IMPACTO DO DESASSOREAMENTO NA INTRUSÃO SALINA EM RIOS ESTUARINOS URBANOS: ESTUDO DE CASO DO RIO CUBATÃO, SP.

Fábio Paiva da Silva [1]; José Rodolfo Scarati Martins; Fábio Ferreira Nogueira; Maria Cristina Santana Pereira; Lais Ferrer Amorim.

RESUMO – Um dos principais fenômenos em sistemas estuarinos é a intrusão salina, que pode ser entendida como a incursão de água salina estuário acima devido à ação da maré, afetando diretamente qualidade da água e seus múltiplos usos, como abastecimento público, principalmente em rios urbanos. Para pequenos rios, a modelagem unidimensional é adequada para simular cenários hidrodinâmicos e de qualidade da água, sendo uma ferramenta importante no processo de tomada de decisão na gestão de recursos hídricos. Adicionalmente, inundações são problemas frequentes em rios urbanos, tendo como alternativa de mitigação as técnicas de desassoreamento. Para este processo, deve-se considerar seus impactos na qualidade da água do rio, especialmente a mudança na dinâmica da intrusão salina. O Rio Cubatão, localizado no sistema estuarino de Santos, em São Paulo, sofre a influência da maré e apresenta intrusão salina. Neste trabalho, com simulação de cenários hidrodinâmicos usando o modelo HEC-RAS, foi possível identificar o aumento significativo da intrusão salina considerando um cenário de desassoreamento de trechos do rio. Este aumento ocorreu tanto em situações de maré baixa quanto de maré alta, causando impacto na qualidade da água no trecho urbano do rio, podendo afetar a captação para abastecimento público ou industrial.

ABSTRACT– One of the main phenomena in estuarine systems is the saline intrusion, which can be defined as the seawater incursion in the estuary as a consequence of the tidal process It can directly affect the water quality and its multiple uses, such as public supply, particularly in urban rivers. For small rivers, the one dimensional modeling is adequate to simulate hydrodynamic and water quality scenarios, being an important tool for decision making processes on water resources management. Additionally, inundations are common problems in urban rivers, and one of the mitigation alternatives is the dredging process. It is necessary to consider its impacts on water quality, especially on saline intrusion. The Cubatão River, located in the estuarine system of Santos, São Paulo, is affected by the tidal process and it presents saline intrusion. In this research, with hydrodynamic simulations using the HEC-RAS model, it was possible to identify the significant increasing of saline intrusion, considering a river dredging scenario. This increasing was observed in both high tide and low tide conditions, causing a water quality impact in the urban river, which can affect the water withdrawn for public and industrial supply.

Palavras-Chave – Intrusão salina. Desassoreamento. Modelagem de qualidade da água.

[1]) Av. Prof. Lúcio Martins Rodrigues, 120 – Butantã, São Paulo – SP. CEP: 05508-900. (11) 954956199, fpaiva@usp.br

INTRODUÇÃO

De acordo com Miranda *et al.* (2012), um sistema estuarino pode ser definido como um ambiente costeiro semifechado em que a água doce proveniente dos rios encontra a água do oceano. O trecho superior de um sistema estuarino é o limite de influência das marés nos rios estuarinos.

Mesmo que estuários representem apenas uma pequena parcela das águas superficiais no planeta, eles desempenham um papel importante nas atividades humanas. Estes corpos hídricos são ecossistemas muito produtivos, sendo habitat ideal para muitas espécies comerciais de peixes, são ambientes seguros para estruturas portuárias, além de serem importantes para atividades de recreação (JI, 2017; MIRANDA, 2012; SAVENIJE, 2012). Por estes benefícios, muitas cidades se desenvolveram próximas a sistemas estuarinos e criaram uma relação de dependências destas águas. Estima-se que aproximadamente 40% da população mundial viva em regiões costeiras (BARRAGÁN AND ANDRÉS, 2015).

Um dos principais fenômenos em sistemas estuarinos é a intrusão salina (HADDOUT *et al*. 2016). Este efeito pode ser descrito como a incursão de água salina estuário acima devido à ação da maré. Os efeitos da geometria do estuário, do período de maré e da vazão de água doce pode alterar significativamente a intrusão salina no estuário (YOON AND WOO, 2015). A intrusão salina em rios estuarinos tem sido um dos principais problemas presentes em corpos d'água costeiros (ETEMAD-SHAHIDI *et al*., 2015).

