

MODELAGEM NUMÉRICA PARA A AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E DA INTRUSÃO DE CUNHA SALINA PARA A CAPTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA LAGOA DO PERI

Sophia Cavalcante Varela ¹, Nilson Guiguer Júnior ², Lauro Zanatta ³, Christian Milanez Preis ⁴

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

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

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

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n.
Florianópolis (SC). christianpreis@gmail.com.

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

INTRODUÇÃO

A água doce armazenada em aquíferos costeiros é particularmente suscetível à degradação devido à sua proximidade com a água do mar em combinação com as altas demandas de água, em função da crescente densidade populacional das zonas costeiras (WERNER et al., 2013). Os principais efeitos prejudiciais da intrusão de cunha salina são a redução no volume de armazenamento de água doce disponível e a contaminação dos poços de produção.

Na lagoa do Peri, atualmente capta-se a água superficial para abastecimento público após tratamento. No entanto, devido à presença de altas concentrações de cianobactérias, ocorre a colmatação excessiva dos filtros da Estação de Tratamento de Água (ETA), o que acarreta em elevados custos de manutenção. Desse modo, a captação de água subterrânea surge como uma alternativa para otimizar o sistema de tratamento, uma vez que promove o processo de filtração em margem, diminuindo a concentração de cianobactérias em até 100% (PROSAB, 2006). Contudo, o aquífero costeiro da lagoa do Peri oferece risco de intrusão de cunha salina, visto que, além de ser relativamente pouco espesso, com uma espessura máxima de 40 m, é também estreito, o que torna inevitável a locação dos poços próximos ao mar. Na faixa de areia mais estreita, a lagoa está apenas a 290 m da costa.

Nesse contexto se insere o presente estudo, que teve por objetivo avaliar a disponibilidade hídrica e a intrusão de cunha salina a partir da captação de água subterrânea na lagoa do Peri, na Ilha de Santa Catarina, de modo a determinar a vazão ótima e o melhor cenário de exploração do aquífero, em termos da locação dos poços. Para isso, foi realizada a modelagem numérica de fluxo com o *software* Visual MODFLOW Classic e a avaliação da intrusão de cunha salina com o pacote SEAWAT.

ELABORAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A área modelada compreende a região onde se encontra a lagoa do Peri, em Florianópolis – SC, com uma área de 9,97 km². O aquífero sedimentar é composto majoritariamente por depósitos marinho praias, recobertos ou não por dunas e depósitos eólicos. Com menor representatividade, estão presentes também as formações de depósitos paludiais e depósitos lagunares praias.

O modelo conceitual foi realizado com base nos dados geológicos e hidrogeológicos da área de estudo. A lagoa do Peri é cercada a norte e a sul por uma camada geológica de granito e, portanto, essas regiões foram consideradas impermeáveis. Além disso, foi assumida a condição de impermeabilidade por simetria da lagoa e, portanto, foi necessário considerar apenas a sua porção leste. Por fim, na região entre a

lagoa e o oceano, foram consideradas as linhas de fluxo em direção ao oceano, perpendiculares à linha de costa. As porções além dessas linhas não interferem no modelo, logo foram consideradas como células inativas.

O domínio foi subdividido em uma malha de 40 linhas e 60 colunas na horizontal, sendo que a região dos poços de bombeamento alocados para os cenários de exploração tiveram um refinamento maior. Nesta área mais refinada, a malha apresentou cerca de 8 m de espaçamento horizontal entre as células, com formato próximo ao quadrado, adequado para a realização da modelagem. Além disso, para a definição do modelo, considerou-se 10 camadas verticais (*layers*) com cerca de 4 m de espessura cada, suficiente para apresentar uma boa resolução vertical das velocidades. O modelo, portanto, teve um total de 24.000 células para a área de cerca de 10 Km².

As condições de contorno foram delimitadas a partir da análise do modelo conceitual da área de estudo. A lagoa do Peri foi inserida como um corpo hídrico de carga constante, condição de contorno tipo 1 ou *Dirichlet* (carga especificada). A carga hidráulica atribuída inicialmente foi de 0,5 m. O oceano, por sua vez, também foi inserido com a condição de contorno tipo 1, ou de *Dirichlet*, sendo um corpo de carga constante de 0 m. O curso d'água que conecta a lagoa ao mar, conhecido como canal Sangradouro, foi considerado como uma condição de contorno tipo 3, ou de *Cauchy*. O canal Sangradouro foi inserido como dreno, com uma condutância média de 100 m²/dia, e com uma elevação variando entre 0,25 e 0,5m.

Foram inseridos os dois poços de observação existentes na região de estudo: o Piezômetro da ETA – PZ1, próximo ao mar, e o poço de bombeamento denominado Poço, próximo à lagoa. A partir da análise dos dados geológicos e do perfil dos poços, definiu-se o limite do modelo a uma profundidade de 43 m, onde foi considerado o topo da camada rochosa, limite da escavação do PZ1. Os testes de bombeamento no PZ1 e no Poço foram realizados em abril de 2017 pela CASAN.

