

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO



ALANE PATRICIA DE MELO SOUZA

**Avaliação do Efeito do Assoreamento na Hidrodinâmica e
no Tempo de Residência de um Complexo Estuarino
Lagunar Tropical**

Maceió

2017

ALANE PATRÍCIA DE MELO SOUZA

**Avaliação do Efeito do Assoreamento na Hidrodinâmica e no
Tempo de Residência de um Complexo Estuarino Lagunar Tropical**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior

Maceió

2017

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

S729e Souza, Alane Patrícia de Melo.
Avaliação do Efeito do Assoreamento na Hidrodinâmica e no Tempo de
Residência de um Complexo Estuarino Lagunar Tropical / Alane Patrícia de
Melo. – 2017.
38 f. : il.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior.

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-
Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 36-38.

1. Estuários – Modificações físicas. 2. Tempo de residência. 3. IPH-ECO.
4. Trajetórias de partículas. I. Título.

CDU: 556.546



Folha de Aprovação

ALANE PATRÍCIA DE MELO SOUZA

Avaliação do efeito do assoreamento na hidrodinâmica e no tempo de residência de um complexo estuarino lagunar tropical

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior
(Orientador- PPGRHS)

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves
(Examinador interno – PPGRHS-UFAL)

Prof.^a Dr.^a Lucia Helena Ribeiro Rodrigues
(Examinadora externa – IPH/UFRGS)

Prof. Dr. David Manuel Lelinho Motta Marques
(Examinador externo – IPH/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço aos meus pais, Solange e Antonio, pelo amor e apoio incondicional. Ao meu pai, por todo esforço, coragem e exemplo de honestidade e bondade. E a minha mãe, pelas orações, cuidado e dedicação.

Agradeço a minha família pelo apoio em todos os momentos. Ao Louis Gabriel, pelos muitos anos de parceria e companheirismo.

A esta instituição e a todos os mestres, que foram imprescindíveis à minha formação.

Agradeço em especial ao professor Ruberto, pela orientação, paciência e atenção. Seu entusiasmo pela ciência e pelas descobertas me inspiraram bastante. Muito obrigada por todo incentivo e confiança.

Aos companheiros de turma, Cristiano Seabra, Renata Braga, Camila Agra, Lucas Tardelly, Stephane Andrade, Juliana Cavalcante, Keke Rosberg, Gabriela Branquinho, Marconi Cavalcanti e Tainara Ramos, pelos preciosos momentos compartilhados durante as pausas para o café.

Aos queridos colegas da turma de 2014, Alberonaldo Alves e Amesson Marques, muito obrigada por toda a ajuda e amizade firmada no pouco tempo de convivência.

Por fim, muito obrigada a CAPES pela bolsa de estudo disponibilizada nos 24 meses de pós-graduação, e, a FINEP, pelo financiamento do projeto de pesquisa.

RESUMO

O tempo de residência de corpos hídricos é uma particularidade que quantifica o tempo de renovação dos mesmos. Vários estudos utilizando modelagem vêm sendo realizados com a finalidade de quantificar o tempo de residência e avaliar as características hidrodinâmicas, através da trajetória de partículas. Este estudo teve como objetivo avaliar as modificações no tempo de residência e na hidrodinâmica de um complexo estuarino costeiro em processo de assoreamento acelerado, comparando levantamentos batimétricos com 27 anos de diferença. Para tanto, foi utilizado o método de trajetória de partículas do módulo hidrodinâmico do modelo IPH-ECO. Como resultado, o modelo mostrou que com a entrada menos restrita e a diminuição do volume no complexo, o efeito do atrito no fundo é menor, aumentando o prisma de maré nos canais e a velocidade de troca entre as lagoas e o oceano, reduzindo, assim, o tempo de residência e a recirculação de partículas.

Palavras-chave: Tempo de residência. Trajetória de partículas. Modificações físicas. IPH-ECO.

ABSTRACT

The residence time of water bodies is a particularity that quantifies the renewal time. Several studies using the modeling have been carried out with the purpose of quantifying residence time and evaluation as hydrodynamic characteristics, through the trajectory of particles. The objective of this study was to evaluate how changes in residence time and hydrodynamics of a coastal estuarine complex under accelerated sedimentation process, comparing bathymetric surveys with 27 years of difference. For that, the method of particle tracking of the hydrodynamic module of the IPH-ECO model was used. As a result, the model showed that with a less restricted input and volume decrease, the bottom friction effect is lower, increasing the tide prism in the channels and velocity of exchange between lagoons and the ocean, thus reducing the residence time and recirculation.