Nos corpos d'água urbanos, a intrusão salina afeta diretamente a qualidade da água e pode impactar os seus diversos usos, como captação para abastecimento público ou industrial (SAVENIJE, 2012). Nas últimas décadas, o crescimento populacional das cidades em regiões estuarinas fez com que aspectos de qualidade da água e disponibilidade de recursos hídricos fossem cada vez mais importantes.

Outro problema comum em rios urbanos diz respeito às inundações. Dentre as alternativas convencionais usualmente empregadas em intervenções estruturais destinadas a mitigar os problemas relacionados às inundações, o desassoreamento de trechos específicos para ampliação da calha é uma opção recorrente (TRAVASSOS, 2010). Esta alternativa tem por objetivo aumentar a capacidade de descarga de cursos d´água, tanto devido à mudança de declividade, como pelo aumento de sua seção transversal, reduzindo assim a probabilidade de ocorrências de extravasamento da calha.

Entretanto, deve-se considerar os impactos ambientais decorrentes do desassoreamento dos rios, principalmente daqueles localizados em áreas estuarinas. A remoção de sedimentos do leito do

rio pode alterar a dinâmica de salinidade, consequentemente afetar a qualidade da água e seus múltiplos usos. Simulações e análises com o objetivo de verificar as alterações na salinidade decorrentes do desassoreamento são importantes para auxiliar no processo de tomada de decisão no uso dos recursos hídricos em rios urbanos.

Ji (2017) afirma que para a maioria dos rios pequenos e rasos, modelos unidimensionais são geralmente adequados para simular processos hidrodinâmicos e de qualidade da água. Em modelos 1-D, o nível da água, a velocidade de escoamento e a vazão apresentam apenas variação longitudinal e são constantes nas direções laterais. Esta abordagem fornece uma representação matemática simples e eficaz do escoamento de rios.

O Rio Cubatão, localizado na cidade de Cubatão, São Paulo, é um rio que pertence ao sistema estuarino de Santos e seu trecho urbano é afetado pela maré. Por ser uma região com área urbana consolidada e ter um complexo industrial, o Rio Cubatão exerce uma função muito importante de abastecimento de água, sendo imprescindível analisar parâmetros de qualidade da água, como a salinidade. Em um possível cenário de desassoreamento de trechos do rio para combater as inundações urbanas, é necessário entender as mudanças na dinâmica de intrusão salina para auxiliar nos processos de tomada de decisão para os múltiplos usos da água.

Este artigo tem como objetivo simular e analisar a intrusão salina no Rio Cubatão em cenários sem desassoreamento (atual) e com desassoreamento (alternativo) do rio em situações de maré alta e maré baixa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia do Rio Cubatão está localizada entre a região metropolitana de São Paulo e a cidade de Santos, com uma área de 177 km². É o rio mais importante da região por abastecer a cidade de Cubatão e o complexo industrial local (PINTO, 2015). Seu trecho urbano tem aproximadamente 11,4 km e divide a cidade em duas paisagens distintas: na margem esquerda, há uma paisagem majoritariamente industrial, enquanto que na margem direita, uma área urbana consolidada.

O principal tributário do Rio Cubatão é o Rio Perequê, em sua margem esquerda. Neste estudo, a extensão considerada do Perequê foi de 3,7 km. No fim do trecho urbano, o Rio Cubatão encontra o Rio Mogi e segue em direção à baia de Santos. Neste estudo, a extensão considerada do Rio Mogi foi de 7,2 km (Figura 1).

