

MODELAGEM NUMÉRICA PARA A AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA, DE INTRUSÃO DE CUNHA SALINA E RECARGA ARTIFICIAL NO AQUÍFERO DOS INGLESES

Nilson Guiguer ¹, Sophia Cavalcante Varela ², Lauro Zanatta ³, Marina Naim Brock Trevizolli ⁴

¹ Water Services and Technologies. Rodovia Mauricio Sirotsky Sobrinho, 5145. Florianópolis (SC).
nilson.guiguer@waterservicestech.com.

² Water Services and Technologies. Rodovia Mauricio Sirotsky Sobrinho, 5145. Florianópolis (SC).
sophia.varela@waterservicestech.com

³ Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. Rua Emílio Blum, 83. Florianópolis (SC).
lzanatta@casan.com.br

⁴ Water Services and Technologies. Rodovia Mauricio Sirotsky Sobrinho, 5145. Florianópolis (SC).
marina.trevizolli@waterservicestech.com.

Palavras-Chave: Hidrogeologia; Modelagem Numérica; Intrusão de Cunha Salina.

INTRODUÇÃO

A área de estudo compreendeu a porção nordeste da Ilha de Santa Catarina, abarcando as praias de Ingleses, Santinho, Moçambique e o Distrito de São João do Rio Vermelho. O Sistema Aquífero Ingleses-Rio Vermelho possui uma área de cerca de 30 km², e é representado por um pacote sedimentar, predominantemente arenoso e com intercalações de lentes argilosas, depositado sobre o embasamento cristalino, sendo este constituído por granitos que afloram a leste e a oeste da área.

O Sistema de Abastecimento de Água Costa Norte atende os Distritos de Rio Vermelho, Ingleses, Santinho, Ponta das Canas, Canasvieiras, Jurerê, Daniela e Ratonas. No inverno, a vazão média de extração é de 220 L/s e atende aproximadamente 112.000 habitantes, enquanto no verão, a vazão média é de 350 L/s e atende cerca de 150.000 pessoas.

Por sua natureza costeira, o aquífero estudado está sujeito à intrusão salina, ou seja, à penetração de água do oceano ilha adentro. Tal fenômeno ocorre com o rompimento do equilíbrio hidrodinâmico entre as massas de água doce e salina no aquífero, provocado pelo bombeamento de poços tubulares próximos à linha de costa. A intrusão de cunha salina é principalmente o resultado da exploração indiscriminada e não planejada de aquíferos costeiros (SREEKANTH e DATTA, 2010). Em virtude da importância e complexidade desses aquíferos, busca-se, por meio de pesquisas, melhor compreender o sistema de fluxo e os processos de transporte, visando aumentar a segurança na exploração desses aquíferos e evitar a contaminação desses sistemas costeiros (DIERSCH e KOLDITZ, 2002).

O objetivo principal do presente estudo foi a determinação das condições ótimas de exploração do aquífero, de modo a evitar a salinização das zonas produtoras. Ademais, foi avaliada a possibilidade de recarga artificial do aquífero, afim de promover o aumento da sustentabilidade hídrica, bem como uma barreira física à intrusão de cunha salina.

ELABORAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico tridimensional de fluxo e transporte de massa em águas subterrâneas foi desenvolvido no *software Visual MODFLOW*, da *Waterloo Hydrogeologic*, de modo a simular o comportamento hidrodinâmico do aquífero em diferentes cenários de bombeamento e de recarga artificial, considerando a possibilidade de intrusão de cunha salina. Para este fim, seguiu-se o seguinte procedimento metodológico: Levantamento de dados; Desenvolvimento do Modelo Conceitual; Tradução do modelo conceitual para o modelo numérico; Calibração do modelo; e Simulação de cenários futuros.

A fase de levantamento de dados, que envolveu pesquisa bibliográfica e realização de ensaios em campo, foi fundamental para a elaboração do modelo conceitual e definição dos parâmetros hidrodinâmicos

necessários para a modelagem numérica. O modelo conceitual da área de estudo apontou uma geometria caracterizada por um pacote sedimentar, com a alternância entre camadas arenosas e argilosas. Notou-se uma continuidade regional entre as camadas, o que permitiu subdividir a área de estudo em aquíferos e aquíferos, apesar de algumas camadas argilosas serem descontínuas. O sistema aquífero consistiu, portanto, de um aquífero livre superior e vários aquíferos semi-confinados entre os aquíferos.

