

RESSALVA

Atendendo a solicitação da autora, o texto completo desta **Dissertação de Mestrado** será disponibilizado somente a partir de **12/09/2020**.

**CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA
CIRCULAÇÃO DO SISTEMA ESTUARINO DO RIO
GUARATUBA (BERTIOGA - SP)**

JÉSICA DANIELA FEY

**SÃO VICENTE – SP
2019**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Biociências
Câmpus do Litoral Paulista

CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA
CIRCULAÇÃO DO SISTEMA ESTUARINO DO RIO
GUARATUBA (BERTIOGA - SP)

ALUNA: JESICA DANIELA FEY

ORIENTADOR: DR. ROBERTO FIORAVANTI CARELLI FONTES

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências,
Câmpus do Litoral Paulista, UNESP, para obtenção
do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação
em Biodiversidade de Ambientes Costeiros.

**SÃO VICENTE – SP
2019**

F433c Fey, Jésica Daniela
Caracterização e modelagem hidrodinâmica da
circulação do sistema estuarino do rio Guaratuba (Bertioga
- SP) / Jésica Daniela Fey. -- São Vicente, 2019
70 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Biociências, São Vicente
Orientador: Roberto Fioravanti Carelli Fontes

1. Oceanografia dos estuários. 2. Hidrodinâmica. 3.
Modelos matemáticos. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA CIRCULAÇÃO DO SISTEMA ESTUARINO DO RIO GUARATUBA (BERTIOGA - SP)

AUTORA: JÉSICA DANIELA FEY

ORIENTADOR: ROBERTO FIORAVANTI CARELLI FONTES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em BIODIVERSIDADE DE AMBIENTES COSTEIROS, área: Biodiversidade pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ROBERTO FIORAVANTI CARELLI FONTES
Instituto de Biociências - Campus do Litoral Paulista / UNESP


Prof. Dr. FRANCISCO SEKIGUCHI DE CARVALHO E BUCHMANN
Instituto de Biociências - Campus do Litoral Paulista / UNESP


Dra. ADRIENE FERREIRA PEREIRA
Hidromares Projetos Ambientais, Aquáticos e Atmosféricos

São Vicente, 12 de março de 2019

*Ao meu irmão, Rodolfo Christian Fey,
quem tem alma e curiosidade de cientista...*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Roberto Fontes (Bob), pelo aceite em orientar este trabalho, pelos anos de ensinamentos, conversas, e parecerias, e pela força de sempre.

À Dra. Adriene Pereira, ao Dr. Francisco Buchmann, à Dra. Milene Fornari e ao Dr. Gilberto Peçanha Ribeiro, pelo tempo e atenção disponibilizados e pelas considerações de valor inestimável feitas tanto durante a defesa da minha dissertação quanto durante o exame de qualificação. Vossas contribuições foram extremamente importantes para um melhor direcionamento e desenvolvimento do trabalho.

À equipe do Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade Santa Cecília (NPH-Unisantia: Alexandra Sampaio, Renan Ribeiro e Matheus Ruiz), pelos dados de maré cedidos para este trabalho, e em especial ao Renan, pela amizade, pelas conversas e pela boa disposição para ajudar, sempre.

Ao MSc Kleber Baraldo pelos dados de batimetria, margens e outros dados utilizados neste trabalho.

Ao meu companheiro de aventuras, amor da minha vida e em breve, sr. marido, Bocinha, por embarcar junto nesta, e em todas as outras aventuras da vida, e segurar minha mão sempre que os ventos sopram forte e agitam as águas! Pelos belos amanheceres e pores do sol passeando de barco na Riviera (vulgas coletas) e pela ajuda em todas as fases do trabalho, que estamos fazendo juntos desde 2016.

Aos meus pais, Cristina e Rodolfo, incondicionais sempre, e que mesmo longe sempre dão um jeito de ajudar ou nos alegrar os dias. Vocês são o meu orgulho e exemplo!

Aos amigos Tan e Chico, me ajudar a achar o rumo da minha pesquisa novamente em várias ocasiões, pela amizade e pelas viagens pelo espaço e pelo tempo...

Às minhas amigas Roberta e Vanessa, parceiras desde que entrei na pós, pela amizade e apoio, dentro e fora da faculdade. Valeu pelas risadas no dia a dia, gatas!

Ao Caio, Sinhá e Ana Silvia, com quem compartilhei várias disciplinas e trabalhos, e dos que aprendi muitas coisas além do conteúdo das matérias.

Aos biólogos amigos de Bertiooga (Catotinha, Cala e Satu), que sempre receberam a gente de portas e corações abertos.

Ao meu amigo Gastón, quem como 7 anos atrás, mais uma vez esteve aí na reta final, me ajudando com as batalhas do dia a dia, para que eu possa sentar e concluir o meu trabalho em paz, gracias pibe!

Ao grupo de Facebook dos Bolsistas CAPES, do qual participam muitos outros alunos-pesquisadores, por compartilhar experiências de vida, inquietudes, dicas e piadas, e fazer mais leve a passagem pela pós-graduação.

