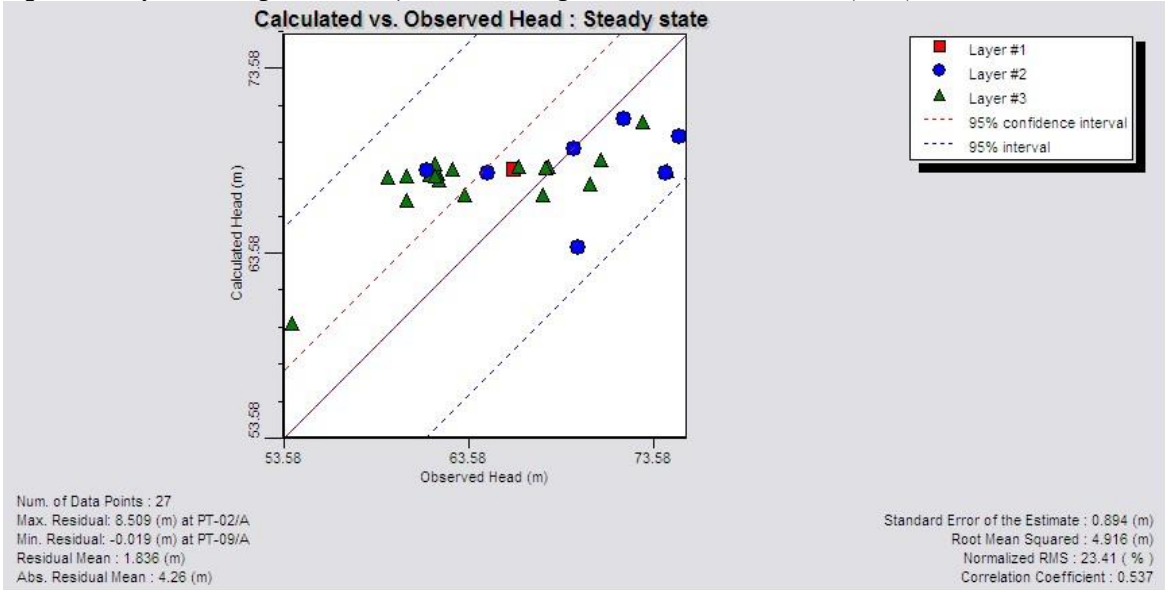
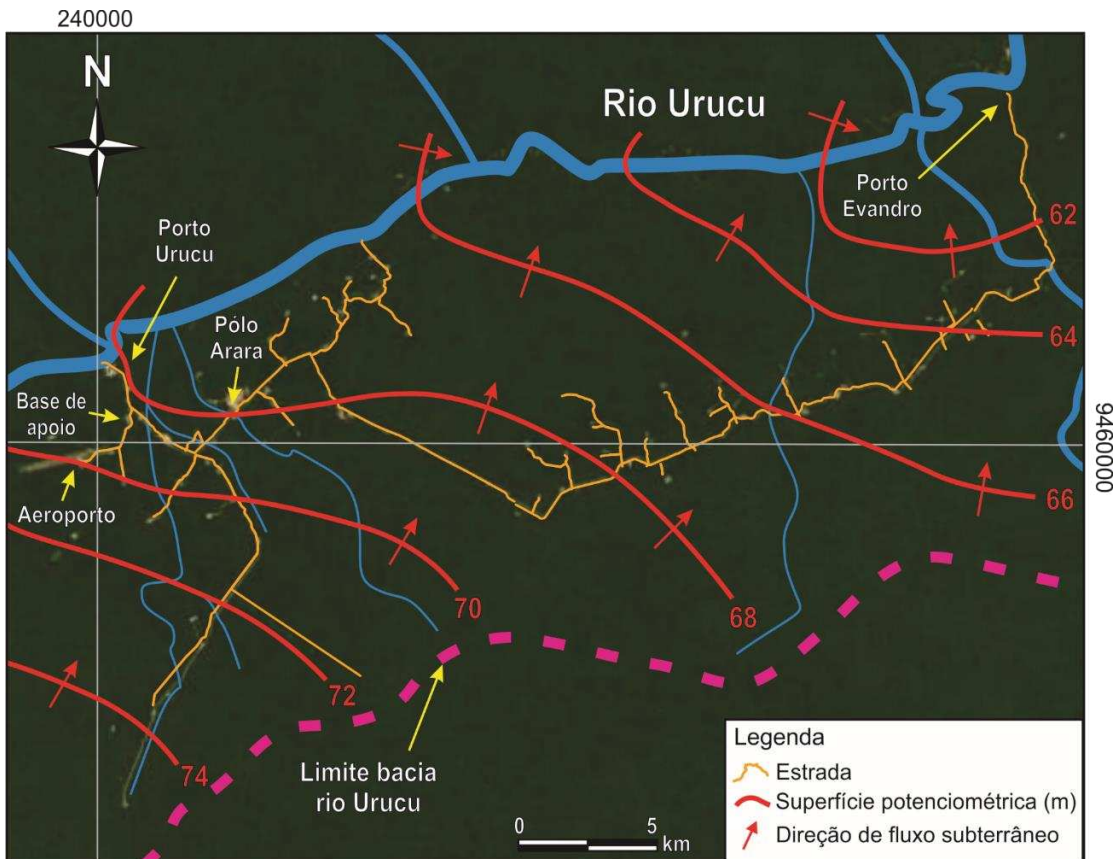