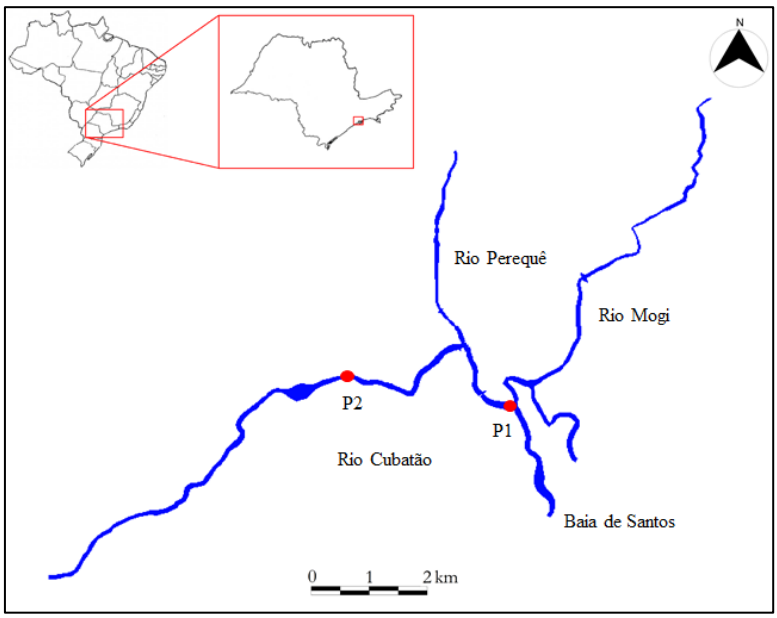

Figura 1 – Área de estudo e pontos de monitoramento.

Trabalho de campo e dados obtidos

A cartografia e os elementos topográficos foram obtidos através de levantamento planialtimétricos, fotos aéreas ortorretificadas e plantas cadastrais. O trabalho de campo foi feito entre 03 de novembro de 2016 e 04 de março de 2017. Após a instalação dos sensores, foram feitas visitas mensais para coleta de dados e manutenção dos equipamentos.

A concentração de salinidade foi medida a cada 10 minutos em dois pontos de monitoramento. No primeiro ponto (P1), a salinidade foi medida em três profundidades diferentes na coluna d'água: próximo à superfície, no meio e próximo ao leito do rio. Em P1 também foi medida a variação do nível do rio, influenciado pela maré, a cada 10 minutos. No segundo ponto (P2), a salinidade foi medida em apenas na profundidade do meio da coluna d'água. O equipamento para medir salinidade foi o condutivímetro HOBO Salt Water Salinity Data Logger - U24-002-C (Figura 1).

Descrição do modelo hidrodinâmico

Neste trabalho foi usado o modelo hidrodinâmico unidimensional HEC-RAS 5.0.3, desenvolvido pela U.S. Army Corps of Engineers (USACE). É um software livre com interface acessível, atualizações periódicas e aplicação em modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água em rios (QUIROGA *et al.*, 2016). Em seu modulo de qualidade da água, o HEC-RAS pode executar simulações considerando escoamento negativo, como observados em estuários durante a maré de enchente.

O modelo HEC-RAS resolve a equação unidimensional de Saint Vernant usando o método de diferenças finitas implícito com discretização ponderada no tempo (HORRITT AND BATES, 2002). As equações abaixo representam os fenômenos físicos modelados, quais sejam a conservação da massa e da quantidade de movimento.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi Q}{\partial x_c} + \frac{\partial (1-\phi)}{\partial x_f} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_c}\left(\frac{\phi^2 Q^2}{A_c}\right) + \frac{\partial}{\partial x_f}\left(\frac{(1-\phi)^2 Q^2}{A_f}\right) + gA_c\left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_c\right) + gA_f\left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_f\right) = 0 \qquad (2)$$

$$\phi = \frac{K_c}{K_c + K_f} \qquad \text{onde } K = \frac{A^{5/3}}{nP^{2/3}} \qquad (3)$$

$$Sc = \frac{\phi^2 Q^2 {n_c}^2}{{R_c}^{4/3}{A_c}^2} \qquad Sf = \frac{(1-\phi)^2 Q^2 {n_f}^2}{{R_f}^{4/3}{A_f}^2} \qquad (4)$$

Nestas equações, Q é a vazão; A_c é a sessão transversal do canal; A_f é a sessão transversal da planície de inundação; x_c é a distância longitudinal do canal; x_f é a distância longitudinal da planície de inundação; P é o perímetro molhado; R é o raio hidráulico; n é o número de Manning e S é a declividade. ϕ indica como o escoamento é dividido entre o canal e a planície e k_c e k_f são fatores de troca entre o rio e a planície.

Condições de contorno

O desassoreamento das seções do Rio Cubatão foi considerado de modo a manter a inclinação dos taludes das margens atuais com uma configuração trapezoidal de forma a preservar sua estabilidade, alterando-se o fundo da seção até a cota desejada. Os trechos escolhidos para alteração do leito foram designados por Ta a Te e podem ser vistos na Figura 2.