Ao Sci-Hub, fundado pela neurocientista Alexandra Asanovna Elbakyan, por colaborar a que a ciência seja acessível para todos. O seu trabalho tem um valor imensurável!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

Estuários são ambientes aquáticos de transição entre o continente e o oceano com características únicas, ecológica e economicamente importantes. São condicionados por diversas forçantes naturais e compartilham contribuições terrestres e marinhas. Os principais métodos para estudo hidrodinâmico desses ambientes baseiam-se na análise dos processos de advecção e de mistura das massas de água, gerados pela dinâmica das marés e das descargas dos rios. O presente estudo visa a caracterização hidrodinâmica do estuário do rio Guaratuba (Bertioga, SP) durante as marés de sizígia e de quadratura, a partir de levantamentos hidrográficos realizados com ADCP e CTD e o desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico computacional capaz de explicar e simular os processos oceanográficos deste estuário. Os resultados apontaram que, tanto a maré quanto a descarga fluvial têm a capacidade de alterar as vazões e os padrões de salinidade e temperatura no estuário. Em condições de precipitação médias ou na ausência de precipitações, a maré é a forçante dominante do sistema. Durante os períodos de sizígia ocorrem o aumento da turbulência e da mistura vertical. Nas quadraturas, quando as velocidades de corrente são menores, a estratificação vertical é mais estável, e a água salina incursiona até pontos mais internos do estuário. Precipitações na sub-bacia tem relação direta e imediata com o aumento da vazão, afetando a dinâmica e intensificando a estratificação vertical do estuário. O estuário do rio Guaratuba pode ser enquadrado como do tipo A, B ou D, dependendo das condições de maré e vazão. Os modelos gerados contribuíram para o melhor entendimento dos fenômenos atuantes e da dinâmica do sistema estuarino. Os resultados do presente trabalho trazem informações inéditas sobre o comportamento hidrodinâmico do estuário do Rio Guaratuba durante marés de quadratura e podem ser utilizados pelos gestores e tomadores de decisão para orientar o uso sustentável desse ambiente, no que tange ao gerenciamento costeiro e de recursos hídricos.

Palavras-chave: pluviosidade, vazão, estratificação da salinidade, dinâmica estuarina, Delft-3D, Parque Estadual Restinga de Bertioga

ABSTRACT

Estuaries are transitional aquatic environments, with unique characteristics, ecologically and economically important. They are conditioned by several natural forcings and share land and marine contributions. The main methods to study these environments are based on the analysis of the water masses advection and mixing processes, that are generated by tides and river discharges. The purposes of this study are the hydrodynamic characterization of the Guaratuba's estuary (Bertioga, SP) during spring and neap tides, based on ADCP and CTD hydrographic surveys, and the development of a computational hydrodynamic model using Delft-3D software, that helps to explain and simulate the main estuarine oceanographic processes. We observed that both, tide and river discharges, have the capacity to alter water flow, as well as salinity and temperature patterns in the estuary. Under mean precipitation conditions or in its absence, tide forces dominate the system. During the spring tide floods, turbulence and vertical mixing increase. During the neap tide floods, when current speed decreases, vertical stratification remains more stable, and saline water penetrates more along the upper estuary. Precipitation episodes in the sub-basin are direct and immediate related to water flow increase, and affect currents dynamics intensifying vertical stratification in the estuary. The Guaratuba estuary is classified as type A, B or D; depending on tidal and river flow conditions. The models we generated contributed to understanding active phenomena and the dynamics of the estuarine system. The results of the present study provide valuable new information on the estuarine hydrodynamic behavior during neap tides, and might be used by managers and decision makers to guide the sustainable use of this environment, regarding coastal and water resources management.

Keywords: precipitation, water flow, salinity stratification, estuarine dynamics, Delft-3D, Restinga de Bertioga State Park

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3-1-Localização da área de estudo (estuário) e a rede de drenagem da sub-bacia do rio Guaratuba (Fonte: VM Engenharia, Google Earth® 2018). _____ 26
- Figura 3-2- Delimitação das Unidades de Conservação dentro do município de Bertioga, SP. (Fonte: <http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs/dados-georreferenciados>). _____ 28
- Figura 3-3- Afluentes do estuário do rio Guaratuba e localização do condomínio nas margens do rio Vermelho (Fonte: Google Earth®, 2018). _____ 29
- Figura 4-1-Pontos para estimativa da vazão a partir do método de Regionalização da Vazão do Estado de São Paulo. _____ 31
- Figura 4-2-Localização das seções transversais para medição da vazão, sobrepostas à batimetria do rio Guaratuba. _____ 34
- Figura 4-3-Embarcação com motor 5Hp, com trimarã rebocado utilizada para os levantamentos; b) Trimarã com transdutor e receptor/transmissor (black box); c) transdutor dentro da água. _____ 35
- Figura 4-4-Captura de tela do programa *RiverSurveyor*. A janela superior esquerda mostra a vista superior do transecto e os vetores de velocidade de corrente. A janela inferior esquerda representa a seção transversal dividida em pixels de acordo com a profundidade. Os tons de azul representam a velocidade de corrente para cada ponto (y, z) da seção. A janela direita exemplifica os relatórios de vazão gerados a partir dos levantamentos. _ 36
- Figura 4-5-Medição realizadas com CTD em campo. _____ 37
- Figura 4-6-Pontos para representação da estratificação vertical de salinidade, localizados a 2,13; 6,73 e 8,85 km da foz. _____ 38
- Figura 4-7-Representação das grades utilizadas no modelo. Azul: domínio principal (GUA); Cinza: domínios auxiliares (PM e RV); Verde: domínio costeiro (GC); Magenta: contornos compartilhados na confluência dos tributários. _____ 39
- Figura 4-8- A) Domínios GUA e PM na região da confluência (contorno compartilhado indicado em magenta), com batimetria em formato matricial. Observa-se que no domínio PM foi necessário acrescentar valores de profundidade manualmente; B) Batimetria interpolada em cada domínio; C) Batimetria suavizada, com valores de profundidade não coincidentes no contorno de confluência; D) Batimetria editada para coincidência dos valores de profundidade no contorno compartilhado. _____ 40