Figura 4 - Superfície potenciométrica calibrado do modelo para as simulações em regime transitório



4.1.2. Simulação de cenários

A etapa subsequente à calibração seria a validação, que corresponderia à reprodução de uma série histórica de descargas e níveis de água nos poços. Na falta de uma série histórica, essa etapa foi excluída, passando-se para a etapa de simulação de cenários, que consistiu em utilizar o modelo

calibrado para verificar possíveis usos do aquíferos. Foram simulados dois cenários:

- 1) **Cenário 1:** verificar impacto do bombeamento dos poços atuais pelos próximos vinte anos. Para isso, foram utilizados 33 poços (Tabela 2). As vazões foram as determinadas em testes de produção realizadas e calculadas por Galvão (2011). Embora os poços

funcionem em regime alternado na BOGPM, foi simulado o bombeamento contínuo, que é uma situação mais severa de exploração de água. A descarga dos poços totaliza 912,97 m³/h, equivalente a 0,333 hm³/ano, o que corresponde a 0,41% da infiltração.

- 2) Cenário 2: considerando os mesmos 33 poços, entretanto, com o dobro da vazão adotada no cenário

anterior (1.825,94 m³/h, 0,666 hm³/ano, 0,82% da infiltração). Para isso, foram utilizadas as mesmas condições do cenário 1, com apenas a vazão dos poços sendo dobrada.

A Figura 5 apresenta os rebaixamentos esperados para os cenários 1 e 2, após vinte anos de bombeamento contínuo, representando apenas a área da BOGPM.

Tabela 2 - Poços usados nos cenários 1 e 2. As variações das vazões estão relacionadas com profundidades, diâmetros do poço e potência da bomba. As seções filtrantes estão posicionadas sempre nos intervalos arenosos, evitando lentes pelíticas. Os dados foram baseados em perfilações geofísicas durante a perfuração e completação dos poços tubulares

Poço	Vazão (m ³ /h)	Poço	Vazão (m ³ /h)	Poço	Vazão (m ³ /h)
PT-01	109,30	PT-16	11,10	PT-27	78,00
PT-02	103,10	PT-17	14,90	PT-28	0,42
PT-04	50,00	PT-18	5,00	PT-29	2,06
PT-05	178,00	PT-19	5,00	PT-30	5,00
PT-06	92,00	PT-20	12,30	PT-31A	5,00
PT-07	92,00	PT-21	4,20	PT-31	5,00
PT-09	5,10	PT-22	0,63	PT-32	5,00
PT-11	5,00	PT-23	2,06	PT-33	35,40
PT-12	5,00	PT-24	5,00	PT-34	5,00
PT-13	1,58	PT-25	1,72	PT-35	5,00
PT-15	49,10	PT-26	5,00	PT-36	5,00

Os cenários simulados mostram que os maiores rebaixamentos, como esperado, concentram-se no entorno do Polo Arara, região de maior concentração de poços de bombeamento, e que o rio Urucu funciona como uma fronteira de recarga localizada.

