

## 24. Águas

Estudo do uso de *seepage meters* para a quantificação dos aportes subterrâneos de uma laguna subtropical: Lagoa da Conceição, Florianópolis/SC - Brasil

Kern, Priscilla; Arcari, Thiago; Franco, Davide.

priscilla.kern@gmail.com; thiagoarcari@gmail.com; d.franco.ocean@gmail.com;

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

### Resumo

A presença de águas menos salgadas na parte profunda da Lagoa da Conceição indica que pode ocorrer infiltração significativa pelo subsolo. O fluxo é nomeado “negativo” quando ocorre da laguna para o manancial subterrâneo e “positivo” quando ocorre o contrário. Divergências nos valores de balanço hidrológico de algumas lagunas costeiras que, posteriormente, foram investigados, resultaram em taxas positivas de descarga subterrânea. A fim de quantificar os aportes subterrâneos na Lagoa da Conceição, este trabalho propõe a utilização de um método alternativo e de baixo custo para a estimativa de fluxos subterrâneos de água, por meio de *seepage meter*. O estudo apresenta a metodologia utilizada para a construção e instalação do equipamento, os primeiros resultados indicam uma variabilidade regional do sentido do fluxo subterrâneo. Na região centro-oeste da laguna, o fluxo varia entre positivo e negativo, apresentando uma média de -0,24 cm/dia. Na região centro-leste, o fluxo predominante é negativo, com média de -2,30 cm/d. Ao sul, o fluxo é sempre positivo com média de +2,14 cm/d.

**Palavras-Chave:** Lagunas Costeiras, Descarga de água subterrânea, *Seepage meter*.

### Introdução

A Lagoa da Conceição é uma laguna costeira estrangulada, um sistema marinho raso, orientado paralelamente à costa, separado do oceano por uma barreira e interligada ao oceano por um canal.

Estudos em lagunas costeiras mostram que aportes subterrâneos respondem por

significativa parcela do abastecimento lacustre e costeiro e também em seus ciclos biogeoquímicos (Burnett *et al.*, 2006; Leote; Ibánhez; Rocha, 2008; Liefer *et al.*, 2014; Martin *et al.*, 2007; Niencheski *et al.*, 2007; Rocha, 2014).

Para quantificar a taxa de renovação de uma laguna é necessário o conhecimento

das taxas de fluxo de águas doces e salgadas. Fluxos de recarga do corpo hídrico superficial são aqui considerados como positivos, enquanto o contrário, fluxos de recarga do manancial subterrâneo, são considerados negativos. Esta definição deve-se a necessidade corriqueira de informar o processo, indicando o sentido de movimento do fluxo, importante característica abordada neste trabalho.

Na Lagoa da Conceição, Odebrecht e Caruso Gomes Jr. (1999) afirmam que, a presença de águas menos salgadas na parte profunda da laguna indica que pode ocorrer infiltração significativa pelo subsolo, não devendo ser desprezado na quantificação da taxa de renovação da Lagoa.

A descarga de água subterrânea (DAS) nos estuários pode ser volumétrica e quimicamente importante. Uma das metodologias para detecção da ocorrência da DAS é o uso do *seepage meter*, descrito por Lee (1977). Este método de avaliação das descargas foi empregado em diversos trabalhos (Asbury, 1990; Leote *et al*, 2008; Murdoch & Kelly, 2003; Rocha, 2014; Rosenberry, 2008), por sua facilidade de aplicação, resposta rápida e baixos custos envolvidos, sendo os resultados preliminarmente importantes para

qualificar e quantificar volumes que advectam em pontos específicos.

Estudos anteriores realizados na região sul do estado do Rio Grande do Sul (RS), na Lagoa Mangueira (Andrade, 2012; Attisano, 2008), Lagoa dos Patos (Niencheski, 2007) e Lagoa Mirim (Santos, 2008) apontam que as divergências nos valores de balanço hidrológico de tais lagoas resultam em taxas positivas de descarga subterrânea.

A metodologia ora descrita propõe um método alternativo para estimativas destes fluxos, esta inserida em um plano de trabalho que visa apresentar modelos de fluxo e transporte da água subterrânea na Lagoa da Conceição.

Este trabalho, inédito na Lagoa da Conceição, compõe a linha de pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tem como temática a investigação científica de fenômenos físicos e biogeoquímicos na Lagoa da Conceição, Florianópolis – SC.

### Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é utilizar o equipamento de baixo custo, o *seepage meter*, para quantificar os aportes de água subterrânea no corpo lagunar.

## Materiais e Métodos

*Seepage meter* fornece um método rápido e simples para coletar informações sobre a direção, taxa e variabilidade do fluxo de infiltração através da interface água sedimento, a metodologia utilizada foi adaptada de Rosenberry, 2008 e Martinez 2016, ambos na base de Lee, 1977.

### Materiais

Os materiais e ferramentas utilizados na construção de um *Seepage Meter* são:

- Parte superior ou inferior de um tambor cilíndrico (Polietileno de alta densidade) de aproximadamente 200 litros, com 60cm de diâmetro (Figura 1c);
- Conjunto flange (PVC) com o-ring para vedação, (Figura 1c) e um registro de esfera (PVC) para unir o tambor ao tubo coletor permitindo que o sistema seja desmontado sem operações destrutivas (Figura 1a);
- Tubo de PVC 25 mm, limpo que encaixe perfeitamente conjunto flange impossibilitando vazamentos (Figura 1a);
- Venda de borracha para acoplar a bolsa coletora ao tubo (Figura 1b);
- Bolsa coletora de plástico (Figura 1b). O tamanho da sacola depende da taxa de infiltração e do período de tempo adotado para as coletas.



Figura 1: Materiais utilizados na confecção dos *seepage meter*.

A bolsa coletora acoplada ao tambor é a peça mais importante do equipamento, e também a maior fonte de erros de medição. O material da bolsa deve ser resistente e impermeável, porém não tanto ao ponto de oferecer resistência para o fluxo. A bolsa coletora escolhida foi um saco de polietileno com espessura de 0,6 mm e dimensões 25 cm por 35 cm. Após algumas coletas, saco de polietileno foi substituído por outro de dimensões maiores (40 por 60cm e 0,8 mm de espessura).

### Instalação

O orifício onde será acoplado o tubo e a bolsa coletora deve ser realizado no topo ou na borda do galão. Quando instalado, o lado do *seepage meter* com o orifício deve estar ligeiramente elevado, permitindo que qualquer gás escape livremente. O saco

deve permanecer submerso para possuir a mesma carga hidráulica dentro do *seepage meter* e nas águas superficiais circundantes.

A instalação deve ser realizada em um local livre de vegetação, detritos e pedras grandes. Além disso, o acúmulo de matéria orgânica gera a produção de gases que deve ser evitado. Quanto mais fofo o solo onde o *seepage meter* será instalado maior deverá ser a altura que o mesmo deve ser enterrado até que seja obtida a vedação adequada. Em solos relativamente compactos, como o da Lagoa da Conceição uma profundidade de 10 cm é considerada adequada (Figura 2a.). O *seepage meter* deve ser mantido inclinado. Uma vez instalado é desejável reservar um intervalo de tempo de 1 hora a 24 horas (dependendo da natureza do sedimento) para permitir a re-estabilização do sedimento no entorno do *seepage meter* antes da primeira medição.

#### Monitoramento

O saco deve ser preenchido com aproximadamente metade do seu volume e acoplado ao *seepage* sem ar. A vazão e a direção do fluxo entre as águas superficiais e subterrâneas são medidas pela variação do volume de água na bolsa coletora durante um determinado período de tempo. O tempo requerido varia de acordo com a

aplicação, em locais com baixa infiltração é necessário mais tempo. É recomendado um intervalo de 1 a 2 horas, se o volume não apresentar variação aumenta-se o intervalo de tempo. Por outro lado, se neste intervalo a bolsa estiver completamente cheia ou vazia é necessário diminuir o intervalo de tempo. A Figura 2a apresenta o esquema de instalação do *Seepage* e Figura 2b a imagem do *seepage* submerso com o conjunto da bolsa isenta de ar com o tubo coletor inserido através do conjunto da flange no *seepage*.