- Figura 4-9- Contornos abertos das grades que compõem o modelo computacional. As setas azuis unidirecionais indicam entrada de água doce pelos tributários do sistema, enquanto que a seta verde indica o contorno forçado pela maré. _____ 42
- Figura 5-1- Precipitação mensal (mm). Os valores correspondem aos anos 2017 e 2018. Barras com preenchimento sólido correspondem aos meses das coletas (Fonte: CEMADEN). 45
- Figura 5-2- Precipitação diária para os dias de coleta e dias anteriores, e valores de vazão medidos (preto) ou estimados (branco) para o rio Guaratuba durante a maré vazante. 46
- Figura 5-3- Imagem tomada durante a realização da campanha 1. Chuvas no estuário durante a realização da coleta. _____ 47
- Figura 5-4- Imagem tomada durante a realização da campanha 6. Céu encoberto e precipitações na Serra do mar. Não se registraram chuvas no estuário durante a campanha. _____ 47
- Figura 5-5- Margem erosiva da seção S4. A seta vermelha indica a altura do nível alcançado pela água, evidenciando a erosão do barranco. A seta amarela indica queda recente de vegetação marginal (ainda com folhas verdes nos galhos) devido à erosão do substrato. _____ 48
- Figura 5-6- Banco de areia depositado nos dias anteriores à coleta, com marcas de descarga fluvial evidenciada por marcas de ondulação formadas por correntes (*sand ripples*, setas amarelas) aproximadamente 50 cm acima do nível máximo da maré cheia durante a campanha (seta vermelha). Ao fundo da imagem (seta azul), observa-se um banco de gramíneas soterrado pelo sedimento. _____ 49
- Figura 5-7- Confluência do rio Guaratuba (marrom claro, aspecto leitoso), evidenciando transporte de sedimentos em suspensão, com o Rio Vermelho (marrom escuro). ____ 49
- Figura 5-8- Imagem tomada durante a realização da campanha 7, evidenciando assoreamento da seção S7. Setas amarelas indicam os limites aproximados da seção. _____ 50
- Figura 5-9- Interpolação dos valores de salinidade medidos no estofo das marés cheias de sizígia. O eixo horizontal representa a distância linear da foz do estuário, enquanto o eixo vertical representa a profundidade do talvegue. _____ 55
- Figura 5-10- Interpolação dos valores de salinidade medidos no estofo das marés cheias de quadratura. O eixo horizontal representa a distância linear da foz do estuário, enquanto o eixo vertical representa a profundidade do talvegue. _____ 56
- Figura 5-11- Localização dos pontos correspondentes aos perfis individuais representados (sup.); Perfis de salinidade (inf.): azul: próximo à foz; verde: zona de mistura; vermelho: zona do rio. _____ 57

Figura 5-12-Comparação entre a altura da maré, a amplitude da maré e a vazão durante as coletas de sizígia. _____	59
Figura 5-13-Comparação entre a altura da maré, a amplitude da maré e a vazão durante as coletas de sizígia. _____	60
Figura 5-14-Valores de temperatura interpolados ao longo de uma seção longitudinal (talvegue) do estuário durante os estofos das marés altas nas campanhas de sizígia. _____	60
Figura 5-15-Valores de temperatura interpolados ao longo de uma seção longitudinal (talvegue) do estuário durante os estofos das marés altas nas campanhas de sizígia. _____	61
Figura 5-16 Salinidade vs. temperatura dos perfis de CTD realizados ao longo do estuário. As cores representam a distância da foz do perfil realizado. _____	62
Figura 5-17- Variação do nível do mar durante o período do modelo durante a C1 (sizígia), em três pontos do estuário: No rio Guaratuba, próximo a foz do estuário, e na Grade Costeira ao longo do período da simulação (sup). Detalhe da variação do nível do dia anterior e do dia da coleta (inf). _____	64
Figura 5-18- Variação do nível do mar durante o período do modelo durante a C3 (quadratura), em três pontos do estuário: No rio Guaratuba, próximo a foz do estuário, e na Grade Costeira ao longo do período da simulação (sup). Detalhe da variação do nível do dia anterior e do dia da coleta (inf). _____	65
Figura 5-19- Resultados dos modelos. O eixo horizontal representa a distância linear da foz do estuário, enquanto que o eixo vertical representa a profundidade na seção longitudinal (M=4). _____	66
Figura 5-20- Representação gráfica dos valores do número de Richardson para a seção longitudinal central do estuário, das simulações 1 a 4. Valores menores a 0,25 indicam locais onde a turbulência sobrepuja a estratificação de densidade gerando mistura vertical. Valores maiores indicam locais onde há estratificação. _____	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1-Pontos para cálculo da vazão a partir da Regionalização hidrológica. _____	31
Tabela 4-2-Dimensões e resolução das grades utilizadas para compor o modelo e localização dos contornos compartilhados na grade principal. _____	40
Tabela 4-3- Períodos das simulações. _____	41
Tabela 4-4- Valores das condições iniciais de temperatura e salinidade para o domínio GUA nas diferentes simulações. _____	41
Tabela 5-1- Datas das campanhas realizadas. _____	45
Tabela 5-2- Precipitação anual acumulada para os anos de 2017 e 2018, comparada com a média histórica e a precipitação registrada durante o período das coletas, para a Estação Praia do Guaratuba. _____	46
Tabela 5-3- Vazão média plurianual, precipitação anual média e área da bacia à montante dos pontos localizados na desembocadura dos rios GUA, PM e RV no estuário, na confluência do GUA e RV e na foz do estuário. _____	51
Tabela 5-4- Valores de vazão utilizados para entrada do modelo. Os valores para o Rio Guaratuba correspondem aos medidos em campo; os valores de vazão para PM e RV foram determinados aplicando um fator de correção de 0,41 para o PM e 0,68 para o RV. (*) indica valores estimados por comparação. _____	51
Tabela 5-5- Valores de vazão (m ³ /s) calculados a partir das medições realizadas em campo, na enchente e na vazante para as seções S1 a S8. _____	52
Tabela 5-6-Valores de declinação magnética, temperatura e salinidade média utilizados para correção dos dados de correntometria. _____	53
Tabela 5-7- Classificação do estuário do rio Guaratuba, segundo Pritchard (1955) e Officer (1977). _____	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP: *Acoustic Doppler Current Profiler* (Perfilador acústico de corrente - Doppler)

