

## Filtração em margem: avaliação hidráulica da região da lagoa do Peri (SC) utilizando Processing Modflow

Este estudo tem como objetivo a avaliação da Lagoa do Peri como local potencial de implantação da técnica da filtração em margem (FM) em escala real. Baseado em estudo hidrogeológico preliminar anterior, um modelo matemático de águas subterrâneas (Processing MODFLOW) foi utilizado para criar cenários para simular diferentes taxas de bombeamento (100 e 200 L s<sup>-1</sup>) na potencial área de captação. Em paralelo, o nível de água na lagoa e do canal também foi alterado, simulando diferentes condições hidráulicas na área de estudo. Sob condições hidráulicas naturais a Lagoa do Peri age como um corpo hídrico influente. O canal Sangradouro é alimentado não somente pela lagoa, mas também pela exfiltração de água subterrânea. Quando uma taxa de bombeamento de 100 L s<sup>-1</sup> é simulada, rebaixamentos de 0,75 m.a.n.m e -1,25 m.a.n.m. são observados sob a melhor e pior condições hidráulicas na lagoa, respectivamente. Já quando uma taxa de bombeamento de 200 L s<sup>-1</sup> é simulada, são observados rebaixamentos de -1,50 m.a.n.m sob a melhor condição hidráulica, e -4,0 m.a.n.m. sob a pior condição hidráulica. Em ambos os cenários as taxas de infiltração na lagoa e no canal permaneceram em níveis sustentáveis do ponto de vista do potencial colmatativo por forças hidrodinâmicas.

**Palavras-chave:** Lagoa do Peri; Filtração em margem em lago; Processing Modflow.

## Bank filtration: hydraulic evaluation of Peri lake (SC) by using Processing Modflow

This study has the aim of evaluating the Peri Lake as a potential bank filtration (BF) site. Based on a previous hydrogeological field investigations in the area, a groundwater modelling (Processing MODFLOW) was used to simulated different pumping rates at different hydraulic conditions in the potential catchment area of the lake. Under natural hydraulic conditions, Peri Lake behaves as losing water body. Sangradouro channel is fed not only by the lake, but also by the aquifer. When a pumping rate of 100 L s<sup>-1</sup> is simulated, drawdowns of 0,75 m.a.s.l. and -1,25 m.u.s.l. were observed under the best and worst hydraulic conditions in the lake and channel, respectively. When a pumping rate of 200 L s<sup>-1</sup> is simulated drawdowns reached -1,50 m.u.s.l. under the best hydraulic conditions, and -4,0 m.u.s.l. under the worst hydraulic condition. In both scenarios infiltration rates at the bank of the lake and in the channel remained at sustainable levels, in the view of clogging caused by hydrodynamics forces.

**Keywords:** Peri Lake; Lake bank filtration; Processing Modflow.

Topic: Engenharia de Recursos Hídricos

Received: 03/08/2021

Approved: 26/08/2021

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Marcus Soares   
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil  
<http://orcid.org/0000-0002-0857-707X>  
[marcus.soares@ufsm.br](mailto:marcus.soares@ufsm.br)

Bruno Segalla Pizzolatti   
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5026793745274166>  
<http://orcid.org/0000-0002-2765-7040>  
[brunosegalla@me.com](mailto:brunosegalla@me.com)

Maurício Luiz Sens   
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2716722402903786>  
<http://orcid.org/0000-0001-5013-4267>  
[mauricio.sens@ufsc.br](mailto:mauricio.sens@ufsc.br)

Andressa Gabriela Glusczak   
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9222533578329059>  
<http://orcid.org/0000-0001-6431-0049>  
[andressag.g@hotmail.com](mailto:andressag.g@hotmail.com)

Tiago Onuczak Poncio   
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/6890229661150979>  
<http://orcid.org/0000-0002-6567-4060>  
[tiagoponcio01@gmail.com](mailto:tiagoponcio01@gmail.com)



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0018

### Referencing this:

SOARES, M.; PIZZOLATTI, B. S.; SENS, M. L.; GLUSCZAK, A. G.; PONCIO, T. O.. Filtração em margem: avaliação hidráulica da região da lagoa do Peri (SC) utilizando Processing Modflow. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.184-197, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0018>

## INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento econômico do Brasil nos últimos anos trouxe, também, consequências. O avanço na degradação das águas superficiais e o aumento considerável no consumo de água para abastecimento, são alguns dos efeitos imediatos. Por essa razão, dependendo da qualidade da água superficial, os sistemas de tratamento de água adicionam diversas etapas de tratamento tais como coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Sistemas de pré e pós-tratamento são algumas vezes, também considerados para garantir a qualidade da água para a população abastecida, elevando ainda mais o preço da mesma. Mudanças nos sistemas naturais podem causar o crescimento de algas em águas superficiais. Como consequência, os custos operacionais de sistemas de tratamento de água tendem também a aumentar, devido ao incremento de produtos químicos em algumas fases do tratamento, e da diminuição das carreiras de filtração. Assim, a busca contínua pelo melhoramento da qualidade da água servida a população, faz com que as estações de tratamento de água no Brasil busquem sistemas alternativos/complementares de baixo custo.

Uma técnica alternativa de tratamento de água de baixo custo e sustentável é a filtração em margem (FM). Por mais de 140 anos esta técnica vem sendo utilizada em lagos europeus, tais como Tegel (GUNKEL et al., 2009) e Wannsee (MASSMANN et al., 2008), e rios europeus, tais como Danúbio (MALOSZEWSKI et al., 1990), Reno (STUYFZAND et al., 2006; SCHUBERT, 2002) e Elba (GRISCHEK et al., 2010). Países em desenvolvimento como Brasil, Índia, Egito e Tailândia também têm estudado largamente esta técnica, com o objetivo de assegurar a quantidade e qualidade da água servida à população (GUEDES et al., 2019; RABELO, 2006; SENS et al., 2007; SHAMRUKH et al., 2008; DASH et al., 2008; FREITAS et al., 2012; ROMERO, 2012).

Em termos gerais, a filtração em margem consiste na instalação de poços ao longo das margens de rios e lagos, de onde se capta água subterrânea, também chamada de água filtrada em margem. A extração de água nos poços causa um rebaixamento do lençol freático local e, conseqüentemente, a formação de um cone de depressão. Assim, a diferença de altura hidráulica entre o manancial superficial e o rebaixamento faz com que a água seja induzida a escoar do manancial superficial para a galeria de poços. O escoamento da água pelos sedimentos do aquífero, faz com que ocorra a remoção de contaminantes físicos, químicos e microbiológicos contidos no manancial funcionando como uma filtração natural (GRISCHEK et al., 1998; PATINOUDI et al., 2007; RAY et al., 2008; DASH et al., 2008).

Entretanto, alguns autores destacam que a performance e o sucesso deste sistema de tratamento dependem da capacidade de indução de água no aquífero, da qualidade da água superficial, das características geológicas do sedimento local, e da variação de vazão no caso de rios (RAY et al. 2002; HUBBS, 2006; GRISCHEK et al., 2010). De acordo com Ray et al. (2002) e Hiscock et al. (2002), um estudo hidrogeológico do local é essencial para decidir como e onde construir poços de produção, de modo que se obtenha a melhor performance do sistema. Existem diversas técnicas disponíveis para determinar taxas de infiltração de águas superficiais em águas subterrâneas que deveriam ser utilizadas também em estudos hidrogeológicos envolvendo filtração em margem (SOARES et al., 2012). Além disso, Grischek et al. (2010)

destacou a importância da utilização de modelos matemáticos de simulação de movimento de água subterrânea, para o melhor entendimento da dinâmica hidráulica do aquífero no local de estudo.