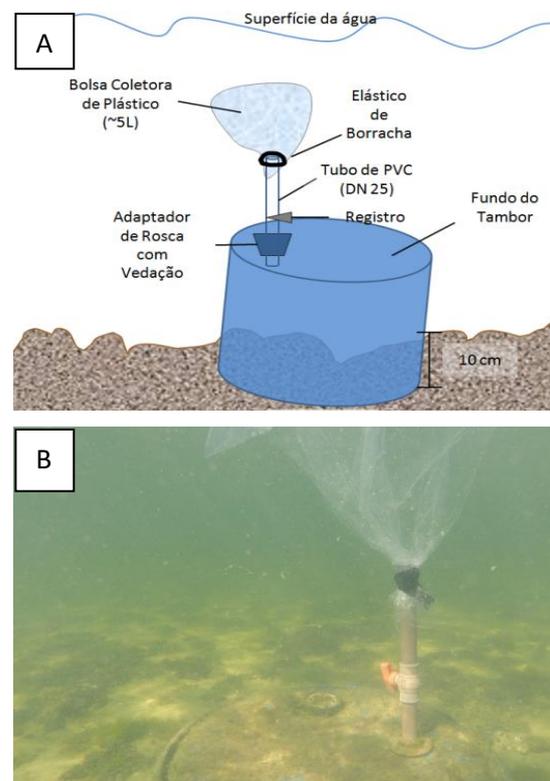


Figura 2: A: Esquema de instalação do *Seepage*; B: Conjunto da bolsa isenta de ar com o tubo coletor inserido através do conjunto da flange no *seepage*.

O fluxo entre a água superficial e subterrânea pode ser definido pela equação (1):

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{final} - V_{inicial}}{t_{final} - t_{inicial}} \quad (1)$$

Onde, Q = a taxa de infiltração [L<sup>3</sup>/T], V<sub>inicial</sub> = volume inicial conhecido, metade do volume do saco e V<sub>final</sub> = volume final, será medido em campo após o tempo (Δt) decorrido durante a medição.

### Resultados e Discussão

A distribuição dos pontos selecionados para a instalação dos *Seepage Meters*, visa abranger as diferentes regiões da bacia hidrográfica a fim de investigar a variação espacial das DAS. A Figura 3, apresenta a localização das cinco seções dos *seepages* instaladas: LIC (L), Ponta das Almas (PA), Costa Cachoeira (CC), Costa Rio Vermelho (CRV) e Rendeiras (R). A sub-bacia de cada seção está destacada em laranja. Não foi instalado nenhum *seepage* na região extremo norte devido à dificuldade de acesso.

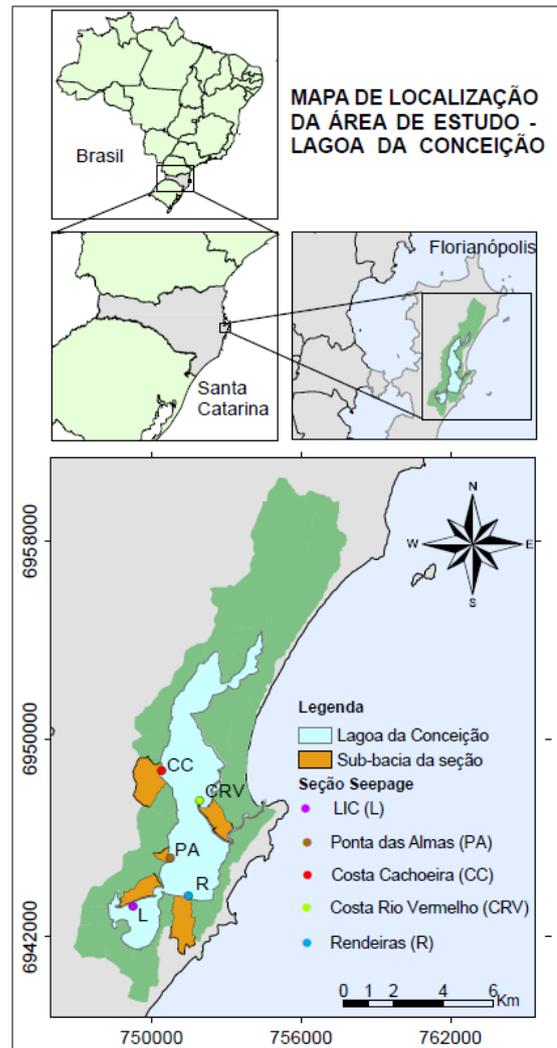


Figura 3: Mapa de localização dos *Seepages*

Em cada local foram instalados três equipamentos para a obtenção da triplicata dos dados afim de garantir maior precisão e confiabilidade nos dados. Os *seepages* de todas as seções apresentam a mesma disposição, foram traçados transectos perpendiculares à linha de costa com 3 metros de espaçamento, assim é possível verificar se a proximidade da encosta exerce influência significativa nas medições dos *seepages*.