Os rebaixamentos mostrados na Figura 5 não servem para estimar rebaixamentos nos poços de bombeamento, pois os modelos numéricos não são próprios para esse fim: o MODFLOW, ou qualquer modelo em diferenças finitas, não considera as características construtivas dos poços, mas as características geométricas das células. Além disso, se houver mais de um poço em uma célula, o modelo considera a descarga total dos poços e não poços individualmente; ou seja, para o modelo numérico, não existe a entidade poço, mas a descarga do poço (ou dos poços) extraída da célula ativa considerada.

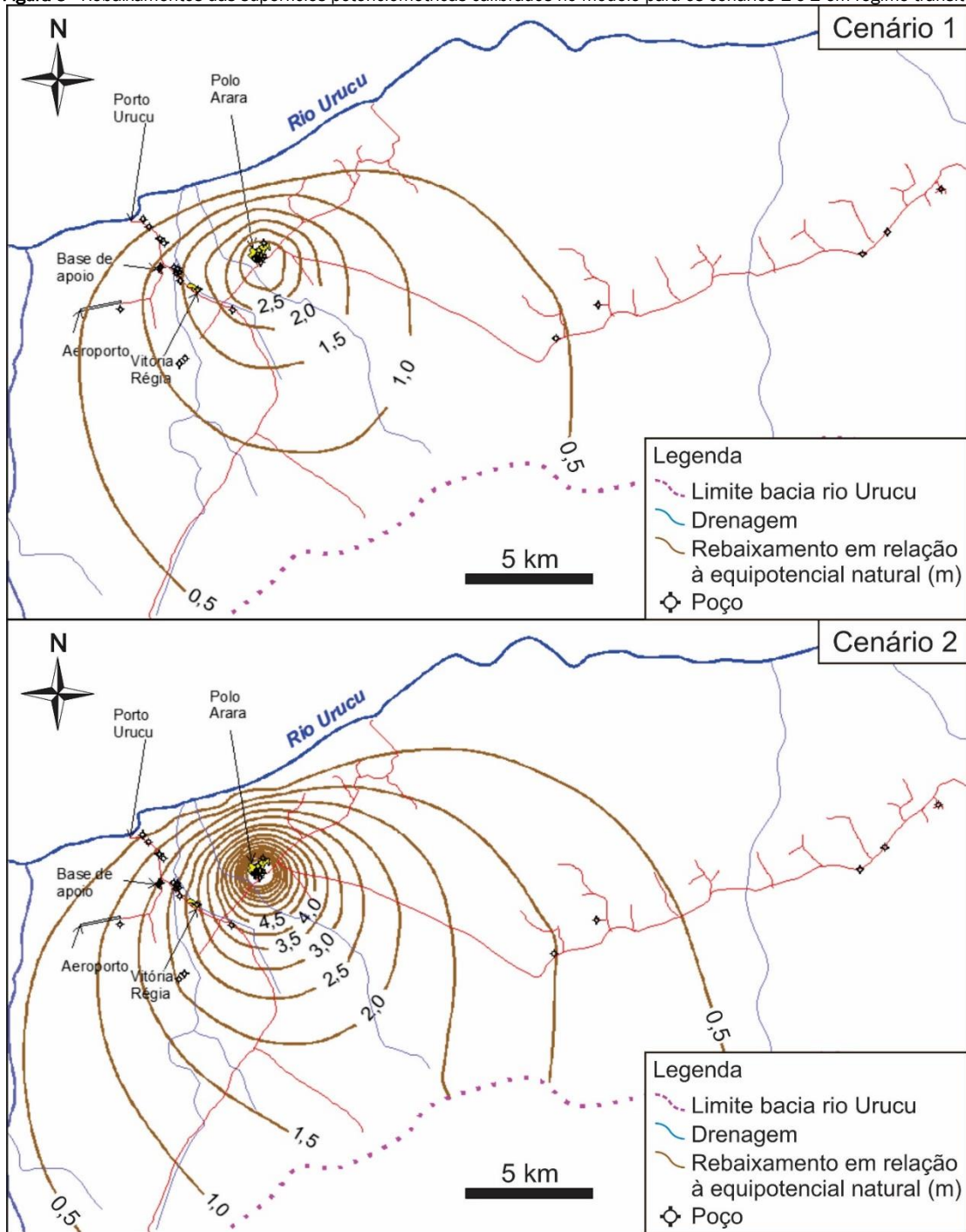
Desse modo, esses modelos mostram muito bem os rebaixamentos gerais causados no aquífero; para o cálculo dos rebaixamentos nos próprios poços de bombeamentos os modelos analíticos são mais representativos. Assim, os rebaixamentos máximos de aproximadamente 3,5 m (cenário 1) e de cerca de 9 m (cenário 2) observados no Polo Arara não querem dizer que esses seriam os rebaixamentos esperados para os poços ali existentes: seguramente, os rebaixamentos