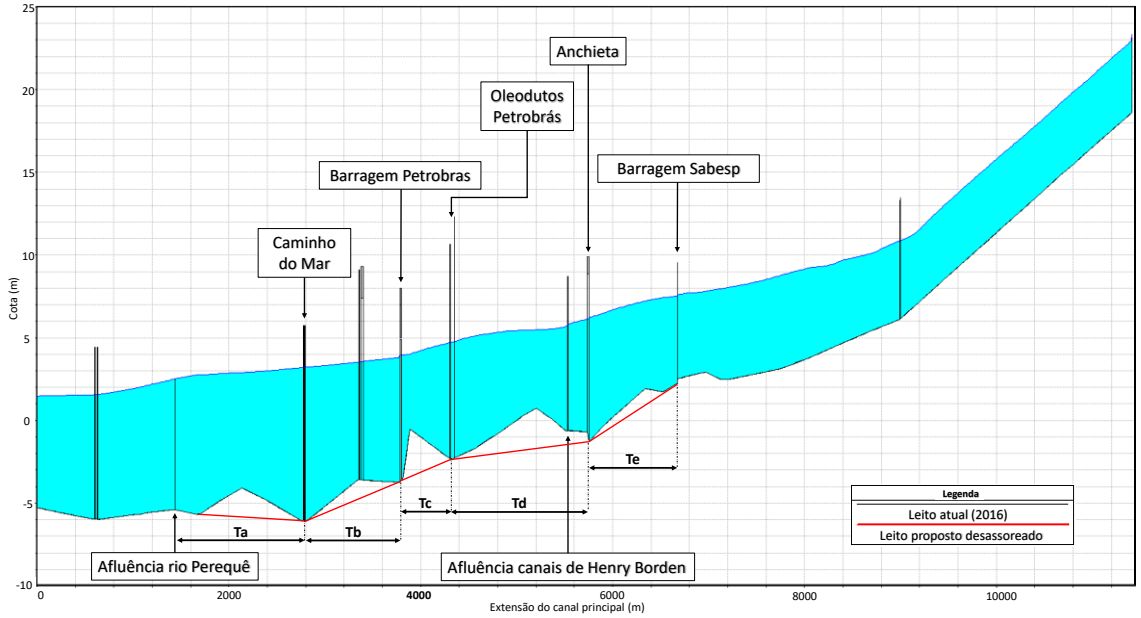

Figura 2 – Trechos de desassoreamento.

Foram simuladas duas condições hidráulicas no modelo HEC-RAS, uma considerando a batimetria atual do rio Cubatão e outra considerando o desassoreamento dos trechos propostos. As condições hidrológicas como as vazões afluentes (condição de contorno de montante) e nível de maré (condição de contorno de jusante) foram as mesmas para os dois cenários, com o intuito de comparar e avaliar os resultados.

Portanto as simulações foram realizadas para dois cenários:

- Cenário 1: atual (sem desassoreamento);
- Cenário 2: alternativo (com desassoreamento).

A simulação no Cenário 1 foi realizada para compreender o alcance e a intensidade da intrusão salina na situação em que o rio se encontra atualmente, independente da proposição de intervenção. A simulação do Cenário 2, por sua vez, foi feita para analisar os impactos na intrusão salina diante de uma situação de desassoreamento do rio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações permitiram verificar como a intrusão salina se comporta no Rio Cubatão, sendo influenciada majoritariamente pelo efeito de maré. Para comparação, foram escolhidos dois

instantes, um com a maré baixa (04 de novembro de 2016, às 11:00) e outro com a maré alta (08 de novembro de 2016, às 11:00). Foi possível constatar alterações significativas na dinâmica da salinidade nos cenários sem desassoreamento e com desassoreamento ao longo do trecho estudado (Figura 3).