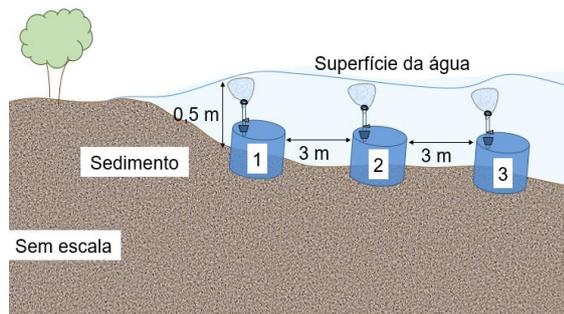


Figura 4: Esquema de la disposición de los seepages. En cada sección se trazaron transectos perpendiculares a la línea de costa a través de la instalación de tres equipos.

### Descripción General de las Coletas

Ao total, se realizaron 15 campañas de monitoreo de descargas de aguas subterráneas en cinco secciones de la Lagoa da Concepción.

Las mediciones de las DAS en todos los seepages se realizan todas en el mismo día, en un primer momento se acoplan los medidores a los seepages de todas las secciones, en el segundo momento se retiran todos los medidores, la Tabla 1 presenta el tiempo promedio de permanencia de los medidores en cada localidad.

Tabla 1: Tiempo promedio de permanencia de los medidores en los seepages en cada sección.

Sección	Tiempo promedio (min.)
Punta das Almas	116
Rendeiras	120
LIC	190
Costa Cachoeira	52
Costa Rio Vermelho	86

Como no se conocía a priori la gama de valores que las descargas podrían asumir en cada sección de la laguna, las primeras campañas sirvieron para estimar el orden de magnitud y el sentido de la descarga en cada sección.

No LIC, donde el tiempo de permanencia es mayor debido al camino de recolección, la bolsa recolectora presentó en la mayoría de las veces completamente vacía, el hecho también ocurrió algunas veces en Punta das Almas. Por otro lado, en Rendeiras la bolsa presentó algunas veces completamente llena.

Los resultados de esta primera etapa presentaron algunos problemas tales como:

- Dificultad de garantizar la integridad de las bolsas recolectoras, que se perforaban debido al manejo y a la fragilidad del material;
- Dificultad de garantizar la vedación entre el medidor y la bolsa de recolección, ya que la goma utilizada para acoplar uno al otro a veces se presentaba floja;
- En algunas ocasiones, los tambores eran arrastrados por la corriente y se perdían en la laguna. Este hecho ocurrió tres veces en la sección de Rendeiras y una vez en la sección de Costa Cachoeira. En Rendeiras el seepage fue reemplazado dos veces, actualmente ambas secciones se presentan con solo dos seepages.

- Para algunas medidas nas seções Rendeiras, LIC e Ponta das Almas, o volume da bolsa coletora não foi o suficiente para a descarga local.

Foram realizadas 16 coletas e a partir da coleta numero 11 foram adotadas bolsas coletoras com volume maior, de aproximadamente 20 litros (40x60) cm, as primeiras bolsas possuíam volume aproximado de 7 litros (25x35) cm.

### Estatísticas descritivas

Os dados medidos foram manipulados, por meio do software *Statistica*, permitindo assim realizar a sua análise exploratória, buscando identificar comportamentos espaciais, temporais e de relação entre as variáveis, através da discussão, organização e síntese dos dados em tabelas, gráficos e medidas descritivas.

As tabelas (Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4) a seguir apresentam as estatísticas descritivas básicas da variável descarga (cm/d) para os dados brutos.

Os valores mínimos medidos são apresentados na Tabela 2, na seção LIC podem ser observados valores altos de descarga negativas, (-16,2; -13,9 e -9,1 cm/d) estes valores são representativos pois foram os valores encontrados após a substituição da bolsa coletora por uma maior. Todos os dados apresentaram valores de assimetria e curtose diferentes

de zero, o que indica que as distribuições não são gaussianas.

Verificou-se que as distribuições das variáveis nas seções, Rendeiras, LIC e Costa Cachoeira, são leptocúrticas, devido ao fato das suas respectivas curtoses apresentarem valores positivos, indicando que a distribuição de frequência apresenta uma curva mais alta do que a normal, de modo que o topo é relativamente alto. Além disso, observou-se que a assimetria para a Ponta das Almas, Rendeiras e Costa Cachoeira é positiva, fato que aliado às distribuições serem leptocúrticas, indicam que as estas podem apresentar comportamento lognormal.