O modelo numérico foi desenvolvido com uma área de 30,2 km², subdividida em uma malha numérica de 171 linhas e 99 colunas na horizontal e 20 camadas verticais, totalizando 338.580 células. Houve uma maior discretização próxima aos poços de produção, de modo a representar em menor escala os gradientes hidráulicos. Os limites do modelo foram definidos de acordo com o modelo conceitual, sendo o inferior delimitado pelo embasamento da rocha cristalina e superior pela topografia, com espessura de até 250m na parte central do aquífero. Esta mesma rocha granítica, considerada impermeável, representou o limite do modelo no lado Oeste. A Leste e ao Norte, o domínio simulado foi limitado pelo mar e em parte do Sul pela Lagoa da Conceição. Cabe ressaltar que o domínio do modelo consistiu somente na área do aquífero, sendo inativada a área coberta pelas rochas graníticas, por ser considerada impermeável.

Os parâmetros hidrodinâmicos, sendo estes a condutividade hidráulica horizontal (Kh) e vertical (Kv), bem como o coeficiente de armazenamento (Ss) e porosidade eficaz (Sy), foram definidos utilizando a média geométrica dos resultados obtidos a partir das quatro seguintes metodologias: Soluções Analíticas de Theis e Hantush, Solução Analítica de Múltiplos Aquíferos (Henker e Mass), Modelagem Inversa com Elementos Finitos, e Modelagem Inversa com Diferenças Finitas e uso de Estimativa de Parâmetros Automática. A média geométrica resultante das metodologias supracitadas foi utilizada como parâmetro de entrada no modelo, e é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros hidrodinâmicos das camadas hidrogeológicas

Camada	Kh	Kv	Ss	Sy
Aquífero 1	$5,79 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$9,33 \cdot 10^{-4}$	$6,35 \cdot 10^{-3}$
Aquífero 1	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$7,12 \cdot 10^{-8}$	$5,62 \cdot 10^{-6}$	-
Aquífero 2	$4,48 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$6,80 \cdot 10^{-4}$	-
Aquífero 2	$2,12 \cdot 10^{-7}$	$1,59 \cdot 10^{-7}$	-	-
Aquífero 3	$5,92 \cdot 10^{-5}$	$2,81 \cdot 10^{-5}$	$6,45 \cdot 10^{-4}$	-
Aquífero 3	$1,18 \cdot 10^{-6}$	$8,52 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$	-
Aquífero 4	$9,42 \cdot 10^{-5}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$	$4,15 \cdot 10^{-5}$	-

A recarga foi determinada a partir da equação do balanço hídrico, sendo a evapotranspiração determinada pelo método de Penman. O cálculo da recarga levou em consideração os tipos de uso do solo da área de estudo, sendo definidos como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Determinação da Recarga do Aquífero em valores anuais

Região	Área Total (m ²)	Recarga Anual – Penman (mm/ano)	Recarga Anual (%)
Granito	15.029.045,3	33,4	7,9
Urbana Densa	6.961.254,7	106,4	25,2
Urbana Não Densa	4.301.396,1	50,2	11,9
Dunas	4.756.403,7	111,0	26,3
Vegetação Rasteira	6.232.890,7	72,7	17,2
Vegetação Arbórea	5.613.150,0	49,1	11,6
TOTAL	4.289.414,0	422,8	100,0

O modelo conceitual apontou a falta de corpos de água superficiais expressivos na área de estudo. Portanto, na camada superficial, a condição de contorno adotada foi apenas de recarga, utilizando-se os valores descritos previamente. Na região do oceano, estabeleceu-se uma condição de contorno de carga constante igual ao nível médio do mar (0), e o mesmo ocorreu nas células ao sul que estão em contato com a

Lagoa da Conceição. Posteriormente, para a avaliação de intrusão de cunha salina, na região do mar, foi alterada a condição de contorno para uma carga constante equivalente da água salgada.

A calibração do modelo foi realizada para as condições de bombeamentos atuais. Foram necessárias pequenas alterações nos valores de condutividade hidráulica, recarga e coeficientes de armazenamento, para que fosse obtido um erro médio normalizado de 11% ao se comparar os valores de carga hidráulica observados nos poços e piezômetros com os valores calculados pelo modelo nos mesmos pontos. Essa calibração foi considerada adequada, uma vez que este erro médio foi avaliado como um ajuste aceitável por ser uma situação na qual os níveis são medidos nos próprios poços de bombeamento e não em piezômetros próximos, em datas distintas e com um controle de medição de vazão nos poços bastante irregular.

SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS E RESULTADOS

Visando avaliar os valores máximos de bombeamento no aquífero, foram estabelecidos diferentes cenários de exploração. Os cenários foram realizados primeiramente para o modelo de fluxo, no Visual MODFLOW, e para a avaliação de intrusão de cunha salina utilizou-se o módulo SEAWAT, que permite a simulação de fluxo com a variação de densidade.

O primeiro cenário consistiu na situação pré-bombeamento, para verificar as condições do aquífero antes do início da exploração, bem como aprimorar a calibração do modelo. O resultado apresentou as maiores elevações do lençol freático na região central do aquífero, entre as duas áreas de afloramento rochoso. Desta área, o fluxo natural escoava para Norte e para Sudeste, descarregando nas praias de Ingleses e Santinho, e na Praia de Moçambique, respectivamente. Nesse cenário, simulou-se também a intrusão de cunha salina, de modo a utilizar esse resultado como condição inicial para as demais simulações.

O segundo cenário considerou a vazão máxima que pode ser extraída dos poços atualmente, considerando a operação de 24 horas. Isso representa uma vazão de bombeamento de 400 L/s, valor próximo ao estimado como recarga do aquífero (422 L/s). Dessa forma, foi possível avaliar a sustentabilidade de abastecimento do aquífero. Os resultados mostraram que os níveis se estabilizaram em cerca de 35 anos, com o maior rebaixamento na região central do aquífero. Contudo, uma área com nível do lençol freático acima de 0 entre essa região e o oceano serviram como barreira à intrusão de cunha salina. Nesse cenário, apesar de a cunha salina se estabilizar apenas em 70 anos, as concentrações de salinidade encontradas nos poços seriam significativamente baixas. Portanto, como nenhum poço foi comprometido, esse cenário foi considerado seguro do ponto de vista da sustentabilidade do abastecimento.

Visando avaliar as máximas vazões sustentáveis, o terceiro cenário foi realizado considerando o dobro da vazão extraída no cenário anterior, ou seja, 800 L/s. Para possibilitar essa vazão de captação, foram introduzidos 26 novos poços e distribuídos por todo o modelo. Os resultados obtidos demonstraram um rebaixamento excessivo em todo o aquífero, podendo atingir 40m, provocando, assim, um avanço significativo da intrusão da cunha salina, de modo a comprometer grande parte do aquífero. Dessa forma, esse cenário foi considerado insustentável, por promover uma vazão de extração excessiva. A Figura 1 apresenta a comparação entre a intrusão de cunha salina para os cenários 2 e 3, com bombeamento de 400 L/s e 800 L/s, respectivamente.

A partir do estabelecimento de outros cenários, concluiu-se que a vazão máxima de extração sustentável para o aquífero é de 520 L/s, o que representa um aumento da capacidade de abastecimento do sistema em 75%. Contudo, uma alternativa para aumentar mais significativamente a sustentabilidade do aquífero seria por meio da recarga artificial de água residual tratada. De modo a testar essa hipótese, o último cenário considerou a vazão de extração de 800 L/s e uma recarga artificial de 300 L/s, localizada nas dunas entre a região do Santinho e a praia dos Ingleses. Os resultados desse cenário em comparação com o cenário anterior, que simulou a mesma vazão, mas sem a recarga artificial, é apresentado na Figura 2. Nesse cenário não ocorreu um aumento da intrusão de cunha salina de modo a comprometer a sustentabilidade do aquífero, uma vez que a recarga artificial criou um divisor de águas ao sul da praia dos Ingleses, que preveniu o avanço da cunha salina no sentido Sul, local onde comprometia o aquífero anteriormente.