Uma reconhecida limitação da filtração em margem é a colmatação do sedimento das margens, causada pela percolação contínua da água superficial (HUBBS, 2006; SCHUBERT, 2006), da qual é carregada de partículas inorgânicas e orgânicas em suspensão. A redução do espaço poroso (colmatação) pode ser ocasionada por partículas inorgânicas (colmatação física) (HUBBS, 2010; SOARES, 2015), devido ao aprisionamento de bolhas de gás entre os grãos causado pelo processo de desnitrificação ou metanogênese (colmatação mecânica) (BREUKELEN et al., 2003; FORTUIN et al., 2005), por partículas orgânicas em suspensão (colmatação biológica) (SOARES, 2015; HOFFMANN et al., 2010; BAVEYE et al., 1998) e pelas mudanças das condições redox, pH e temperatura nas áreas de infiltração (HOFFMANN et al., 2010; SOARES, 2015).

O objetivo deste estudo foi avaliar o manancial da Lagoa do Peri como potencial local de implantação de um sistema de filtração em margem, e foi baseado na coleta em campo de dados hidrogeológicos preliminares da área de estudo (SOARES et al., 2019). Assim, baseada em tal estudo, foram consideradas alterações das condições hidráulicas do aquífero, em função de diferentes taxas de bombeamento de poços de produção em uma definida área de captação, utilizando o software Processing MODFLOW. Diversos cenários foram criados simulando alterações no nível freático durante condições naturais e de bombeamento de água subterrânea na área de captação, com o objetivando avaliar a sustentabilidade hidráulica do sistema.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Área de estudo**

O manancial da Lagoa do Peri está situado na costa sudeste da ilha de Florianópolis, dentro de um parque municipal. Suas coordenadas geográficas são entre 27°42'59" e 27°46'45" de latitude oeste, e 48°30'33"S e 48°31'59"S de longitude sul. A lagoa possui uma área molhada de 5,07 km<sup>2</sup>, e está inserida em uma bacia hidrográfica de 20,3 km<sup>2</sup> de extensão, aproximadamente. NEMAR (1999) destacou que a lagoa está 3 m acima do nível do mar. A lagoa ainda possui dois tributários: o Ribeirão Grande e o Cachoeira Grande (LAUDARES-SILVA, 1999) (Figura 1). De acordo com Simonassi (2001), o manancial possui uma profundidade média de 4,2 m, sendo que sua parte mais profunda atinge 11 m de profundidade, e um volume de água estimado em 21,2 milhões de m<sup>3</sup>.

A parte oeste da lagoa é formada por embasamento cristalino, composta por rochas graníticas intrusivas, e a parte leste é constituída por depósitos marinhos (OLIVEIRA, 2002; SANTOS et al., 1989), formada no período do Holoceno e o Pleistoceno, segundo Zanini et al. (1997, citado por OLIVEIRA, 2002). O canal Sangradouro conecta a lagoa ao oceano, e possui comprimento de 3,5 km, 6,7 m de largura e 0,90 m de profundidade, aproximadamente (SOARES et al., 2019; NEMAR, 1999). A vazão de escoamento no canal pode chegar a 730 L s<sup>-1</sup> quando a lagoa está cheia (SOARES et al., 2019), possuindo vazão média de 106 L s<sup>-1</sup>, de acordo com Marimon (1994, citado por SIMONASSI, 2001), além de possuir declividade de 0,04% (Soares

et al., 2019). Não há registros na literatura de intrusão de água salina na lagoa. Um dique foi construído na entrada do canal Sangradouro para assegurar que o nível da lagoa fique acima do nível do mar, bem como para controlar a vazão do mesmo.

A Lagoa do Peri é responsável por abastecer o sul e leste da ilha de Florianópolis. A mesma sempre apresentou bons padrões de qualidade da água, entretanto, meses após a construção da estação de tratamento de água (ETA) no local, um sensível aumento na concentração de algas cianobactérias na água foi observado (MONDARDO, 2004). Como consequência, uma rápida colmatção dos filtros da ETA ocorre, reduzindo as carreiras de filtração. Assim, a técnica da filtração em margem pode auxiliar no tratamento atual.

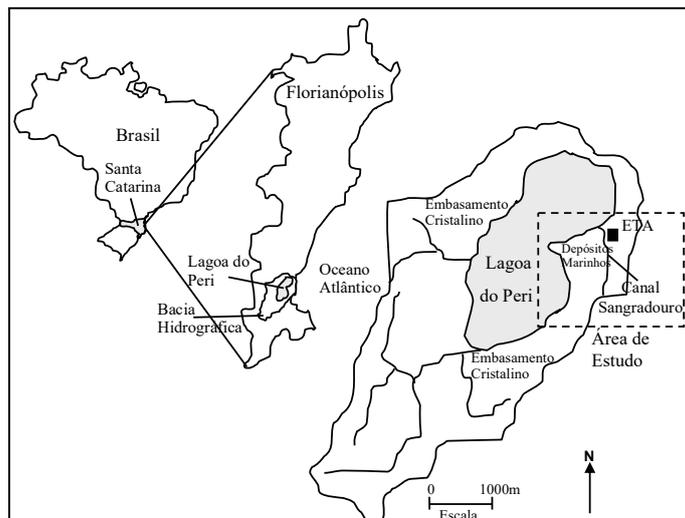


Figura 1: Localização da Lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Soares et al. (2019).

### Descrição do modelo matemático

O modelo de fluxo de águas subterrâneas (Processing MODFLOW versão 5.3.0) foi desenvolvido baseado nos experimentos de campo, e dados obtidos da literatura (CHIANG et al., 2001). O domínio do modelo é apresentado na Figura 2.

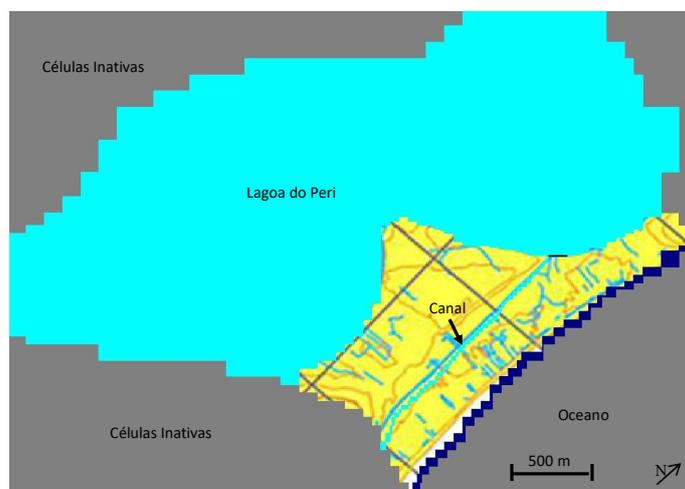


Figura 2: Domínio do modelo.

O oceano foi assumido e simulado como nível constante (condição de contorno de Dirichlet). A superfície do modelo (fonte de recarga), o fundo do aquífero (sem movimento de água), a formação granítica

(sem movimento de água) e os poços de produção foram definidos como fluxo constante (condição de contorno de Neumann). Para a simulação da colmatação, as células do lago e do canal foram definidas como condição de contorno de Cauchy (Tabela 1).