A interpretação dos testes se deu por meio do *software* AquiferTest, segundo os métodos de Neuman, Theis & Jacob e Theis. A partir das análises foram obtidos valores de condutividade hidráulica ($K_x = K_y$). O K_z foi definido inicialmente como 20% do $K_x = K_y$, em função da presença da camada de argila no solo. A porosidade adotada foi de 20%.

A partir desses resultados, foram inseridas duas zonas com condutividades distintas: a zona 1, próxima à lagoa, com a condutividade menor, representada pelos valores obtidos nos testes de bombeamento para o Poço, e a zona 2, próxima ao mar, com a condutividade um pouco mais significativa, referente a presença de areia mais grossa, característica da região costeira, com os valores definidos no teste de bombeamento do PZ1.

A média anual de precipitação para o período analisado, entre 2007 e 2016, da estação de código 2748006, foi de 1888 mm. A recarga foi incluída como um parâmetro de calibração. Considerou-se uma estimativa de 40% da precipitação, resultando em 755 mm/ano. Esse resultado vai ao encontro de valores obtidos em um estudo realizado pela CASAN do manancial subterrâneo da costa leste do Campeche, área próxima e de características similares.

A calibração do modelo foi realizada utilizando o pacote *Parameters Estimation* – PEST, do Visual MODFLOW Classic. Por meio do PEST, foi obtida uma excelente calibração, com a média de resíduos de apenas 0,003 m, com valor eficaz, ou RMS, de apenas 0,147 % e com um coeficiente de correlação de 1. A facilidade na calibração, no entanto, pode ser resultado da baixa disponibilidade de dados da região de estudo, uma vez que existem apenas dois poços de observação. A Tabela 1 apresenta o valor dos parâmetros hidrodinâmicos e recarga após a calibração.

Tabela 1. Parâmetros Calibrados pela Ferramenta PEST

Zona	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)	Recarga (mm/ano)
1	$5,51 \cdot 10^{-6}$	$5,51 \cdot 10^{-6}$	$9,91 \cdot 10^{-7}$	792,75
2	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$4,06 \cdot 10^{-6}$	

Como a variação dos valores calibrados foi menor do que uma ordem de grandeza em relação aos valores obtidos pela análise dos testes de bombeamento, foi considerada uma calibração adequada do

modelo, uma vez que os valores estão dentro do intervalo de variabilidade esperado. No entanto, cabe ressaltar que os valores dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos por meio dos testes de bombeamento apresentam um significativo nível de incerteza, uma vez que os testes foram realizados por curtos períodos de tempo e apresentaram algumas medições dissonantes que tiveram de ser excluídas da análise dos resultados.

SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS E RESULTADOS

Em um primeiro momento, foi realizada uma avaliação de modo a verificar a vazão máxima de exploração de um único poço no aquífero, da qual concluiu-se que cada poço suporta uma vazão máxima de 15 m³/h, ou 4,17 L/s. Após a realização de diferentes simulações, foi definida a quantidade máxima de 15 poços, totalizando 62,5 L/s. O número de poços foi definido a partir do modelo de fluxo, com base nas possibilidades de localização espacial, considerando o cone de rebaixamento gerado por cada poço e possível sobreposição entre eles. Com base no número de poços e vazão definidos, foram elaborados diferentes cenários, com distintas disposições espaciais dos poços, de modo a avaliar a sensibilidade do modelo à locação destes.

Para a avaliação da intrusão de cunha salina, foi utilizado o pacote SEAWAT, com a realização da modelagem em regime transiente. Para isso, foi necessário alterar a carga constante de cada camada do modelo referente ao oceano, para a carga hidráulica equivalente de água doce. Por fim, foi adicionada a condição de contorno de salinidade constante nas células referentes ao oceano para o valor de 35.000 mg/L, respectivo à salinidade da água do mar.

Cabe ressaltar que para essas simulações foi avaliada a situação atual de nível da lagoa, que considera a construção de um barramento no Canal Sangradouro, o qual elevou o nível da lagoa para 3,0 m. Portanto, a condição de contorno da lagoa foi alterada para a realização dessas simulações. Em função disso, foi necessário também alterar a elevação do dreno para a interpolação entre os valores de 3,0 m e 0,25 m.

Antes de executar os cenários, foi necessário simular a posição de estabilidade da cunha salina para a situação anterior ao bombeamento. Para tanto, o modelo foi executado com as características supracitadas e sem a alocação de nenhum poço de bombeamento até a estabilização da cunha salina, sendo necessários 700 anos de simulação.