AE: Altamente estratificado (estuário)

BM: Bem misturado (estuário)

C: Campanha (1 a 8)

CEMADEN: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CLP: Campus do Litoral Paulista (UNESP)

CS: Cunha salina

CTD: *Conductivity, Temperature and Depth* (Perfilador instantâneo de salinidade, temperatura e pressão da água)

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica

ECOMSED: *Estuarine and Coastal Ocean Model*

EEAB: Estação Elevatória de Água Bruta (SABESP)

GC: Grade costeira

GEBCO: *General Bathymetric Charts of the Oceans*

GPS: *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

GUA: Rio Guaratuba

HYCOM: *Hybrid Coordinate Ocean Model*

IB-UNESP: Instituto de Biociências (UNESP)

MD: Margem direita

ME: Margem esquerda

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NPH-UNISANTA: Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas (UNISANTA)

PESM: Parque Estadual da Serra do Mar

PERB: Parque Estadual Restinga de Bertiooga

PM: Rio Perequê-Mirim

PMs: Parcialmente misturado (estuário)

POM: Princeton Ocean Model

RJ: Rio de Janeiro (Estado)

RV: Rio Vermelho

S: Seção (1 a 7)

SABESP: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

Sim: Simulação (1 a 8)

SisBAHIA: Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

SP: São Paulo (Estado)

SPAT: Sistema Produtor do Alto Tietê

TIN: *Triangular Irregular Network* (Interpolação triangular)

UC: Unidade de Conservação

UERJ: Universidade do Estado do Rio de Janeiro

UGRHI: Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UNESP: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

UNISANTA: Universidade Santa Cecília (Santos, SP)

UTC: Universal Time Coordinated (Tempo Universal Coordenado)

UTM: Universal Transverso de Mercator

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	13
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS.....	25
3. ÁREA DE ESTUDO.....	26
4. MÉTODO.....	30
Caracterização do estuário	30
Pluviosidade.....	30
Estimativa da vazão no estuário.....	30
Altura do nível do mar.....	32
Batimetria e margens	33
Medições de vazão	33
Processamento dos dados.....	35
Caracterização física do estuário.....	36
Levantamento de dados em campo	36
Processamento dos dados.....	37
Modelo computacional.....	38
Elaboração de grades	38
Interpolação da batimetria.....	40
Elaboração do modelo: Ingresso de dados.....	41
Interpretação dos resultados modelados	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
Caracterização do estuário	45
Pluviosidade.....	45
Estimativa da vazão no estuário.....	50

Medições de vazão	52
Caracterização física do estuário.....	55
Salinidade e temperatura	55
Classificação do estuário.....	63
Resultados do modelo computacional.....	64
6. CONCLUSÕES.....	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICE	76
Apêndice 1:	76
Apêndice 2	84
Apêndice 3	92
Apêndice 4:	94
ANEXO	96
Anexo 1	96
Rio Guaratuba.....	96
Rio Perequê-Mirim	99
Rio Vermelho	102
Confluência rio Guaratuba e rio Vermelho	105
Foz do Estuário	108

1. INTRODUÇÃO

Estuários são ecossistemas de transição entre o continente e o oceano, onde rios encontram o mar, resultando na diluição mensurável da água salgada, no sentido estuário acima (PRITCHARD, 1967). Segundo Dyer (1997), são corpos d'água costeiros semifechados, com ligação livre com o oceano aberto, que se estendem rio acima até o limite da influência da maré. A água doce em seu interior é oriunda da drenagem continental e dilui a água do mar que excursiona o estuário, por ocasião da maré enchente. São ambientes altamente dinâmicos, condicionados por diversas forçantes naturais, como a vazão dos rios e a intensidade das marés (PRITCHARD, 1967). Os fenômenos no interior dos estuários variam em escalas espaciais de dimensões microscópicas até seus limites geomorfológicos. As escalas temporais variam desde frações de segundo, algumas horas e até períodos decadais ou milenares (MIRANDA *et al.*, 2002).

Existem diferenças significativas entre estuários ou entre partes específicas de um sistema estuarino, sendo a distribuição de salinidade característica para cada um. Segundo Dionne (1963) e Fairbridge (1980), um corpo de água estuarino pode ser dividido em três setores: **estuário superior ou fluvial**, caracterizado pela água doce, mas ainda sujeito à influência da maré dinâmica e com valores de salinidade inferiores a $S < 0,5$; **estuário médio ou zona de mistura**, sujeito à intensa mistura da água do mar com a água doce da drenagem continental, e **estuário inferior ou marinho**, com ligação livre com o oceano aberto e que se estende até a frente da pluma estuarina, onde a salinidade é bem próxima à da água do mar.

Segundo Pritchard (1955) é possível classificar os estuários de acordo com a estratificação vertical de salinidade, na zona de mistura. Essa classificação estabelece quatro tipos principais de estuários: **Cunha salina** (Tipo A): verticalmente bem estratificados e sendo desprezível a mistura por difusão turbulenta das camadas de água. Nesses estuários, onde a amplitude da maré não supera os 2 m [micromaré (DAVIES, 1964)], a circulação é dominada pela descarga fluvial e o movimento da camada superficial estuário abaixo é contínuo, aumentando progressivamente sua salinidade; **Estuários moderada ou parcialmente misturados** (Tipo B): possuem energia de maré suficientemente elevada para produzir turbulência, havendo troca eficiente entre a água salgada e a água oriunda do rio. Podem ocorrer movimentos em sentidos opostos entre as camadas superficiais e profundas, permitindo o ingresso de água do mar pelas camadas inferiores e criando gradientes verticais moderados de salinidade. A intensificação ou relaxamento da estratificação vertical de salinidade nesse tipo

de estuário depende da variação quinzenal da maré, entre as fases de sizígia e de quadratura; **Estuários verticalmente misturados** (Tipos C e D): caracterizados por águas bem misturadas. Os processos de mistura ocorrem longitudinalmente ao estuário, com fluxo vertical da salinidade desprezível (DYER, 1997). Nesses estuários, a difusão turbulenta está geralmente associada ao atrito com o fundo e irregularidades batimétricas de canais geralmente rasos (Tipo D). Os estuários Tipo C apresentam uma razão largura/profundidade grande, podendo ocorrer estratificação lateral ocasionada pelo efeito de Coriolis.