**Tabela 1:** Representação dos elementos do modelo matemático.

Elemento	Interno/Externo	Tipo de Condição de Contorno
Lagoa do Peri		
Canal Sangradouro	Interna	Cauchy (3 <sup>rd</sup> Tipo)
Oceano	Externa	Dirichlet (1 <sup>st</sup> Tipo)
Superfície do modelo		
Formação granítica		
Fundo do aquífero	Externa	Neumann (2 <sup>nd</sup> Tipo)
Fonte de Recarga		
Poços de Produção	Interna	Neumann (2 <sup>nd</sup> Tipo)

O modelo foi dividido em quatro camadas representando um aquífero livre com uma espessura total de 20 m. Foi aplicado ao modelo uma discretização detalhada com células de aproximadamente 12,5 m<sup>2</sup>, principalmente próximo à galeria de poços. Foram simulados 9 diferentes cenários. Nos três primeiros cenários foram simulados movimentos de água subterrânea sob condições hidráulicas naturais (sem o uso de poços). Em outros três cenários (4<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup>, 6<sup>o</sup>) foram introduzidos 10 poços de produção com uma taxa de captação de 100 L s<sup>-1</sup>. Os cenários 7<sup>o</sup>, 8<sup>o</sup> e 9<sup>o</sup> os 10 poços de produção simularam uma taxa de captação de 200 L s<sup>-1</sup>. Baseado nos estudos de Romero (2012) e Soares (2015), todos os cenários apontados simularam simultaneamente diferentes níveis hidráulicos na lagoa e no canal, da seguinte forma: melhor condição hidráulica (lagoa à 2,5 m.a.n.m; entrada do canal à 2,1 m.a.n.m; canal 1,9 m de profundidade), condição hidráulica intermediária (lagoa à 1,5 m.a.n.m; entrada do canal 1,1 m.a.n.m; canal 0,9 m de profundidade), pior condição hidráulica (lagoa à 0,8 m.a.n.m; entrada do canal à 0,4 m.a.n.m; canal 0,2 m de profundidade). Para todos os cenários foram considerados estado estacionário e uma taxa de recarga de 3,17x10<sup>-9</sup> m s<sup>-1</sup>. Foi aplicada ainda no sedimento do aquífero um valor de condutividade hidráulica horizontal de 1x10<sup>-4</sup> m s<sup>-1</sup>, e uma condutividade hidráulica vertical de 1x10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup> (SOARES, 2019). A porosidade efetiva utilizada foi de 0,25 (ROMERO, 2012) (Tabela 2). De acordo com o experimento de campo, a declividade do canal foi assumida como constante de 0,04% (SOARES, 2019). Para simplificar o modelo, foi utilizada a mesma densidade da água para o oceano e o aquífero.

**Tabela 2:** Principais elementos do modelo.

Parâmetro	Características
Geometria	G
Cenários	- Cenário I - III: Condições naturais (sem captação) - Cenário IV- VI: taxa de captação - 100 L s <sup>-1</sup> - Cenário VII - IX: taxa de captação - 200 L s <sup>-1</sup>
Aquífero	Livre, Kh = 1x10 <sup>-4</sup> m s <sup>-1</sup> , Kv = 1x10 <sup>-5</sup> m s <sup>-1</sup> Porosidade efetiva: 0,25 Espessura: 20 m; Posição do "Aquadard": -18 m.a.n.m

Com o objetivo de estudar as variações das taxas de infiltração no leito da lagoa e do canal sob condições naturais e durante a captação, foram criadas 97 e 25 zonas nas margens da lagoa e do canal, respectivamente (Figura 3 e Figura 4), pois altas taxas de filtração podem conduzir à colmatação do

sedimento durante a captação por filtração em margem (SOARES, 2015). As taxas de infiltração puderam ser calculadas para cada zona separadamente com o uso do pacote Water Budget do modelo matemático.

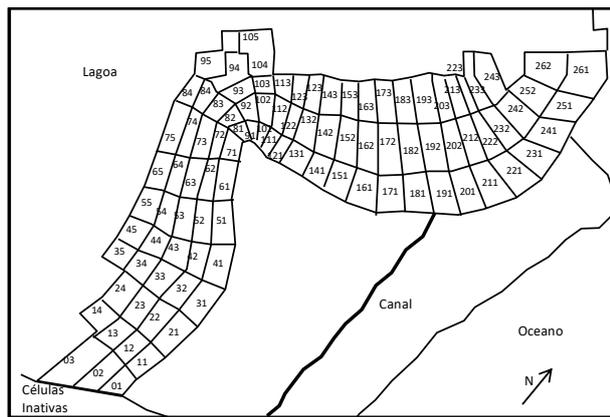


Figura 3: Zonas estudadas na lagoa.

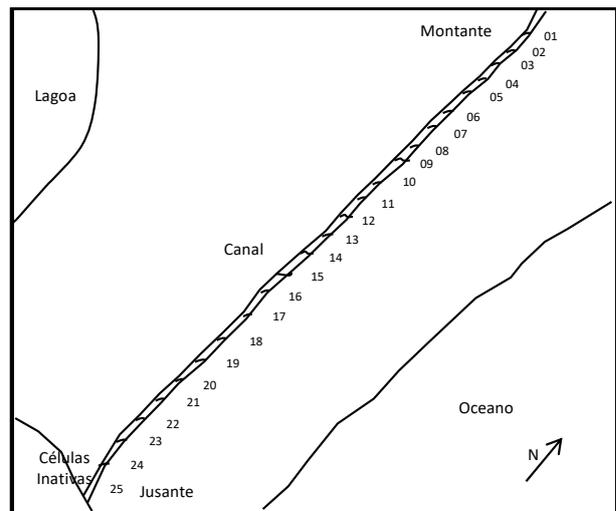


Figura 4: Zonas estudadas no canal.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Calibração e limitações do modelo

Para uma calibração confiável do modelo, uma quantidade suficiente de dados precisam estar disponível cobrindo, idealmente, todas as condições naturais relevantes da área à ser modelada. Neste caso particular, entretanto, os 11 poços de observação utilizados para monitorar o nível do lençol freático local, estão concentrados em uma área menor que 0.5% da área de captação total (Figura 3) (ROMERO, 2012).

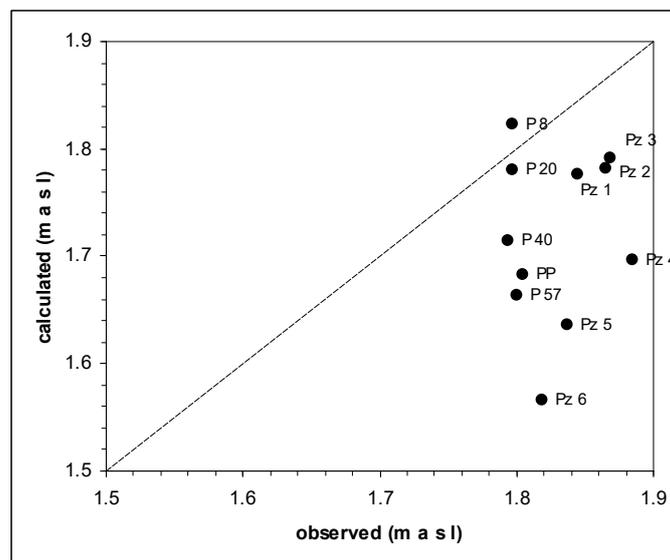


Figura 5: Níveis freáticos medidos e calculados.