O Cenário II.2 apresentou resultados promissores quanto a intrusão de cunha salina, como ilustra a Figura 1. De acordo com os resultados obtidos pelo modelo, para esse cenário de exploração com 15 poços e uma vazão individual de 15 m³/h, não houve um aumento significativo na intrusão de cunha salina. O aumento máximo foi de aproximadamente 25 m. Em todas as áreas da faixa litorânea, o aumento da cunha teve a mesma magnitude, permanecendo contida nos primeiros metros do aquífero e distante da lagoa. Esses resultados indicaram, portanto, o Cenário II.2 como um cenário viável de exploração do aquífero.

Por esse cenário ter sido considerado viável, foi feita uma análise das linhas de trajetória de partículas. Ao comparar esse resultado com a intrusão de cunha salina, foi averiguado que no poço de bombeamento próximo à ETA, a distância entre as linhas de trajetória de partícula e da cunha salina foi de aproximadamente 187 m, enquanto no poço da região central do aquífero, a distância foi de 167 m. Esse resultado mostra que, apesar desse cenário de exploração apresentar uma distância considerável entre as linhas de trajetórias de partícula e a cunha salina, o poço capta partículas a uma distância bastante significativa, de até 312 m.

O Cenário II.3 também considerou 15 poços com uma vazão individual de 15 m³/h, mas foram alocados mais próximos à ETA. Os resultados apontaram que a cunha salina ou a zona de transição entre a água salobra e água doce alcançou 4 dos 15 poços de bombeamento, como se pode observar pela Figura 2. A área mais crítica apontou um avanço da intrusão da cunha salina de aproximadamente 410 m, localizada nos poços alocados na faixa de areia mais estreita da região de estudo.

Em função desses resultados, é possível observar que há uma grande sensibilidade em relação à alocação dos poços. Isso pode ser concluído uma vez que foram justamente os poços alterados do Cenário

II.2 para a região próxima à ETA no Cenário II.3, onde a faixa de terra é mais estreita, que causaram a intrusão de cunha salina.

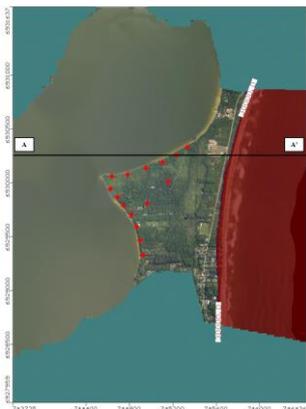


Figura 1 - Intrusão de cunha salina (mg/L) para o Cenário II.2, na última camada do modelo

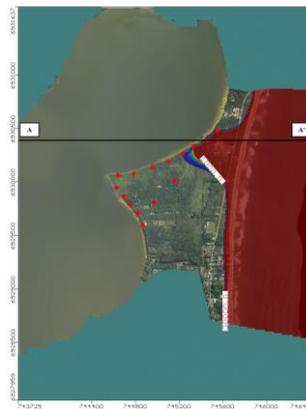


Figura 2 - Intrusão de cunha salina (mg/L) para o Cenário II.3, na última camada do modelo.

A partir do Cenário II.3, portanto, conclui-se que, segundo os dados inseridos na modelagem e resultados obtidos, para essa vazão de exploração não se deve alocar poços de bombeamento na região próxima à ETA devido ao alto risco de provocar o aumento da intrusão de cunha salina, apesar de ser um cenário mais vantajoso do ponto de vista financeiro.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados, foi identificada a viabilidade do Cenário II.2 para a vazão máxima de exploração de 62,5 L/s, sendo alocados 15 poços com a vazão de 4,2L/s ou 15m³/h em cada poço. Um aumento da vazão de exploração mostrou-se inviável do ponto de vista da demanda hídrica, uma vez que era necessário alocar poços na porção central do aquífero.

O cenário viável, II.2, apresentou um avanço da intrusão de cunha salina de apenas 25 m, enquanto o cenário II.3, com diferente configuração de locação dos poços, levou à uma intrusão de cunha salina de até 410 m. Dessa forma, foi possível concluir que a intrusão de cunha salina também é sensível à locação e distribuição espacial dos poços de bombeamento. Os resultados evidenciaram que a locação dos poços na porção norte do aquífero, onde a faixa de terra é mais estreita (próximo à ETA), deve ser evitada, visto que essa região apresenta um alto risco quanto à intrusão de cunha salina, por estar muito próxima ao mar.

Visando a diminuição do grau de incerteza do modelo, são sugeridas algumas recomendações, principalmente voltadas para a obtenção de mais dados de campo, como a instalação de mais poços de monitoramento de nível e a realização de mais testes de bombeamento, para permitir uma calibração mais representativa, além da validação do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PÁDUA, Valter Lúcio de. Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano. Belo Horizonte: PROSAB, 2006.

VARELA, Sophia Cavalcante. Modelagem Numérica para a Avaliação da Disponibilidade Hídrica e da Intrusão de Cunha Salina para a Captação de Águas Subterrâneas na Lagoa do Peri. 2017. 176 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

WERNER, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances In Water Resources*, [s.l.], v. 51, n. 000, p.3-26, 26 mar. 2013.