Uma classificação alternativa que estabelece critérios de estratificação melhor definidos é a sugerida por Officer (1977), que classifica os estuários em: **Cunha salina (CS)**: interfaces distintas entre a água doce e a do mar, com fluxo de água pouco salina na camada superficial, sendo o entranhamento (transferência de água da camada inferior para a camada superior) o processo dominante; **Altamente estratificado (AE)**: acentuada estratificação vertical, com diferença de várias unidades entre a camada superficial e a do fundo; **Parcialmente misturado (PMs)**: estratificação moderada da salinidade, com diferenças de poucas unidades entre os valores encontrados na camada superficial e do fundo; **Bem misturado (BM)**: ausência de haloclina, os valores da camada do fundo e superficial são praticamente iguais.

A estratificação em estuários pode ser afetada por diversos fatores. Os gradientes de pressão (componentes barotrópicas e baroclínicas) decorrentes das diferenças de densidade das massas d'água, surgem como as principais forçantes atuantes nesses ambientes. Dentre os fatores físicos destacam-se a descarga fluvial, as variações do nível do mar, ondas e ventos. A descarga fluvial é dependente de fatores climáticos. Em rios de grande porte com amplas bacias hidrográficas, a vazão é condicionada pelo clima, variando sazonalmente entre estações chuvosas e secas. Em rios de menor porte, cujas bacias ocupam uma área de drenagem menor, são os eventos discretos de precipitação que condicionam as vazões, podendo variar até na escala de minutos (DALRYMPLE *et al.*, 2015). O regime e a altura das marés determinam a velocidade de entrada de água nos canais estuarinos, e conseqüentemente, a turbulência, afetando a estabilidade da coluna d'água e a estratificação. Ondas e ventos dentro do estuário também contribuem para a geração de turbulência, favorecendo a mistura vertical da coluna d'água. Processos hidrodinâmicos da plataforma continental, como variações do nível do mar impostas pelo vento (ressacas e marés secas), também podem acarretar modificações nos estuários (FONTES *et al.*, 2016). Dentre os fatores geomorfológicos, podem-se citar a rugosidade do leito, o formato e tamanho da bacia e a presença de planícies de maré. Ainda, fatores biológicos tais como vegetação marginal, marismas, manguezais e restingas podem

alterar a dinâmica estuarina. Finalmente, obras costeiras e a ocupação urbana também podem alterar o estuário de diversas maneiras. Para Ribas (2004) a hidrodinâmica estuarina tem relação direta com o equilíbrio do sistema estuarino, pois é a circulação da água que condiciona primariamente a distribuição e o transporte de materiais, tais como sedimentos, matéria orgânica particulada, nutrientes e organismos, no sistema.

Muitos estudos realizados em estuários são embasados na biodiversidade vegetal e na importância ecológica desses ambientes, mas deve-se levar em consideração que é a dinâmica intensa de entrada e saída das correntes de maré que favorece o desenvolvimento de espécies vegetais altamente especializadas, dando origem ao Bioma de Manguezal nas regiões tropicais (SCHAEFFER-NOVELLI, 1989). A dependência entre estes componentes é significativa nos processos que ocorrem nos estuários (KJERFVE, 1987; SILVA, 2004). Segundo Silva Costa *et al.* (2014) a salinidade ao longo dos estuários é um fator determinante da composição florística do manguezal. Já Schaeffer-Novelli *et al.* (1990) determinaram que o arranjo espacial das diferentes florestas de mangue, ao longo da costa brasileira, é resposta a fatores que dependem da topografia e das condições edáficas dos sistemas estuarinos, mas principalmente das forçantes impostas por fatores climáticos e hidrológicos.

Levantamentos de informações nessas áreas heterogêneas requerem grandes investimentos e longos períodos para obtenção de resultados representativos. A modelagem computacional é uma alternativa prática aplicada em estuários, permitindo a determinação de padrões de circulação hidrodinâmica, com custo e esforço amostral relativamente baixos. Sua grande vantagem é a capacidade de integrar dados e simular diversos cenários em tempo real. Também possibilita avaliar como processos físicos e biológicos ocorrem nesses ambientes complexos e dinâmicos em diferentes escalas temporais e espaciais, que não são acessíveis a partir de medições e observações em campo unicamente (WARNER *et al.*, 2005).

Existem diversos modelos computacionais para modelagem hidrodinâmica. Alguns deles, bem consagrados como o *Princeton Ocean Model* (POM) e o *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) se baseiam exclusivamente na modelagem dos fenômenos hidrodinâmicos nos oceanos. Existem outros, com é o caso do *Delft-3D*, mais apropriados para estudar os fenômenos que ocorrem em áreas costeiras, fluviais, lacustres ou estuarinas. Estes integram vários módulos que interagem entre si, em torno de uma interface que tem como base a modelagem hidrodinâmica. Os módulos permitem a modelagem numérica, tanto independente como conjunta de fluxos, transporte de sedimentos, ondas, qualidade da água, evolução

morfológica e ecológica, tornando-se uma ferramenta indispensável em estudos interdisciplinares (HYDRAULICS, W.L, 2014).