seriam até maiores, se considerar o centro de cada poço, onde se considera, ainda, incrementos de rebaixamentos devido a perdas laminares e axiais de cargas hidráulicas tanto de aquífero (BQ) como no poço (CQ), conforme equação característica de poço: $s = BQ + CQ^2$ (FEITOSA, et al., 2008).

Apesar de se ter uma grande diferença entre o que se infiltra no SAIS e o que é bombeado, uma vez que, as descargas do cenário 2 representam apenas 0,82% da infiltração, deve-se ter em mente que há uma concentração de poços de altas vazões no Polo Arara. Além da concentração, os poços estão separados por pequenas distâncias: por exemplo, o PT-40 está apenas a 40 m do PT-41. Isso faz com que as interferências entre os poços sejam grandes, aumentando o rebaixamento deles. Desse modo, havendo necessidade futura de se aumentar a produção de água no Polo Arara, será necessário buscar novas áreas para construção de poços, mesmo que para isso seja preciso fazer a adução da água.

Com relação ao rio Urucu, em condição natural, trata-se de um rio efluente, ou seja, que recebe a descarga do SAIS, fato constatado a partir de análises isotópicas interpretadas por Souza et al. (2015). Entretanto, em ambos os cenários 1 e 2, na região entre o Porto Urucu e o Polo Arara (Figura 5), o rio Urucu possivelmente muda para uma condição local de rio influente, ou seja, podendo descarregar suas águas no SAIS.

Figura 5 - Rebaixamentos das superfícies potenciométricas calibrados no modelo para os cenários 1 e 2 em regime transitório



5. CONCLUSÕES

A principal ferramenta que se dispõe para verificar a qualidade do modelo é o monitoramento dos níveis da água nos poços e as descargas deles. Sendo assim, é fundamental a implantação de uma rede de monitoramento para a BOGPM, pois só assim será possível se fazer calibrações e validações cada vez mais confiáveis. Quanto maior forem as séries históricas mais representativas serão os resultados do modelo.

O modelo aqui proposto é de caráter preliminar e regional, pois é o primeiro modelo proposto para a BOGPM e por não se dispor de nenhuma série histórica de níveis e descarga, além de poucos testes de aquífero realizados. É regional pelas suas dimensões; assim, problemas em áreas restritas têm que ser resolvidos com modelos específicos.

Os resultados com as simulações mostram que o Sistema Aquífero Içá-Solimões ainda está nos primórdios de suas explorações, pois as descargas, mesmo em cenários mais severos, não representam nem um 1% da infiltração; ou seja, o bombeamento está sendo feito dentro das condições de

sustentabilidade. Portanto, é necessário, desde já, que os responsáveis pela operação e manutenção dos poços promovam ações para que possam assumir o controle da exploração desse sistema aquífero para que ele continue sendo aproveitado de maneira racional. A importância desse controle passa pela qualidade dos poços e o monitoramento sistemático das descargas e níveis da água nos poços.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela Petrobras, por meio do projeto de pesquisa Ecoeficiência 3 (Contrato N° 0050.0032737.07.2).