Tabela 2: Valores mínimos medidos da variável descarga (cm/d) para todos os medidores instalados.

Seção	Mínimo (cm/d)		
LIC	-16,2	-13,9	-9,1
PA	-3,0	-3,1	-6,3
CC	-4,1	-0,8	-2,4
CRV	-6,8	-9,4	-3,5
R	-0,2	0,6	0,8

Pode-se perceber, por meio da Tabela 3, que os valores de média foram distintos para todos os medidores, sendo que o valor do erro padrão da média variou de 0,4 a 2,6. Os valores entre parênteses na Tabela 3 representam os máximos e mínimos considerando o erro padrão da média, a partir destes é possível verificar se o fluxo no respectivo medidor é positivo

ou negativo. As setas indicam o sentido do fluxo no medidor.

Tabela 3: Valores médios medidos da variável descarga (cm/d) para todos os medidores instalados. Os valores entre parênteses apresentam os valores máximos e mínimos considerando o erro padrão da média.

Seção	Média (cm/d)		
LIC	$-10,4 \pm 2,6$	$-9,7 \pm 2,3$	$-6,2 \pm 1,7$
	(-13,0, -7,8)	(-12, -7,4)	(-7,9, -4,5)
PA	$-0,7 \pm 0,7$	$0,2 \pm 0,7$	$-0,3 \pm 1,1$
	(-1,4, 0)	(-0,5, 0,9)	(-1,4, 0,8)
CC	$-1,6 \pm 0,5$	$1,5 \pm 2,3$	$-0,5 \pm 0,3$
	(-2,1, -1,1)	(-0,8, 3,8)	(-0,8, -0,2)
CRV	$-2,8 \pm 0,6$	$-2,9 \pm 0,8$	$-1,2 \pm 0,5$
	(-3,4, -2,2)	(-3,7, -2,1)	(-1,7, -0,7)
R	$1,1 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,5$	$3,4 \pm 1,1$
	(-0,7, 1,5)	(1,4, 2,4)	(2,3, 4,5)

A Tabela 4 apresenta os valores máximos medidos em cada seção, na seção Rendeiras é possível observar as maiores descargas positivas.

Tabela 4: Valores máximos medidos da variável descarga (cm/d) para todos os medidores instalados.

Seção	Máximo (cm/d)		
LIC	-3,6	-3,6	-2,9
PA	4,3	5,0	6,4
CC	2,1	3,8	1,9
CRV	-0,3	0,5	2,5
R	2,8	5,8	11,3

A Figura 5 (inferior) apresenta o mapa com a localização de cada seção e o gráfico Box Plot (superior) das descargas (cm/d) agrupadas por seção, o gráfico apresenta

a mediana e o valor mínimo e máximo medido em cada seção. Observa-se que as descargas apresentam uma distribuição multimodal, o conjunto de dados possui medianas diferentes. Os pontos em circunferência representam os outliers sendo estes os pontos que estão a mais de três faixas interquartis da extremidade da caixa, definidos através de 1,5 IQR (Intervalo Interquartil). Por se tratar de uma abordagem inicial, os dados não possuem distinção temporal, ou seja, são independentes do tempo o qual foram realizadas as medidas.

Para o cálculo dos *box plot*, foram excluídos todos as medidas realizadas no LIC antes da troca da bolsa coletora, pois acredita-se que como antes da troca as bolsas esvaziaram por completo, estas medidas não apresentam valores de descargas significativos.

Os dados demonstram que as seções da região central da laguna apresentam o mesmo comportamento, com o fluxo variando da laguna para o aquífero e vice-versa, com a exceção da seção da Rendeiras, onde os aportes são sempre positivos do aquífero para a laguna, o fato pode ser explicado pela presença da Lagoa de Evapo-Infiltração localizada a poucos metros do local da seção. Já o subsistema sul apresenta um comportamento distinto do resto da laguna, com as descargas

sempre negativas. A Figura 5 inferior apresenta setas indicativas do comportamento padrão do fluxo, sendo as setas brancas utilizadas quando ocorre a variação do fluxo, positivo e negativo. Seta laranja para o fluxo negativo, com o sentido para fora do corpo lagunar e seta azul para o fluxo positivo, com o sentido indicativo para dentro do corpo lagunar. Os valores apresentados na figura representam o valor médio do fluxo na seção.