Como exemplo de trabalhos realizados utilizando modelos computacionais em áreas estuarinas no Brasil podem ser citados os trabalhos de Fontes *et al.* (2008) que estudaram a dinâmica da pluma estuarina do rio Amazonas, usando o modelo ECOMSed; Harari e Camargo (1998) que descrevem a circulação da maré da região costeira de Santos (SP) através da utilização do modelo numérico POM; Amaral *et al.*(2004) que estudaram comportamento hidrodinâmico do estuário do rio Macaé (RJ) utilizando como base o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBAHIA – UERJ) e propõem o uso da modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos; Roversi *et al.* (2016) que estudaram a hidrodinâmica do Sistema Estuarino de Santos (SP) com foco na renovação das águas por efeitos da maré e da descarga fluvial dos afluentes; e Gimiliani *et al.* (2016) que estudaram a dispersão e o tempo de residência de hormônios sintéticos no estuário e baía de Santos (SP) utilizando diversos módulos do Delft-3D.

Araújo e Melo (1999) destacam que modelos matemáticos são atualmente utilizados como ferramenta básica para o planejamento e gestão de sistemas costeiros e programas de investigação ambiental, uma vez que podem incluir dados sedimentológicos e biológicos, de modo a integrar uma suíte compreensiva de processos físicos e bióticos. Wu *et al.* (2001) destacam a importância da integração de dados biológicos nos modelos, para sua utilização como ferramentas para gerenciar adequadamente esses ambientes.

Pela sua proximidade com o mar e a grande disponibilidade de recursos naturais é comum que assentamentos urbanos se desenvolvam em torno aos estuários. A expansão populacional desordenada, acompanhada do crescimento dos complexos industriais, da agricultura e da indústria pesqueira nas proximidades dos estuários, colocam em risco o desenvolvimento sustentável destes ambientes (MIRANDA *et al.*, 2002).

Durante as últimas décadas, a ocupação urbana acelerada do litoral do Estado de São Paulo tem sido consequência das atividades portuárias desenvolvidas na região, da especulação imobiliária gerada pela proximidade dos grandes centros urbanos, e das atividades turísticas e de lazer (FIERZ e ROSA, 2011) disponíveis nos locais de grande riqueza paisagística. Os estuários encontrados na região apresentam diversos níveis de antropização e degradação (SOUZA, 1997), variando desde elevados, como o complexo estuarino de Santos-São Vicente, até níveis de impacto pouco perceptíveis, como é o caso dos estuários localizados em áreas

protegidas, chamando atenção para a necessidade da implementação de políticas públicas que direcionam o uso sustentável dessas áreas. D'Aquino *et al.* (2011) e Amaral *et al.* (2004), destacam a importância da caracterização hidrodinâmica de cada parte do estuário para o entendimento dos processos atuantes e como base para a conservação destes ambientes, auxiliando no gerenciamento e tomada de decisões sobre o uso sustentável e a sobrevivência destes ecossistemas como um recurso natural renovável e produtivo (MIRANDA *et al.*, 2002).

Existem dados, porém poucos estudos abordando medições hidrológicas para caracterização do sistema estuarino do rio Guaratuba (Bertioga, SP), de modo que uma compreensão sistemática dos processos hidrodinâmicos e climatológicos é fundamental para uma melhor compreensão das funcionalidades desse ambiente. A construção e a interpretação de um conjunto de dados que permita entender a circulação estuarina, integrada às características hidrológicas da bacia, são necessárias para a compreensão dos diversos processos que ocorrem no estuário do rio Guaratuba.

6. CONCLUSÕES

O estuário do rio Guaratuba apresenta grande variabilidade espacial e temporal de seus parâmetros físico-químicos e hidrodinâmicos, o que acarreta em sua caracterização igualmente variável.

Por se tratar de um estuário localizado em uma região de micromarés e que recebe aportes fluviais de uma bacia hidrográfica com área relativamente pequena, tanto a maré quanto a descarga fluvial dos seus tributários têm a capacidade de alterar significativamente as vazões e os padrões de salinidade e temperatura. A precipitação na sub-bacia do rio Guaratuba apresenta relação direta com o aumento de vazão a curto prazo, afetando a dinâmica e intensificando a estratificação vertical do estuário. Em condições normais de precipitação ou na ausência delas, o estuário é dominado pela maré. Chuvas intensas (que ocorrem principalmente os meses quentes) na sub-bacia também possuem potencial para causar alterações expressivas na geomorfologia do estuário, tanto pelo acúmulo de novos sedimentos provenientes da Serra do Mar, como mediante a remobilização de sedimentos arenosos nas margens e no leito do rio.

Ao analisar o estuário com base na estratificação da salinidade em sizíguas e quadraturas, ao longo de um ano, observou-se como o mesmo rapidamente se ajusta às diferentes condições forçantes do sistema. O estuário pode ser enquadrado como do tipo A, B e D, ou como estuário de cunha salina, altamente estratificado, parcialmente misturado ou bem misturado, dependendo das condições de precipitação na bacia e das marés.

Ao estudar concomitantemente a distribuição de salinidade com as vazões do estuário, foi possível observar em maior detalhe o comportamento hidrodinâmico do sistema. Em geral, nas sizíguas, as correntes de maré se intensificam, aumentando a turbulência e o grau de mistura vertical da coluna d'água. Nas quadraturas, onde as velocidades de corrente são menores, a estratificação da coluna d'água se mantém mais estável, e a água salina ou salobra incursiona até pontos mais internos do estuário, favorecida por ação da componente baroclínica da maré.