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. *Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and AdvectiveTransporte*, Academic Press, California, E.U.A, 1992
- AZEVEDO, J. H. *Fluxos subterrâneos e recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão em lateritos amazônicos: estudo de caso em Porto Trombetas, Pará*. 2019. xv, 139 f., il. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas), Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Acesso dezembro 2022: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/35404>
- BARATA CF; CAPUTO M.V. *Geologia do petróleo da Bacia do Solimões: o estado da arte: 4° PDPETRO – Campinas, SP – ABPG, 2007.*
- BEZERRA DOS SANTOS, A. C., BATISTA DA SILVA, A. L., TEIXEIRA PINHEIRO, L., MELO DIAS, R. H., ZARANZA DIAS DE OLIVEIRA, R. *Caracterização hidrogeológica e análise de vulnerabilidade do bairro do Guamá-Belém-PA. Águas Subterrâneas*, 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27576>
- CAPUTO, M.V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D.N.N. *Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas*. Belém, Petrobras. Rel. interno, 1971.
- CAPUTO, M.V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D.N.N. *Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26. Belém, SBG. *Anais [...]*. v.3, p.35-46, 1972.
- CAPUTO, M.V. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology, and paleogeography of northern basins of Brasil*. Santa Barbara, University of California. 586p. (PhD Thesis), 1984.
- CAPUTO MV, SILVA OB. *Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões*. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J.. *Origem e evolução das bacias sedimentares*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, p. 169-193, 1991.
- CLEARY, R. *Águas Subterrâneas*. In: *Engenharia Hidrológica*, v. 2, Cap. 5, Coleção ABRH, Ed. UERJ, 1989.
- CRUZ NMC. *Quitinozoários da Bacia do Solimões, Brasil*. Belém, Convênio CPRM/Petrobras. Rel. interno, 1987.
- DEMÉTRIO, J. G. A., CORREIA, L. C., E SARAIVA, A. L. *Utilização de Imagens SRTM na Confeção de Mapas Potenciométricos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, *Resumos [...]*. Curitiba, ABAS, 2006. 176p.
- FEITOSA FAC, MANOEL FILHO J, FEITOSA EC, DEMETRIO JGA. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed., Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. 812p.
- FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. New York: Macmillan, 1994. 691 p.
- FREEZE, A.R., CHERRY, J.A. *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1979. 604 p.
- GALVÃO P.H.F. *Caracterização hidrogeológica dos Aquíferos da Formação Solimões na Base Operacional Geólogo Pedro de Moura, Província Petrolífera de Urucu (AM)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2011. 148p.
- GALVÃO P.H.F., DEMÉTRIO J.G.A., SOUZA E.L., PINHEIRO C.S.S., BAESSA M.P.M. *Hidrogeologia e Geometria dos Aquíferos das Formações Cretáceas Içá e Solimões, Bacia Paleozóica do Solimões, na Região de Urucu/AM*. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, suppl 1, p. 141-152, 2012. <https://doi.org/10.5327/Z0375-75362012000500012>
- GALVÃO P., SOUZA E.L., DEMÉTRIO, J. G., BAESSA, M. M. 2020. *Estimating groundwater resources of the Içá-Solimões Aquifer System in the Urucu Oil Province Central Amazon Region, Brazil, focused on a balance between availability and water demand*. RBRH, 25, 2020. e6. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190058>
- HUNT RJ, FEINSTEIN DT. *MODFLOW-NWT: robust handling of dry cells using a Newton formulation of MODFLOW-2005*. *Ground Water*, v. 50, p. 659 – 663, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00976.x>
- KÖPPEN, W. *Climatologia: conun estudio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.
- LIMA SOF, MARTINS MB, PRUDENTE AC, MONTAG LFA, MONNERAT MC, CABRAL PR. *Biodiversidade na Província Petrolífera de Urucu*. Rio de Janeiro: Petrobras/Cenpes. p. 26-39, 2008.
- LOPES, ECS. *Estudos hidrogeoquímicos e geofísicos da região da braquidobra de Monte Alegre/PA*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2005. 75p.
- McDONALD, M.G.; HARBAUGH, A.W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. *US Geol Surv Tech Water Resour Invest*, 6-A1, 1988. 586 p.
- NISWONGER, R.G.; PANDAI, S.; IBARAKI, M. *MODFLOW-NWT: a Newton formulation for MODFLOW-2005*. *US Geol Surv Tech Methods* 6-A37, 2011. 44p. <https://doi.org/10.3133/tm6A37>
- NOGUEIRA, A.C.R.; ARAI, M.; HORBE, A.M.; SILVEIRA, R.R.; SILVA, J.S. *A Influência marinha nos depósitos da Formação Solimões na região de Coari (AM): Registro da transgressão miocênica na Amazônia ocidental*. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 8, Manaus. *Anais [...]*. SBG, Resumos Expandidos, 2003. CD-ROM.