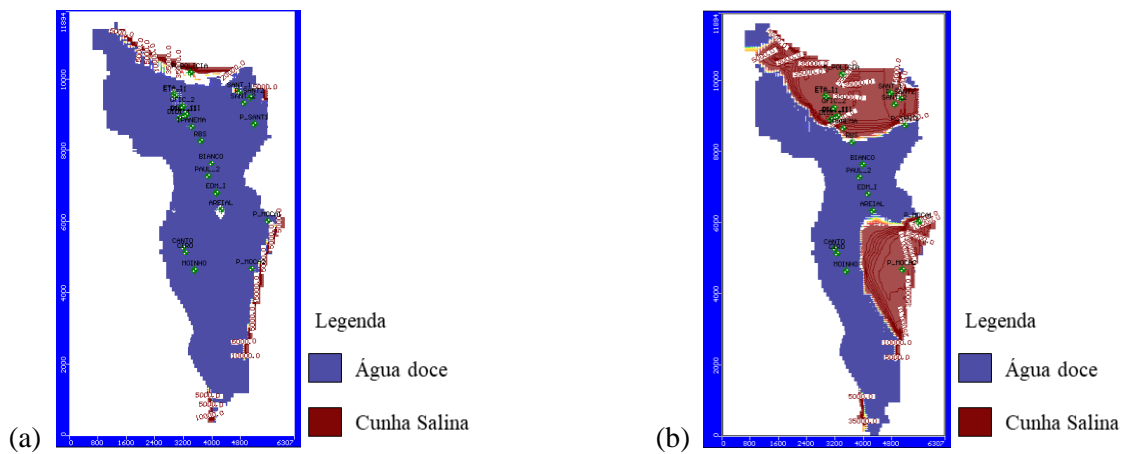


Figura 1. Intrusão de cunha salina para o cenário (a) bombeamento de 400L/s e (b) bombeamento de 800L/s

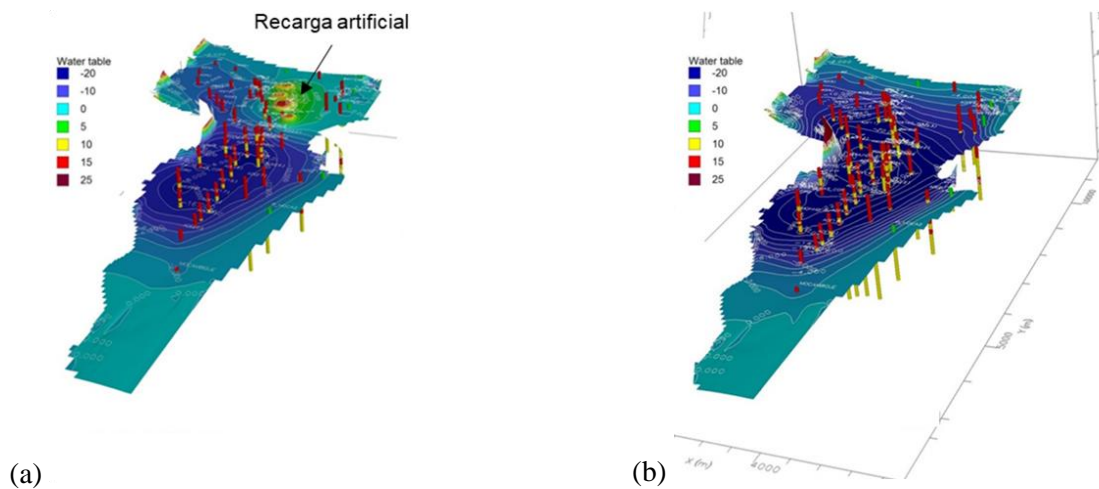


Figura 2. Comparação dos cenários com (a) bombeamento de 800 L/s com recarga artificial e (b) sem recarga artificial do aquífero.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da realização de múltiplos cenários, foi determinada a vazão máxima de extração do aquífero de 520 L/s, o que representa um aumento de 75% em relação à operação atual. Isso significa que essas são as condições máximas de extração para garantir uma sustentabilidade hídrica, onde não haja avanço da cunha salina de modo a comprometer o uso do aquífero.

Contudo, ao implantar-se um sistema de recarga artificial do aquífero, por meio do reúso de água residual tratada, uma vazão de 300 L/s de recarga já viabilizaria a extração de 800 L/s. Isso ocorre porque a recarga artificial atua como barreira à intrusão de cunha salina, promovendo um aumento da capacidade de exploração do aquífero.

Por fim, recomenda-se a instalação de um projeto piloto de implementação de lagoas de infiltração de água tratada, de modo a ajustar a operação e corroborar sua eficiência antes da implantação do sistema de recarga artificial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIERSCH H-JG, KOLDITZ O. Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances Water Resources*. 2002, p. 899–944.
- HIDROPLAN. Avaliação Hidrogeológica e Avaliação do Risco de Contaminação Salina e Orgânica do Aquífero dos Ingleses, Florianópolis-SC. CASAN_LT150616_CCLJ_1032_GAS. 278p. 2016.
- SREEKANTH, J., DATTA, B. Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using genetic programming and modular neural network based surrogate models. *J. Hydrol.* 393, 245–256, 2010.