Durante algumas quadraturas foi possível quantificar que, apesar do aumento do nível da água durante a maré enchente, a resultante do fluxo do estuário se opunha ao sentido das correntes de maré. Nessas situações a descarga fluvial dominou o sistema, favorecendo o fluxo laminar da camada superficial estuário abaixo.

Os modelos gerados para simular as condições hidrodinâmicas do estuário para as diferentes situações estudadas, apesar de funcionais, ainda precisam de ajustes para representar

corretamente os registros feitos em campo. Em todo caso, a visualização das animações geradas a partir do modelo, contribuíram para a compreensão dos fenômenos atuantes e da dinâmica do sistema estuarino. As simulações realizadas retrataram corretamente o encontro dos rios Guaratuba e Vermelho observado em campo, o transporte de água doce pelas camadas superficiais estuário abaixo (inclusive em situações de maré enchente) e a contribuição do rio Perequê-Mirim para a estratificação da coluna d'água do estuário, próximo à foz.

Para melhorar a qualidade dos resultados dos modelos, sugere-se a extensão dos domínios além dos limites das margens utilizadas no presente estudo, de modo a considerar os meandros, os tributários de menor porte e as áreas alagáveis do sistema, com a inclusão dos respectivos dados batimétricos e topográficos e utilização de vazões variáveis.

Os resultados obtidos no presente trabalho estão alinhados e complementam a bibliografia existente sobre o rio Guaratuba, trazendo informações inéditas sobre o comportamento hidrodinâmico do estuário durante marés de quadratura. As categorias nas quais é possível enquadrar o estuário foram atualizadas, demonstrando que o estuário do rio Guaratuba é ainda mais variável do que descrito para situações de sizígia.

Observou-se que existe uma relação particular no comportamento da vazão do estuário em resposta precipitações. Juntamente com a designação de novas grades capazes de acomodar os refinamentos sedimentológicos mencionados, a melhor compreensão da relação entre precipitação e vazão deve melhorar a qualidade dos resultados simulados pelos modelos. Dessa maneira, o aumento da capacidade de recriar situações próximas da realidade permitirá realizar inferências sobre os efeitos de possíveis alterações na hidrodinâmica estuarina perante as modificações nas forçantes do sistema.

O Presente estudo pode ser utilizado por gestores e tomadores de decisão para orientar o uso sustentável desse ambiente, no que tange ao gerenciamento costeiro e de seus recursos hídricos.

O modelo computacional desenvolvido pode ser utilizado para estudos da dispersão de contaminantes, da avaliação do tempo de residência de substâncias no interior do estuário, estudos da influência da hidrodinâmica sobre a biodiversidade da fauna e da flora estuarina e efeitos das mudanças climáticas na alteração de vazões e nível do mar.

Tal abordagem é particularmente interessante e necessária, uma vez que o estuário sofre constantes pressões antrópicas em consequência de sua proximidade ao condomínio instalado na região do rio Vermelho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL K.; COLONNA, P. R. & AZEVEDO, J. S. Estuário do Rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. **Mecânica Computacional** Vol. XXIII, pp. 1167-1185, 2004.
- ARAÚJO, A. M. & MELO, M. C. V. Simulações da circulação e transporte hidrodinâmicos forçados por marés na Lagoa Olho D'água. **Ciência & Engenharia, Uberlândia/MG**, v. 8, n. 2, p. 81-90, 1999.
- BANZATO, B. D. M., FAVERO, J., AROUCA, J., & CARBONARI, J., Análise ambiental de unidades de conservação através dos métodos SWOT e GUT: O caso do Parque Estadual Restinga de Bertiooga. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 38-49, 2012.
- BARALDO, K. B. **Caracterização e comparação dos estuários dos rios Itaguapé e Guaratuba (Bertiooga, SP) com base nos parâmetros geo-físico-químicos, batimetria e imageamento do fundo**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Biociências Universidade Estadual Paulista, 2018. 99p.
- BOWDEN, K. F. **Physical factors: salinity, temperature, circulation, and mixing processes. Chemistry and biogeochemistry of estuaries**. Wiley, New York, p. 37-70, 1980.
- D'AQUINO, C. D. A., ANDRADE NETO, J. S. D., BARRETO, G. A. M., & SCHETTINI, C. A. F. Caracterização oceanográfica e do transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio Mampituba, SC. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 2, p. 217-230, 2011.
- DALRYMPLE. R. W.; KURCINKA, C. E.; JABLONSKI B. V. J.; ICHASO A. A.; MACKAY, D. A. Deciphering the relative importance of fluvial and tidal processes in the fluvial-marine transition. *In*: ASHWORTH, P. J.; BEST, J. L.; PARSONS, D. R. **Fluvial-Tidal Sedimentology**. Elsevier, 2015. p. 3-7.
- DAVIES, J. L., A Morphogenic Approach to World Shorelines. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 8, p. 127-142, 1964.

- DIONNE, J. C. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 7, p. 36-44, 1963.
- DYER, K. R. **Estuaries: A Physical Introduction**, 2 ed., Chichester, Wiley, 1997. 195 p.
- FAIRBRIDGE, R. W. The estuary: its definition and geodynamic cycle. **Chemistry and biochemistry of estuaries**, 1980, p. 1-35.
- FIERZ, M. S. M.; ROSA, F. S. A paisagem X evolução do uso e ocupação do solo em Bertioga, Litoral Paulista. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 13, p. 259-287, 2011.
- FONTES, R. F. C.; ANDUTTA, F.; MIRANDA, L. B. Estuarine circulation. **New York: Springer Science** 2016.
- FONTES, R. F. C.; CASTRO, B. M.; BEARDSLEY, R. C. Numerical study of circulation on the inner Amazon Shelf. **Ocean Dynamics**, v. 58, n. 3, p. 187-198, 2008.
- GIMILIANI, G.T.; FONTES, R.F.C.; ABESSA, D.M.S. Modeling the dispersion of endocrine disruptors in the Santos Estuarine System (Sao Paulo State, Brazil). **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, n. 1, p. 1-8, 2016.
- GIRARDI, A. C. S.; SANTOS, R. F. & MANTOVANI, W. Subsídios metodológicos para o planejamento e gestão de restingas: estudo de caso - Bertioga, SP. *In*: MANTOVANI, W. (Org.) **Caminhos de uma ciência ambiental**. São Paulo: Annablume, 2005. p. 321-344
- HANSEN, D. V.; RATTRAY, M. New dimensions in estuary classification. **Limnology and Oceanography**, v. 11, n. 3, p. 319-326, 1966.
- HARARI, J.; DE CAMARGO, R. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): circulação de maré. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 46, n. 2, p. 135-156, 1998.
- HYDRAULICS, W.L. Delft. Delft-3D-FLOW User Manual: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena. including sediments. **Technical report, Version 3.15.34158**. p7, 2014