A dificuldade de acesso e a segurança dificultam uma melhor distribuição espacial de piezômetros na área. Sendo assim, a comparação entre o nível freático calculado e medido em campo pode oferecer informações confiáveis sobre a qualidade do modelo, apenas sobre uma extensão limitada da área. Uma outra limitação do modelo está na utilização dos dados do nível freático de piezômetros antigos. A falta de

selo hídrico em alguns piezômetros pode ocasionar respostas hidráulicas rápidas quando há eventos de chuva, que pode levar, conseqüentemente, à valores de nível freático que desviam dos níveis freáticos dos piezômetros novos. Para melhor demonstrar a discrepância, a Figura 5 demonstra a comparação entre os valores de nível freático calculados e medidos.

## Modelagem do fluxo hídrico subterrâneo

### Condições hidráulicas naturais

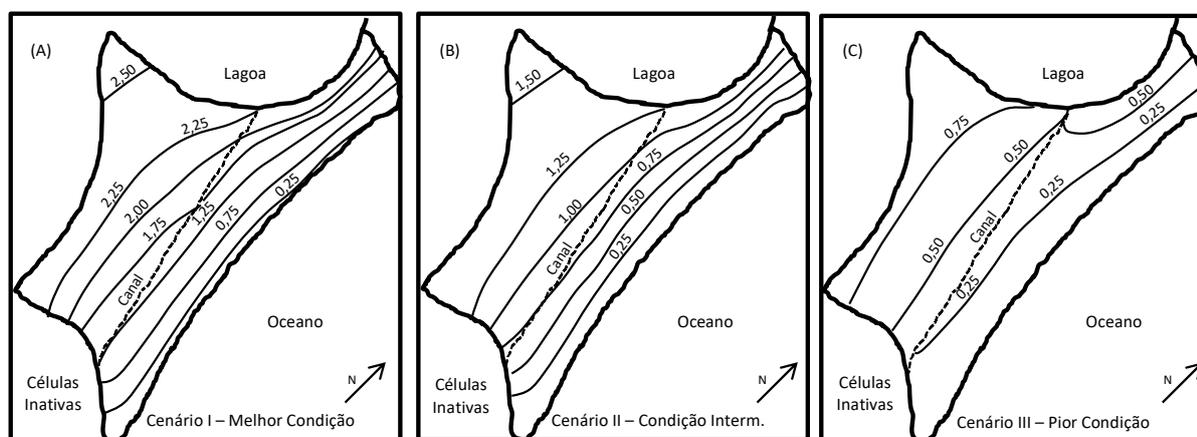
Das 97 zonas criadas na lagoa, as 14 zonas mais próximas da área captação foram definitivamente estudadas, pois não foram observadas alterações significativas nas zonas adjacentes. Todas as 25 zonas criadas no canal foram intensivamente estudadas, com o objetivo de entender a sua capacidade de servir como barreira hidráulica natural entre a lagoa, a área de captação e o oceano.

*Cenário I - Melhor Condição Hidráulica:* Sob condições hidráulicas naturais (sem captação de água subterrânea), em todos os cenários a lagoa abastece o aquífero. A água subterrânea escoar em direção ao oceano, devido a sua maior elevação natural em comparação ao oceano (Figura 6A, B e C). Quando está com nível de água elevado (melhor condição), a água da lagoa escoar sobre a barragem, como resultado, o canal se comporta com o corpo hídrico influente quase como um todo, contribuindo assim para a recarga do aquífero (Figura 6A). Pequenas zonas de exfiltração podem ser observadas próximas a barragem, devido a diferença de gradiente hidráulico entre a lagoa e o canal. As taxas de infiltração no canal variaram de -6.3 a -7.4 logs ( $5.5E-7 - 3.8E-8 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 8A canal). Neste cenário, as taxas de infiltração nas zonas estudadas da lagoa variaram de -7.0 a -9.1 logs ( $1.0E-7 - 7.8E-10 \text{ m s}^{-1}$ ), também mostrando zonas de exfiltração devido à recarga do aquífero provinda da precipitação anual (Figura 9A lagoa).

*Cenário II - Condição Hidráulica Intermediária:* Uma diminuição do nível de água na lagoa (condição intermediária) impacta o fluxo de água subterrânea próximo ao canal (Figura 6B). Neste caso há um aumento das zonas de exfiltração ao longo do canal próximo da barragem (Figura 8B canal). Assim, o canal é alimentado não só pela lagoa, mas também pelo lençol freático nos seus primeiros metros. Além do mais, em algumas zonas as taxas de infiltração reduziram em um fator de aproximadamente 5 em comparação à melhor condição hidráulica. Em geral, as taxas de infiltração variaram de -6.7 a -8.1 logs ( $2.0E-7 - 7.5E-9 \text{ m s}^{-1}$ ), devido à redução do nível de água na lagoa e no canal (Figura 8B canal). Na lagoa as zonas de infiltração ainda prevalecem devido à diferença de gradiente hidráulico com o canal e o oceano. As mesmas variaram de -6.7 a -12.8 logs ( $2.3E-8 - 1.3E-13 \text{ m s}^{-1}$ ), sendo que em algumas zonas variaram até 3 ordens de magnitude menos que na melhor condição hidráulica no cenário I (Figura 9B lagoa).

*Cenário III - Pior Condição Hidráulica:* Durante períodos secos (pior condição hidráulica na lagoa) a interação hidráulica entre o canal e o aquífero é modificada substancialmente. À medida que o nível de água na lagoa diminui, o canal é cada vez mais alimentado pelo aquífero subjacente (Figura 6C). Neste cenário o canal não se comporta mais como um corpo hídrico influente, mas inteiramente como corpo hídrico efluente. Isto ocorre devido as taxas de recarga do aquífero, e às intensas zonas de exfiltração próximo a barragem.

Este cenário explica como funciona a vazão ecológica no canal durante períodos secos, quando pequenos volumes de água deságuam da lagoa para o canal (Figura 8C canal). Na lagoa, nos locais onde a água superficial infiltra (em apenas 5 de 14 zonas), as taxas de infiltração variaram de  $-6.2$  a  $-8.5$  logs ( $4.8E-7$  –  $2.8E-9$   $m\ s^{-1}$ ) (Figura 9C lagoa).



**Figura 6:** Lagoa do Peri sob condições hidráulicas naturais (sem simulação de captação de água subterrânea), durante alto (a), intermediário (b) e baixo (c) nível de água na lagoa (nível de água em m.a.n.m)

### Simulação da captação de água subterrânea

#### Vazão Máxima Bombeada: $100\ L\ s^{-1}$

*Cenário IV – Melhor Condição Hidráulica:* Em simulação sob estado estacionário foi observado um pequeno rebaixamento do nível freático, quando aplicado no modelo uma taxa de captação de  $100\ L\ s^{-1}$ , na melhor condição hidráulica na lagoa (Figura 7A). Neste cenário, alterações do nível freático (rebaixamento) causadas pelo bombeamento chegaram a aproximadamente  $0,75$  m.a.n.m, na área de captação. No meio do canal as taxas de infiltração variaram de  $-5.9$  a  $-6.9$  logs ( $1.1E-6$  –  $1.3E-7$   $m\ s^{-1}$ ). Além do mais, as taxas de exfiltração no canal próximas a barragem reduziram, quando comparada à condição hidráulica natural (sem simulação de captação) (Figura 8A canal). Na lagoa as taxas de infiltração variaram de  $-6.0$  a  $-6.8$  logs ( $9.5E-7$  –  $1.5E-7$   $m\ s^{-1}$ ), e as zonas de exfiltração tornaram-se zonas de infiltração (Figura 9A lagoa).