As duas seções da região centro-oeste (PA e CC) da laguna apresentaram comportamento semelhante uma a outra, o fluxo varia entre positivo e negativo em cada uma das seções e a média das descargas na região variou de -0,21 cm/d a -0,27cm/d. A porção leste da laguna (CRV) também apresenta variação de fluxo, no entanto a média dos valores medidos é de -2,30 cm/dia. Nas rendeiras, onde os valores de fluxo deveriam ser similares à porção oeste da laguna, devido à caracterização da sub-bacia das seções, os fluxos foram sempre positivos, com média de 2,14cm/d indicando que no local há uma recarga artificial de aproximadamente 2,0 cm/d.

No LIC, seção representante do sub-sistema sul da laguna, o valor médio da descarga na seção é de -8,79 cm/d, o fluxo negativo elevado nesta seção tem origem antrópica.

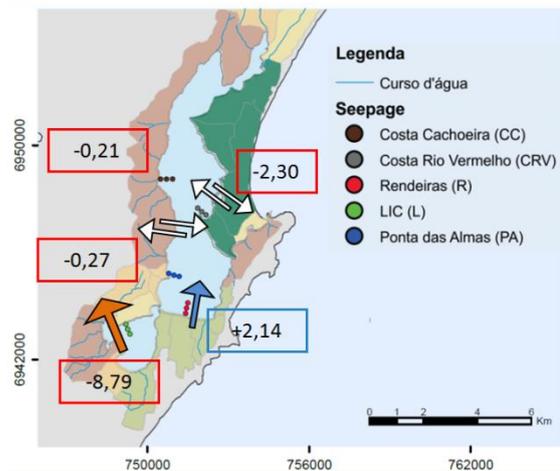
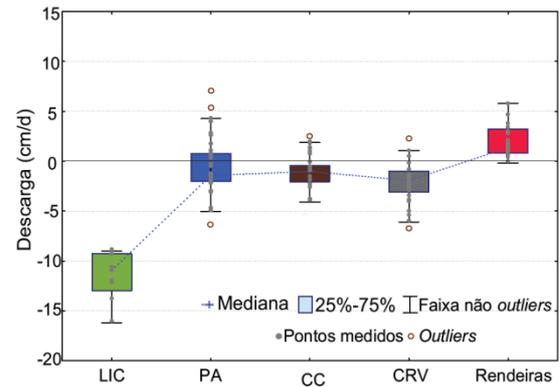


Figura 5: *Box Plot* (superior) das descargas (cm/d) agrupadas por seção, o gráfico apresenta a mediana e o valor mínimo e máximo medido em cada seção. Mapa de localização (inferior) das seções de medição das descargas de águas subterrâneas da Lagoa da Conceição. As setas indicam o sentido do fluxo, laranja representa fluxo negativo, azul fluxo positivo e branca representa o fluxo com os dois comportamentos.

A Figura 6 mostra os valores encontrados para as descargas (cm/d) nos diferentes medidores. A partir do gráfico, é possível distinguir, principalmente pela caixa, que as descargas encontradas nos medidores

mais afastados da margem apresentam maiores valores. A Figura 6 confirma que as seções PA, CC e CRV comportam-se de maneira semelhante, com descargas oscilando entre positivo e negativo com a maioria dos valores medidos apresentando fluxo negativo.

A seção do LIC apresenta um comportamento distinto ao restante da laguna, acredita-se que as constantes taxas de fluxo negativas ocorram devido à presença de um poço de captação de água subterrânea próximo a seção. Ao contrário da seção do LIC, na seção das Rendeiras o fluxo é sempre positivo, a seção está localizada próxima a uma zona de recarga artificial, uma lagoa de evapo-infiltração.

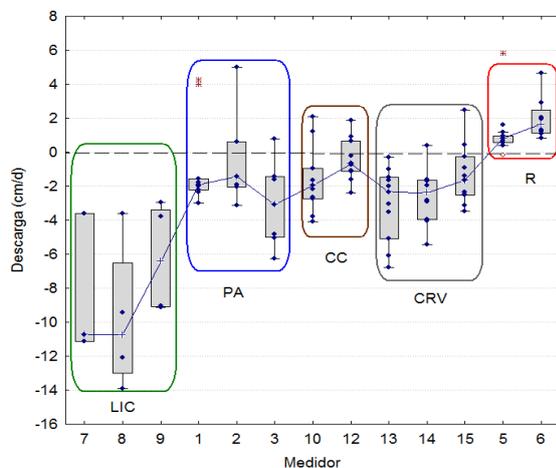


Figura 6: *Box-plot* das descargas agrupadas por medidor. As descargas apresentam uma distribuição multimodal, visto que o conjunto de dados possui medianas diferentes, PA, CC e CRV apresentam um comportamento semelhante, enquanto o LIC apresenta descargas com valores e negativos e as Rendeiras, valores altos positivos.