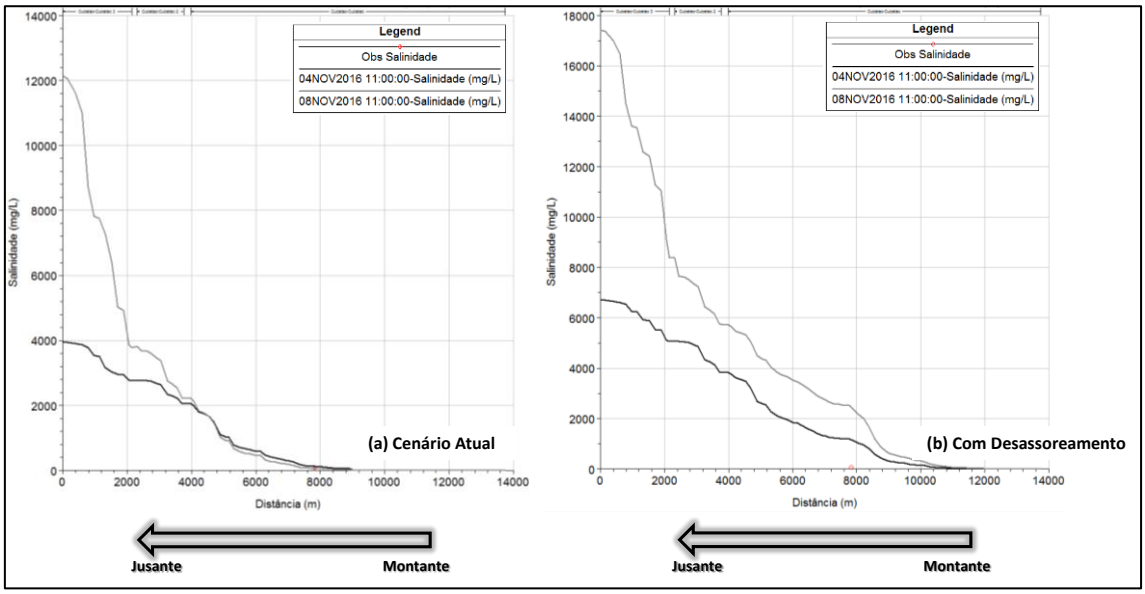

Figura 3 – Intrusão salina. 3a. Cenário 1. 3b. Cenário 2.

A Figura 3 mostra os resultados do comportamento da salinidade ao longo do rio Cubatão no Cenário 1 (Figura 3a) e no Cenário 2 (Figura 3b). Ao comparar os cenários, nota-se que a intrusão salina no trecho aumenta significativamente, isso acontece tanto para as marés baixas quanto para as marés altas. Ao observar o comportamento da salinidade na maré alta, no Cenário 1 a concentração salina máxima é de 12100 mg/L, enquanto que no Cenário 2 essa salinidade chega a 17400 mg/L, representando um aumento de 43,8%. Ao realizar a mesma comparação para a maré baixa, o Cenário 1 apresenta salinidade máxima de 3940 mg/L, enquanto que no Cenário 2 a salinidade máxima chega a 6710 mg/L, representando um aumento de 70,1%.

Além disso, enquanto que no Cenário 1 a intrusão salina atinge uma distância aproximada de 9000 metros a montante do rio Cubatão, no Cenário 2 o alcance da intrusão salina é maior, podendo alcançar até 12000 metros a montante, representando um aumento de mais de 30% no alcance da intrusão salina no rio.

Esse comportamento fica mais visível ao comparar os dois cenários de maré alta ilustrados na Figura 4. No Cenário 1, nota-se que a salinidade no ponto mais a jusante não chega a atingir valores superiores a 15000 mg/L enquanto que no Cenário 2 essa salinidade de entrada é superior a 15000

mg/L. Na confluência do rio Perequê com o rio Cubatão a salinidade está entre 1.000 mg/L e 3.000 mg/L e à montante atinge valores próximos a 0 mg/L ainda no trecho urbano de Cubatão (Cenário 1). Já no Cenário 2, o trecho de confluência do rio Perequê com o rio Cubatão a salinidade está entre 5.000 mg/L e 8.000 mg/L e no trecho urbano a salinidade apresenta valores acima de 3.000 mg/L.