PALHETA, E. S. DE M., & DE ABREU, F. DE A. M. Sistemas hidrogeológicos da região metropolitana de Belém - Pará - Brasil: o improvável confinamento. *Águas Subterrâneas*, 2011. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28028>

PETROBRAS. *Urucu oil province*. 2016. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/urucu-completamos-30-anos-na-amazonia-com-gestao-responsavel.htm>. Acesso em: set. 2021.

PITA, R. C. dos ; SILVA JÚNIOR, G. C. da, ROSÁRIO, F. F. do; SILVA, M. L. da. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Geologia USP. Série Científica*, v. 18, n. 1, p. 273-296, 2018. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-134253>

PRICE LI. Sobre os dinossauros do Brasil. *An. Acad. Bras. Cienc.* V. 33, n. 3-4, p. xxviii-xxix, 1961.

REIS, C.M.; TANCREDI, A.C.F.N.S.; MATSUI, E.; SALATI, E. Caracterização das águas da região de Marajó através de concentrações de O-18 e D. *Acta Amazonica*, v. 7, p. 209-222, 1977. <https://doi.org/10.1590/1809-43921977072209>

REYSING, E., *Matemática superior*, Vol. 2, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro, 1969.

ROCHA LCR, HORBE AMC. 2006. Contaminação provocada por um depósito de lixo no aquífero Alter do Chão em Manaus/AM. *Acta Amazonica*, v. 36, n. 3, p. 307-312, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000300003>

SOUZA, E.L. Comentários sobre "Avaliação dos Impactos Antropogênicos no Ciclo da Água na Amazônia" de Souza,

Rocha e Cohen, com ênfase nas Águas Subterrâneas. In: ARAGÓN, Luis E.; CLUSENER-GODT, Miguel. (Org.). *Problemática do uso local e global da água na Amazônia*. 1. ed. Brasília: UNESCO-NAEA, v. 1, p. 107-114, 2003.

SOUZA, E.L.; GALVÃO, P.H.F.; PINHEIRO, C.S.S.; BAESSA, M.P.M.; DEMÉTRIO, J.G.A.; BRITO, W.R.R. Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. *Rev. do Inst. Geociências - USP*, 13, 107, 2013. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2013000100007>

SOUZA, E.L.; GALVÃO, P.H.F.; ALMEIDA, R.; PINHEIRO, C.; BAESSA, M.; CABRAL, M. Stable Isotopes Studies in the Urucu Oil Province, Amazon Region, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, v.7, p. 131-142, 2015. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2015.73011>

SOUZA, L.S.B.; VERMA, O.P. Mapeamento de aquíferos na cidade de Manaus/AM (zonas norte e leste) através de perfilação geofísica de poço e sondagem elétrica vertical. *Revista de Geologia*, v. 19, n. 1, p. 111-127, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000300012>

SPITZ, K., MORENO, J. *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.

TANCREDI, A.C.F.N.S. Recursos hídricos subterrâneos de Santarém. Fundamentos para uso e proteção. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém; Tese de Doutorado. 153p, 1996.