## Conclusões

O modelo aplicado foi satisfatório na determinação do fluxo entre a zona superficial e subterrânea da Lagoa da Conceição, sua construção e instalação são simples e o equipamento possui um baixo custo.

Dos testes executados na laguna foram obtidos valores de fluxo diferentes para cada região. O estudo indicou que o sentido do fluxo subterrâneo varia regionalmente, na região LIC o fluxo é sempre negativo, em direção ao manancial subterrâneo, na região centro-oeste, Ponta das Almas e Costa Cachoeira, o fluxo varia entre positivo e negativo. Na região centro leste, representada pela seção Costa Rio Vermelho, o fluxo oscila porém é predominante é negativo. Enquanto no LIC o fluxo é sempre negativo e nas Rendeiras o fluxo é sempre positivo, assim, através das campanhas realizadas é possível afirmar que recargas e descargas de origem antrópica tem forte influência sobre o fluxo subterrâneo local.

## Bibliografia

- Andrade, C. F. F. (2012). *Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea na região costeira do extrema Sul do Brasil*. Insituto de Oceanografia. Rio Grande, Universidade Federal do Rio Grande, Tese de Doutorado: 177 p.
- Asbury, C. E. (1990) *The role of groundwater seepage in sediment*

- chemistry and nutrient budgets in Mirror Lake, New Hampshire: Ithaca.* Cornell University, Ph.D. dissertation, 275 p.
- Attisano, Karina K. *et al.* (2008). *Evidences of continental groundwater inputs to the shelf zone in Albardão, RS, Brazil.* Brazilian Journal of Oceanography, v. 56, n. 3, p. 189-200.
- Burnett, W. C.; Kim, G.; Lane-Smith, D. (2001). *A continuous monitor for assessment of <sup>222</sup>Rn in the coastal ocean.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v. 249, n. 1. p. 167-172
- Lee, D. R. (1977). *A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries.* Limnology and Oceanography, 22(1), 140-147.
- Leote, C.; Ibánhez, J. S.; Rocha, C. (2008) *Submarine groundwater discharge as a nitrogen source to the Ria Formosa studied with seepage meters.* Biogeochemistry, v. 88, n. 2, p. 185–194.
- Liefer, J. D. *et al.* (2014). *Seasonal Alternation Between Groundwater Discharge and Benthic Coupling as Nutrient Sources in a Shallow Coastal Lagoon.* Estuaries and Coasts, v. 37, n. 4, p. 925–940.
- Martin, J. B. *et al.* (2007). *Magnitudes of submarine groundwater discharge from marine and terrestrial sources: Indian River Lagoon, Florida.* Water Resources Research, v. 43, n. 5, p. 1–15.
- Martinez, C. J. (2016). *Seepage Meters for Measuring Groundwater–Surface Water Exchange.* Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Murdoch, L.C., & Kelly, S.E. (2003). *Factors affecting the performance of conventional seepage meters: Water Resources Research*, v. 39, no. 6, p.
- Niencheski, L. F. H., Windom, H. L., Moore, W. S., & Jahnke, R. A. (2007). *Submarine groundwater discharge of nutrients to the ocean along a coastal lagoon barrier, Southern Brazil.* Marine Chemistry, 106(3-4), 546–561.
- Odebrecht, C.; Caruso G JR. (1999) *Hidrografia e matéria particulada em suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil.* Florianópolis NEMAR - CCB – UFSC.
- Rocha, C. M. (2014). *Adveção de água subterrânea para as lagoas Costeiras do litoral Norte do RS, Brasil.* Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da Universidade Federal do Rio Grande.
- Rosenberry, D. O. (2008) *A seepage meter designed for use in flowing water.* Journal of Hydrology, v. 359, n. 1-2, p. 118-130.
- SANTOS, I. R *et al.* (2008). *Tracing anthropogenically driven groundwater discharge into a coastal lagoon from southern Brazil.* Journal of Hydrology 353(2008):275– 293.