- KJERFVE, B., Estuarine geomorphology and physical oceanography. *In*: DAY, Jr., J. W., HALL, C. H. A. S., KEMP, W. M. & YÁÑES-ARANCIBA, A. (Org). **Estuarine ecology**. New York, Wiley, 1987. P 50.
- KÖPPEN, W. & GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. **Wall-map 150cmx200cm**, 1928.
- MIRANDA, L. B.; KJERFVE, B. & CASTRO, B. M. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Edusp, 2002.
- OFFICER, C. B. Longitudinal circulation and mixing relations in estuaries. *Estuaries, Geophysics, and the Environment. Studies in Geophysics. The National Research Council*, p. 13-21, 1977.
- PRITCHARD, D. W. Estuarine Circulations Patterns. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 81, no 717, 1 – 11. 1955.
- PRITCHARD, D. W. Observations of circulation in coastalplain estuaries. *In*: **Lauff GH (ed) Estuaries**. American Association for the Advancement of Science, Washington, DC, 1967.
- QGIS Development Team, QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2013. <http://www.qgis.org/>
- RIBAS, T.M. **Implementação de Modelo Numérico para Estudo Hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá-PR**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, PR, Brasil, 2004.
- RIBEIRO, R. B., SAMPAIO, A. F. P., RUIZ, M. S., LEITÃO, J. C., e LEITÃO, P. C. First Approach of a Storm Surge Early Warning System for Santos Region. **Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options**. Springer, Cham, 2019. p. 135-157.
- ROELVINK, J. A.; VAN BANNING, G. K. F. M. Design and development of Delft-3D and application to coastal morphodynamics. **Oceanographic Literature Review**, v. 11, n. 42, p. 925, 1995.

- ROVERSI, F.; COLONNA ROSMAN, P.C.; HARARI, J. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 3, 2016.
- SABESP, CHESSE - Crise Hídrica – Estratégia e Soluções da SABESP para a região Metropolitana de São Paulo. São Paulo – Brasil. Relatório Técnico. 2015, 95 p. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/crisehidrica/chess_crise_hidrica.pdf> Acesso em: 7 de junho de 2018.
- SANT'ANNA NETO, J. L. As chuvas no Estado de São Paulo: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica. **São Paulo: USP/FFLCH**, 1995.
- SÃO PAULO (Estado). Decreto Estadual nº. 56.500/2010. Cria o Parque Estadual Restinga de Bertioiga e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2010/decreto-56500-09.12.2010.html>>. Acesso em: 17 de janeiro de 2016.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Perfil dos ecossistemas litorâneos brasileiros, com especial ênfase sobre o ecossistema manguezal, **Publicação especial IO-/USP**. 1989.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y., CINTRÓN-MOLERO, G., ADAIME, R. R., & DE CAMARGO, T. M.. Variability of mangrove ecosystems along the Brazilian coast. **Estuaries**, v. 13, n. 2, p. 204-218, 1990.
- SILVA COSTA, D. F; DE MEDEIROS ROCHA, R.; CESTARO, L. A. Análise fitoecológica e zonação de manguezal em estuário hipersalino. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**, v. 13, n. 1, 2014.
- SILVA, I. R. **Praias da Costa do Descobrimento: uma contribuição para a gestão ambiental**. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado, IGEO/UFBA.2004. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/23365>, acesso em 23/08/2018.
- SORIANO, É.; DE RESENDE LONDE, L.; TORRES DI GREGORIO, L.; PELLEGRINI COUTINHO, M.; e BACELLAR LIMA SANTOS, L. Crise hídrica em São Paulo sob

o ponto de vista dos desastres. *Ambiente & Sociedade*, 19(1). Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 1, 2016.

SOUZA, C. R. G., **As células de deriva litorânea e a erosão nas praias do Estado de São Paulo**. 1997. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. doi:10.11606/T.44.1997.tde-10042015-161455. Acesso em: 5 de junho de 2018.

SOUZA-JÚNIOR, V. S. D., VIDAL-TORRADO, P., GONZALEZ TESSLER, M., RUIZ PESSENDA, L. C., FERREIRA, T. O., OTERO, X. L., MACÍAS, F. Evolução quaternária, distribuição de partículas nos solos e ambientes de sedimentação em manguezais do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, 2007.

VM ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS LTDA. EPP., Plano de Bacia Hidrográfica 2016-2027 do Comitê da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista. Vol. I - Diagnóstico. 2016. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-BS/11800/2016-10-19-diagnostico-final.pdf>>

WARNER, J.C.; GEYER, W. R.; LERCZAK, J. A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 110, n. C5, 2005.

WOLFF, W.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R. Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 21-33, 2014.

WU, Y.; FALCONER, R. A.; STRUVE, J. Mathematical modelling of tidal currents in mangrove forests. **Environmental Modelling & Software**, v. 16, n. 1, p. 19-29, 2001.