*Cenário V – Condição Hidráulica Intermediária:* Quando simulada a condição hidráulica intermediária na lagoa, o rebaixamento do lençol freático na área de captação atinge valores de cota altimétrica negativas. Assim, quando a lagoa está à  $1.5$  metros acima do nível do mar, o nível do lençol freático atinge  $-0.25$  m.a.n.m. (Figura 7B). No canal as taxas de infiltração variaram na ordem de  $-6.2$  a  $-7.8$  logs ( $7.0E-7$  –  $3.5E-8$   $m\ s^{-1}$ ), ou seja, aproximadamente uma ordem magnitude maior que na simulação da melhor condição hidráulica na lagoa. Nesta simulação as zonas de exfiltração no canal são também reduzidas significativamente (Figura 8B canal). As taxas de infiltração na lagoa pouco modificaram, permanecendo na ordem de  $-6.0$  a  $-6.8$  logs ( $9.4E-7$  –  $1.5E-7$   $m\ s^{-1}$ ) (Figura 9B lagoa).

*Cenário VI – Pior Condição Hidráulica:* Na simulação sob a pior condição hidráulica na lagoa o nível do lençol freático alcança  $-1.25$  m.a.n.m. na área de captação (Figura 7C). As taxas de infiltração na lagoa continuam variando na ordem de  $-6.0$  a  $-6.8$  logs ( $9.3E-7$  –  $1.4E-7$   $m\ s^{-1}$ ) (Figura 9C lagoa), entretanto, a

recarga do aquífero é direcionada agora à galeria de poços, o que reduz a recarga natural da lagoa pela precipitação. Neste cenário não foram observadas zonas de exfiltração na lagoa. O canal, o qual sob condições hidráulicas naturais (sem captação) na pior condição hidráulica (cenário III), que se comportava como um corpo hídrico efluente, se torna em quase toda a sua totalidade um corpo hídrico influente devido ao bombeamento de água na área de captação. As taxas de infiltração variaram na ordem de -6.3 a -8.1 logs ( $4.4E-7 - 7.9E-9 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 8C canal).

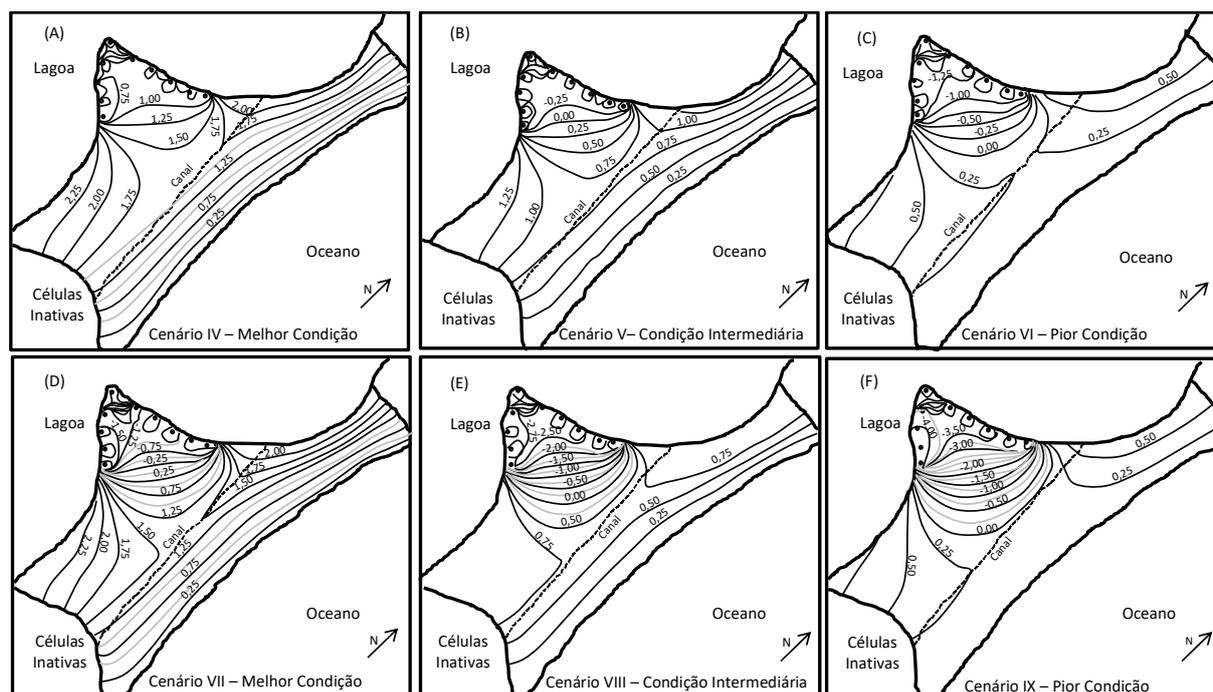
### **Vazão Máxima Bombeada: 200 L s<sup>-1</sup>**

*Cenário VII – Melhor Condição Hidráulica:* Aumentada a quantidade de água abstraída na área de captação (200 L s<sup>-1</sup>), um maior rebaixamento do lençol freático é observado. Sob a melhor condição hidráulica na lagoa, o nível do lençol freático próximo aos poços chegou a -1.50 m.a.n.m. (Figura 7D). As taxas de infiltração no canal variaram na ordem de -5.7 a -6.9 logs ( $1.7E-6 - 1.2E-7 \text{ m s}^{-1}$ ), com uma pequena modificação na direção do fluxo hídrico (exfiltração ao invés de infiltração) no início do canal (Figura 8A canal). Em comparação ao cenário IV (igual nível de água na lagoa e menor quantidade de água captada dos poços) nenhuma alteração relevante das taxas de infiltração no início do canal foi detectada, provavelmente devido a distância entre a entrada do canal e a galeria de poços. Na margem da lagoa as taxas de infiltração variaram na ordem de -5.7 a -6.5 logs ( $1.9E-6 - 2.8E-7 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 9A lagoa), um aumento de aproximadamente uma ordem de magnitude em comparação ao cenário de menor quantidade de água abstraída pelos poços, e mesmo nível de água na lagoa (cenário IV). Em algumas zonas houve também alteração da direção do fluxo hídrico, que tende a reduzir recarga hídrica natural da lagoa pela precipitação (Figura 9A lagoa).