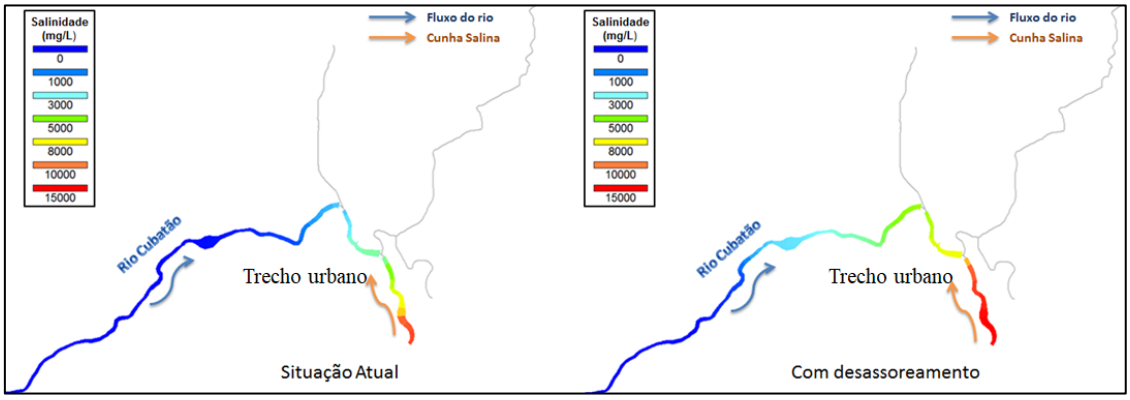

Figura 4 – Intrusão salina na maré alta.

Este aumento significativo das concentrações de salinidade em um cenário de desassoreamento dos trechos do Rio Cubatão pode causar impactos na gestão das águas, principalmente no que diz respeito à captação para abastecimento público ou industrial, visto que todo o trecho urbano do rio seria fortemente impactado. Vale ressaltar que em rios estuários, nas quais a maré tem influência direta na hidrodinâmica e transporte de sal, aprofundar trechos onde o talvegue encontra-se em cotas inferiores aos níveis alcançados pela variação do nível do mar, pode não ter validade para aumento da capacidade hidráulica do rio, uma vez que o volume disponibilizado pela escavação será ocupado pela água proveniente do mar, podendo não haver o esperado ganho na capacidade de condução das vazões, principalmente em eventos de cheia.

CONCLUSÃO

O desassoreamento de rios estuarinos, mesmo sendo apresentado como uma alternativa possível para reduzir os impactos das inundações, precisa ser analisado não apenas pelo aspecto hidrodinâmico e de suposto ganho de capacidade hidráulica do rio, como também pelo aspecto de qualidade da água os possíveis impactos causados pela alteração batimétrica do leito do rio.

A modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água em rios urbanos é de grande importância para o processo de tomada de decisão e para garantir os múltiplos usos da água. No caso do Rio

Cubatão, a simulação de cenários hidrodinâmicos identificou que o comportamento da intrusão salina seria significativamente impactado em um possível cenário de desassoreamento do rio, principalmente em períodos de maré alta, aumentando a salinidade no trecho urbano, apresentando um risco para a captação de água para abastecimento público e industrial.

REFERÊNCIAS

BARRAGÁN, J. M.; ANDRÉS, M. (2015).*Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations.* Ocean & Coastal Management, v. 114, p. 11-20.

ETEMAD-SHAHIDI, A.; ROHANI, M. S.; PARSA, J.; LEMCKERT, C. (2015). *Effects of sea level rise on the salinity of Bahmanshir estuary.* International Journal of Environmental Science and Technology, v. 12, p. 3329-3340.

HADDOUT, S.; IGOUZAL, M.; MASLOUHI, A. (2016). *Analytical numerical study of the salinity intrusion in the Sebou river estuary (Morroco) – effect of the "Super Blood Moon" (total lunar eclipse) of 2015.* Hydrology and Earth System Sciences, v. 20, p. 3923-3945.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. (2002). *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation*. Journal of Hydrology, v. 268, p. 87-99.

JI, Z.-G. (2017). *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. John Wiley & Sons. ISBN 1118877152.

MIRANDA, L. B.; DE CASTRO, B. M.; KJERFVE, BJORN. (2012). *Princípios de Oceanografia Física de Estuários.* São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2 ed.

PINTO, C. S. (2015). *Paisagem Industrial em Cubatão-SP: O caso da Companhia Fabril e da Usina de Henry Borden*. 2015. 197 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Distrito Federal.

QUIROGA, V. M.; KURE, S.; UDO, K.; MANO, A. (2016). *Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5*. Revista Iberoamericana del Agua, v. 3, p. 25-33.

SAVENIJE, H. H. G. (2012). *Salinity and tides in alluvial estuaries.* Delft University of Technology, 2 ed.

TRAVASSOS, L. R. F. C. (2010). *Revelando Rios: Novos paradigmas para a intervenção em fundos de vale urbanos na Cidade de São Paulo*. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência ambiental – Universidade de São Paulo. Orientadora: Marta Dora Grostein.

YOON, B. I.; WOO, S. (2015). *The Along-channel Salinity Distribution and its Response to River Discharge in Tidally-dominated Han River Estuary, South Korea*. Procedia Engineering, v. 116, p. 763-770.