*Cenário VIII – Condição Hidráulica Intermediária:* Sob condições hidráulicas intermediárias na lagoa e uma vazão de bombeamento de 200 L s<sup>-1</sup>, o nível do lençol freático próximo a galeria de poços chegou a -2.75 m.a.n.m. (Figura 7E). As taxas de infiltração no canal variaram de -5.8 a -7.6 logs ( $1.3E-6 - 2.4E-8 \text{ m s}^{-1}$ ), ligeiramente menores que as taxas de infiltração do cenário anterior. Ao mesmo tempo, as zonas de exfiltração neste cenário retraíram no canal (Figura 8B canal). As taxas de infiltração ao longo da margem da lagoa permaneceram quase as mesmas, variando na ordem de -5.7 a -6.5 logs ( $1.8E-6 - 2.8E-7 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 9B lagoa), em comparação ao cenário anterior. Em comparação ao cenário com vazão de captação de 100 L s<sup>-1</sup> e mesmas condições hidráulicas na lagoa, as taxas de infiltração aumentaram aproximadamente duas vezes em alguns pontos, devido à proximidade da galeria de poços. Em outras zonas ocorreram a inversão da direção do fluxo hídrico subterrâneo de exfiltração para infiltração (Figura 9B lagoa).

*Cenário IX – Pior Condição Hidráulica:* Quando a pior condição hidráulica na lagoa é simulada, o nível do lençol freático próximo aos poços chega a -4.0 m.a.n.m. (Figura 7F). Neste cenário as zonas de exfiltração praticamente desaparecem na lagoa. As taxas de infiltração permaneceram como no cenário anterior (de -5.7 a -6.5 logs ou  $1.8E-6$  a  $2.8E-7 \text{ m s}^{-1}$ ) (Figura 9C lagoa). O canal não é mais alimentado pelo aquífero e se torna um corpo hídrico influente, com taxas de infiltração variando na ordem de -5.9 a -7.9 logs ( $1.1E-6 - 1.0E-8 \text{ m s}^{-1}$ ), que representam uma pequena redução em comparação ao cenário anterior, e

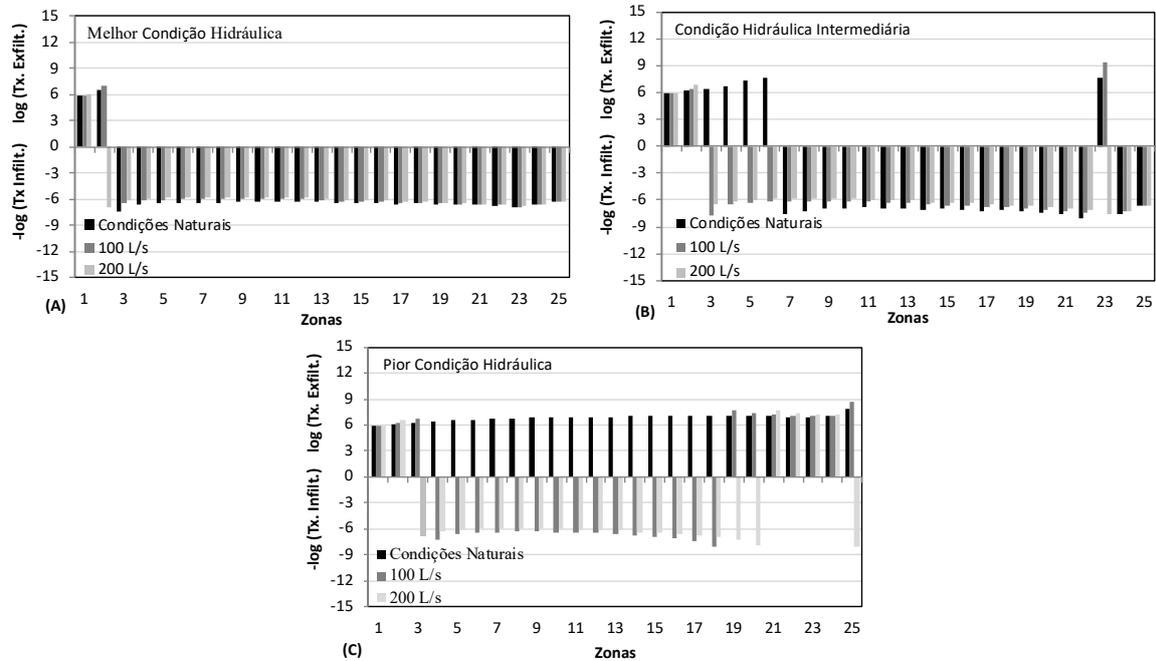
aproximadamente uma ordem de magnitude maior que no cenário de menor volume captado e igual condição hidráulica na lagoa e no canal (Figura 8C canal).



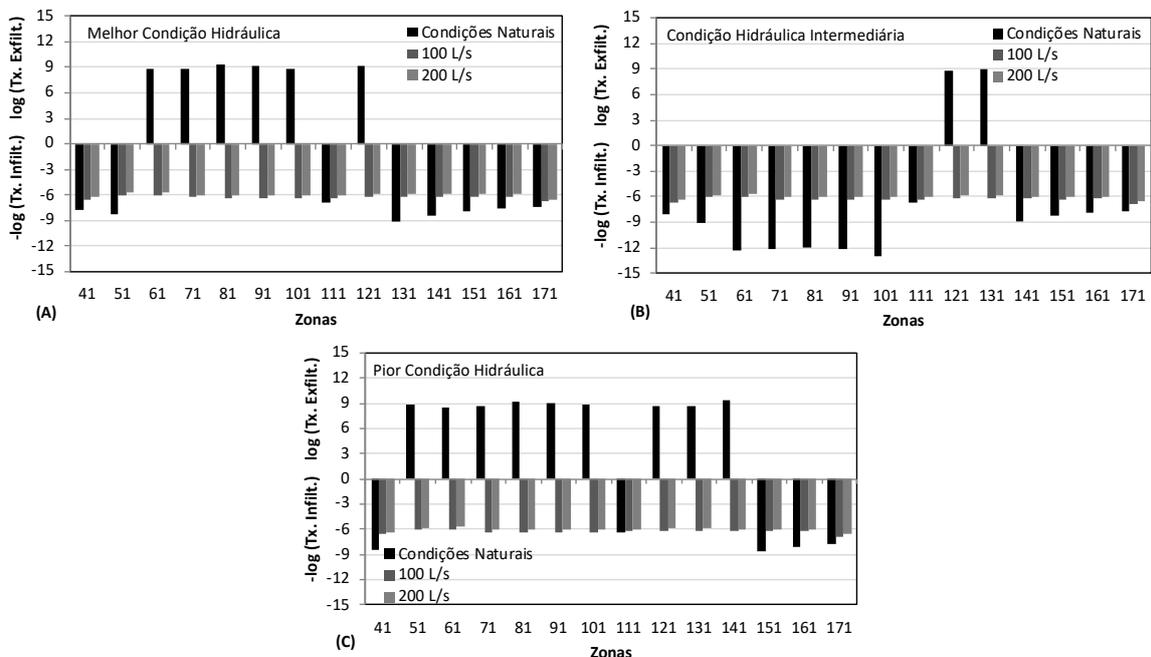
**Figura 7:** Nível do lençol freático na área de captação sob uma vazão de bombeamento de 100 L s<sup>-1</sup> à melhor (a), intermediária (b) e pior (c) condição hidráulica na lagoa, e sob uma vazão de bombeamento de 200 L s<sup>-1</sup> à melhor (d), intermediária (e) e pior (f) condição hidráulica na lagoa.

Em todos os cenários simulados o canal e mesmo a galeria de poços, se comportam como uma barreira hidráulica natural, que parece proteger a lagoa da intrusão de água salina provinda do oceano, durante o bombeamento. Alterações dos volumes de água bombeado e das condições hidráulicas na lagoa modificam o cone de depressão formado na área de captação. Quando o volume bombeado aumenta e o nível de água na lagoa e no canal diminuem, as taxas de infiltração na área simulada da margem na parte sul e norte da lagoa aumentam. Desta forma, na área de bombeamento a infiltração induzida é aumentada.

Em todos os cenários simulados, as taxas de infiltração no canal ainda permaneceram baixas se comparadas a outras áreas onde a técnica da filtração em margem é utilizada (GRISCHEK, 2003). Alterações das forças hidrodinâmicas que agem sob o leito do canal durante eventos de cheia tendem a prevenir a sua colmatagem, ocasionada pelo aumento da taxa de infiltração provinda do aumento da vazão de bombeamento (HUBBS, 2006; SOARES, 2015). Diminuições de taxas de infiltração devido a colmatagem foi observado principalmente em períodos de estiagem (WETT, 2006), onde forças hidrodinâmicas tais como a tensão de cisalhamento, e forças hidrocínéticas como a vazão, não são suficientes para remover a camada colmatada (SOARES, 2015). Este efeito pode ser potencializado dependendo da vazão de bombeamento utilizada. Grandes rebaixamentos na área de captação e dos poços de produção deve ser evitado, para que se reduza o risco de elevação da cunha salina (upconing) (GARABEDIAN, 2013; REILLY et al., 1987).



**Figura 8:** Taxas de in-/exfiltração nas zonas de estudo do canal considerando o cenário de melhor (A), intermediária (B) e pior (C) condição hidráulica no mesmo.



**Figura 9:** Taxas de in-/exfiltração nas zonas de estudo nas margens da lagoa considerando o cenário de melhor (A), intermediária (B) e pior (C) condição hidráulica na mesma.

## CONCLUSÕES

A modelagem do fluxo hídrico subterrâneo local mostrou que a Lagoa do Peri age como um corpo hídrico influente. O canal Sangradouro é alimentado não somente pela lagoa, mas também pela exfiltração de água subterrânea, especialmente em períodos de estiagem, quando o nível de água na lagoa é baixo. Além do mais, o canal parece agir também como uma barreira hidráulica natural prevenindo a intrusão de água salina na lagoa, principalmente durante períodos de estiagem.

Uma taxa de bombeamento de  $100 \text{ L s}^{-1}$ , admitindo a melhor condição hidráulica na lagoa, produziu um pequeno rebaixamento do lençol freático na área de captação (0,75 m.a.n.m). Como resultado, as taxas

de infiltração aumentaram em até 3 ordens de magnitude, quando comparadas às condições naturais, na margem da lagoa. Quando o nível de água na lagoa é reduzido, o lençol freático é trazido para cotas abaixo no nível do mar, considerando a mesma taxa de bombeamento. Isto ocasionou pequenas alterações nas taxas de infiltração nas margens da lagoa e no leito do canal, além de alterações na direção do fluxo hídrico subterrâneo, quando comparados ao cenário anterior.

Quando a taxa de bombeamento é aumentada para  $200 \text{ L s}^{-1}$ , o lençol freático na área de captação alcança  $-1,5 \text{ m.a.n.m.}$  na condição hidráulica mais favorável na lagoa. Não foram observadas alterações significantes das taxas de infiltração na margem da lagoa, quando comparadas ao cenário de menor taxa de bombeamento e mesmo nível de água na lagoa. A nova taxa de bombeamento, entretanto, ocasionou um aumento das zonas de infiltração, das quais alcançaram o canal. Como resultado, as taxas de infiltração tiveram um aumento de aproximadamente 1 ordem de magnitude em algumas zonas de infiltração. Quando o nível de água na lagoa é diminuído, o cone de depressão na área de bombeamento expande significativamente, e a profundidade do lençol freático no aquífero alcança aproximadamente  $-4,0 \text{ m.a.n.m.}$  As taxas de infiltração nas margens na lagoa e leito do canal, entretanto, permaneceram quase inalteradas.

Alterações na profundidade do lençol freático durante o bombeamento influenciam na extensão do cone de depressão, que causa uma expansão das zonas de infiltração, especialmente na parte norte e sul da margem da lagoa. Estes aumentos, entretanto, são ainda sim semelhantes às taxas de infiltração encontradas em outras estações de tratamento de água por filtração em margem, como o Lago Tegel - Alemanha, onde a técnica é utilizada por décadas sem comprometimento da sua sustentabilidade, devido a processos colmatativos (HOFFMANN, 2008).

De modo geral, baixas taxas de bombeamento parecem ser mais sustentáveis pois limitam o rebaixamento do lençol freático na área de captação, além de diminuir o cone de depressão formado na galeria de poços. De modo contrário, embora não seja foco deste estudo, a manutenção da flora localizada acima do aquífero poderia ser colocada em questão. Este cenário reduziria ainda as taxas de infiltração nas margens da lagoa e no leito do canal, e melhoraria a distribuição das zonas de infiltração na área de captação. Como resultado, haveria um aumento do tempo de residência da água filtrada em margem e, conseqüentemente, uma melhora de alguns parâmetros de qualidade da água que chega na estação de tratamento, como remoção de matéria orgânica particulada.

Baixas taxas de infiltração podem também prevenir a colmatção do sedimento das margens da lagoa e do leito do canal, pois a possibilidade de intrusão de material em suspensão no sedimento é reduzida significativamente (SOARES, 2015). Assim, a manutenção de uma boa conexão hidráulica entre o manancial superficial e o aquífero pode ajudar a diminuir os custos com energia elétrica no bombeamento, devido a diminuição do rebaixamento do nível freático. Por fim, de modo geral, a área de estudo apresentou aspectos técnicos positivos para a implantação da técnica da filtração em margem. Futuros estudos levarão em consideração a possível contaminação da água filtrada em margem pela água salina, provocado pelo *upconing* gerado a partir do bombeamento, em função do possível avanço da cunha salina.

## REFERÊNCIAS

- BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B. L.; DELEO, P. C.; LOZADA, D. S.. Environmental impact and mechanisms of biological clogging of saturated soils and aquifer materials, **Critical Reviews in Environmental Sciences and Technology**, v.28, n.2, p.123-191, 1998.
- BREUKELLEN, B. M.; ROELING, W. F. M.; GROEN, J.; GRIFFIOEN, J.; VAN VERSEVELD, H. W.. Biochemistry and isotopic geochemistry of a landfill leachate plume. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.65, p.245-268, 2003.
- CHIANG, W-H.; KINZELBACH, W.. **3D-Groundwater Modeling with PMWIN**. Springer-Verlag, 2001.
- DASH, R. R.; MEHROTRA, I.; KUMAR, P.; GRISCHEK, T.. Lake bank filtration at Nainital, India: water-quality evaluation. **Hydrogeology Journal**, Roorkee, v.16, n.6, p.1089-1099. 2008. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10040-008-0295-0>
- FORTUIN, N. P. M.; WILLEMSSEN, A.. Exsolution of nitrogen and argon by methanogenesis in Dutch groundwater. **Journal of Hydrology**, v.301, p 1-13, 2005.
- FREITAS, D. A.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; MOLICA, R. J. R.. Application of bank filtration technology for water quality improvement in a warm climate: a case study at Beberibe River in Brazil. **Journal of Water Supply: Research and Technology**, p.319-330, 2012.
- GARABEDIAN, S.P.. Estimation of salt water upconing using a steady-state solution for partial completion of a pumped well. **Groundwater**, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1111/gwat.12013>
- GRISCHEK, T.; HISCOCK, K. M.; METSCHIES, T.; DENNIS, P. F.; NESTLER, W.. Factors affecting denitrification during infiltration of river water into a sand and gravel aquifer in Saxony, Germany. **Water Resources**, v.32, p.450-460, 1998.
- GRISCHEK, T.. **Zur Bewirtschaftung von Uferfiltratfassungen an der Elbe**. Mitteilungshefte des IGW: Technische Universität Dresden, 2003.
- GRISCHEK, T.; SCHOENHEINZ, D.; SYHRE, C.; SAUPE, K.. Impact of decreasing water demand on bank filtration in Saxony, Germany. **Drinking Water Engineering and Science**, v 3, p 11-20, 2010.
- GUEDES, T. L.; SOUZA, F. H. de; GHISI, D. B.; PEREZ, A. B. A.; DALSSASSO, R. L.; SENS, M. L.. Aplicação da filtração em margem de rio como alternativa de tratamento de água para comunidades isoladas. **Revista DAE**, v.67, p.84-94, 2019.
- GUNKEL, G.; BEULKER, C.; HOFFMANN, A.; KOSMOL, J.. Fine particulate organic matter (FPOM) transport and processing in littoral interstices: use of fluorescent markers. **Limnologia**, v.39, n.3, p.185-199, 2009.
- HISCOCK, K. M.; GRISCHEK, T.. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. **Journal of Hydrology**, v.266, p.139-144, 2002.
- HOFFMANN, A.. **Biologische Funktionsfähigkeit und Dynamik des sandigen Interstitials unterm dem Einfluss induzierter Uferfiltration am Tegeler See (Berlin)**. Thesis (PhD) – Technische Universität Berlin, Berlin, 2008.
- HOFFMANN, A.; GUNKEL, G.. Carbon input, production and turnover in the interstices of a Lake Tegel bank filtration site, Berlin, Germany. **Limnologia**, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.limno.2010.10.002>
- HUBBS, S. A.. Evaluating streambed forces impacting the capacity of riverbed filtration systems. In: **Riverbank Filtration Hydrology**, v.60, p.21-42, 2006.
- HUBBS, S. A.. Laboratory simulated RBF particle removal processes. **Journal AWWA**, v.102, n.12, p.57-66, 2010
- LAUDARES-SILVA, R.. **Aspectos limnológicos, variabilidade espacial e temporal na estrutura da comunidade fitoplanctônica da Lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil**. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1999
- MALOSZEWSKI, P.; MOSER, H.; STICKLER, W.; BERTLEEF, B.; HEDJN, K.. Modelling of groundwater pollution by river bank filtration using oxygen-18 data. **IAH Publ. Groundwater Monitoring and Managemet**, n.173, 1990.
- MASSMANN, G.; NOGEITZIG, A.; TAUTE, T.; PEKDEGER, A.. Seasonal and spacial distribution of redox zones during Lake Bank filtration in Berlin, Germany. **Environ. Geol**, v.54, p.53-65, 2008.
- MONDARDO, R. I.. **Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- NEMAR. **Diagnóstico ambiental visando um programa de monitoramento da Lagoa do Peri**. NEMAR, 1999.
- OLIVEIRA, J. S.. **Análise sedimentar em zonas costeiras: subsídio ao diagnóstico ambiental da Lagoa do Peri – Ilha de Santa Catarina, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- PATINOUDI, V.; COLLINS, M. R.. Assessing RBF reduction/removal mechanisms for microbial and organic DBP precursors. **Journal AWWA**, p.61-71, 2007.
- RABELO, L. P.. **Estudos preliminares para a implantação da filtração em margem na Lagoa do Peri como pré-tratamento de água para remoção de fitoplâncton**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- RAY, C.; SCHUBERT, J.; LINSKY, R.B.; MELIN, G.. **Riverbank Filtration: Improving Source Water Quality**. Boston: Kluwer Academic Publishers and National Water Research Institute, 2002
- RAY, C.; GRISCHEK, T.; HUBBS, S.; DREWES, J.; HAAS, D.; DARNAULT, C.. Riverbank filtration for drinking water supply. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, 2008. DOI:

<http://doi.org/10.1002/0470848944.hsa305>

REILLY, T. E.; FRIMPTER, M. H.; LEBLANC, D. R.; GOODMAN, A. S.. Analysis of steady-state salt-water upconing with application at Truro well field, Cape God, Massachusetts. **Groundwater**, v.25 n.2, p.194-206, 1987.

ROMERO, L. G.. **Remoção de material orgânica natural e precursores de trihalometano por filtração em margem na Lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SANTOS, G. F.; SILVA, J. T. N.; MENDONCA, M.; VEADO, R. W.. Análise ambiental da Lagoa do Peri. **Geosul**, n.8, p.101-123, 1989.

SCHUBERT, J.. Hydraulics aspects of riverbank filtration: field studies. **Journal of Hydrology**, v.266, p.145-161, 2002.

SCHUBERT, J.. Experience with riverbed clogging along the Rhine river. In: HUBBS, S. A.. **Riverbank filtration hydrology impacts on system capacity and water quality**. NATO Sciences Series. Springer: The Netherlands, 2006. p.221-242.

SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L.. Bank filtration of reservoir as an efficient technique for water supply treatment. In: GUNKEL, G.; SOBRAL, G. M. C.. **Reservoir and river basin management: Exchange of experiences from Brazil, Portugal and Germany**. Universitätsverlag TU Berlin, 2007. p.253-264.

SHAMRUKH, M.; ABDEL-WAHAB, A.. Riverbank filtration for sustainable water supply: application to a large-scale facility on the Nile River. **Clean Techn. Environ. Policy**, v.10, p.351-358, 2008.

SIMONASSI, J.. **Caracterização da Lagoa do Peri, através da análise de parâmetros físico-químicos e biológicos, como subsídio ao gerenciamento dos recursos hídricos da Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SOARES, M.; GUNKEL, G.; MACHELEIDT, W.; GRISCHEK, T.. Der Einfluss von Röhricht auf die Uferfiltration in der lithoralen Zone des Tegeler Sees. **Geoscience Education: Understanding System Earth**, v.78, p.138-138, 2012.

SOARES, M.. **The influence of high infiltration rates, suspended sediment concentration and sediment grain size on river and lakebed clogging**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Tecnologia de Berlim, Berlim, 2015.

SOARES, M.; PIZZOLATTI, B. S.; SENS, M. L.. Estudo Hidrogeológico Preliminar para a Avaliação do Potencial de Colmatação do Sedimento das Margens da Lagoa do Peri e do Canal Sangradouro – Florianópolis – Santa Catarina – para a Implantação da Técnica da Filtração em Margem. **Anuário do Instituto de Geociências**, v.42, n.4, p.46-55, 2019.

STUYFZAND, P. J.; JUHASZ-HOLTERMAN, M. H. A., DE LANGE, W. J.. Riverbank filtration in the Netherlands: well fields, clogging and geochemical reactions. In: HUBBS, S. A.. **Riverbank Filtration Hydrology**. 2006. p.119-153.

WETT, B.. Monitoring clogging of a RBF-system at the river Enns, Austria. In: HUBBS, S. A.. **Riverbank Filtration Hydrology Impacts on System Capacity and Water Quality**. NATO Sciences Series. Springer: The Netherlands, 2006. p.259-280.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.