Keywords: Residence time. Particle tracking. Physical modifications. IPH-ECO.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo Geral.....	12
2.2. Objetivos Específicos	12
3. METODOLOGIA	13
3.1. Área de estudo (CELMM)	13
3.2. Modelo Hidrodinâmico.....	14
3.3. Dados de Entrada	16
3.4. Calibração e validação do modelo.....	17
3.5. Batimetria	18
3.6. Construção dos cenários.....	19
3.7. Trajetória de Partículas.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1. Calibração do modelo	23
4.2. Batimetria	27
4.3. Cenários de vazão	28
4.4. Cenários de maré	28
4.5. Tempo de Residência.....	29
4.6. Trajetória de Partículas.....	33
5. CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

A hidrodinâmica e o tempo de residência em corpos hídricos influenciam diretamente na qualidade da água destes (GONZÁLEZ, 2008). O tempo de residência pode ser definido como sendo o tempo de renovação para um determinado corpo de água, seja ele um reservatório natural (BOLIN; RODHE, 1973) ou área costeira (TAKEOKA, 1984; ZIMMERMAN, 1976).

Estuários com baixas contribuições de rios e longos tempos de residência tendem a reter nutrientes e, por consequência, aumentar a taxa de produção primária (ROUSSEAU; LANCELOT; COX, 2006). Em contrapartida, os que apresentam altas contribuições e baixo tempo de residência são menos vulneráveis aos efeitos da eutrofização e ao acúmulo de substâncias indesejáveis. As principais forçantes nos processos hidrodinâmicos e de qualidade nos estuários são a maré, descarga de rios, fenômenos meteorológicos (e. g. ventos e radiação solar), batimetria e morfologia do estuário, e estes respondem de maneira diferente a cada forçante (LAZURE; SALOMON, 1991).

A interação entre a maré e a descarga de rios explica a geomorfologia, o poder de renovação e o estado de equilíbrio dos estuários (ZHANG et al, 2015). A descarga de rios afeta as características físicas, químicas e biológicas (LONERAGAN; BUNN, 1999; LIU; SWART, 2015), além de ser um dos principais responsáveis pela introdução de contaminantes (GILLANDERS; KINGSFORD, 2002). Os ventos podem influenciar no gradiente de salinidade ao longo do estuário e nas características de descarga estuarina e de escoamento superficial (GEYER, 1997; HEARN; ROBSON, 2002), além de ser um dos principais fatores na distribuição de oxigênio no meio (STANLEY; NIXON, 1992; MOHLENBERG, 1999; LIN et al, 2006; NI et al, 2014).

A importância da ação dos processos hidrodinâmicos para a quantificação do tempo de residência levou ao desenvolvimento de diversas técnicas, desde as mais simples, baseadas no volume do sistema estuarino e de descarga de rios, distribuição salinidade do sistema e prismas de marés (MARTINS et al, 1984; PILSON, 1985, OFFICER; KESTER, 1991, OLIVEIRA; KJERFVE, 1993), até a

utilização de modelos matemáticos para a estimativa de renovação estuarina (ZHAN; WILKINS; CHOFIELD 2010). Nos métodos mais simples, utiliza-se a premissa de que os estuários estão em estado estacionário e são bem misturados, portanto a variabilidade do tempo de residência no tempo e no espaço não é considerada. Esse tipo de abordagem sugere um único valor de tempo de residência para caracterizar o sistema por completo (OLIVEIRA; BAPTISTA, 1997), o que não condiz com a realidade. A utilização de modelos facilita a descrição do comportamento de um sistema e auxilia na tomada de decisão com base em prognósticos gerados.

Modelos hidrodinâmicos de rastreamento de partículas consistem no lançamento e rastreamento de diversas partículas do ponto onde foram lançadas até que saiam do estuário, fazendo com que seja possível saber como o tempo de residência varia temporal e espacialmente (OLIVEIRA; BAPTISTA, 1997; LIU et al, 2010). A técnica numérica de rastreamento de partículas foi exposta inicialmente por BOLIN E RODHE (1973) para o cálculo de tempo de residência em reservatórios naturais. Posteriormente foram feitas modificações, e a mesma tem sido utilizada como ferramenta na estimativa da renovação estuarina, dispersão de poluentes (PEARSON; BARBER, 1996; SCOTT, 1997), verificação de mudanças no tempo de residência causadas pela sazonalidade (VALENTIM, 2016), além de variações na circulação e identificação dos mecanismos responsáveis pelo fluxo (DEFNE; GANJU, 2014). Uns dos modelos que podem ser utilizados para esta finalidade é o IPH-ECO, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS), que possui um módulo hidrodinâmico capaz de simular as variáveis de escoamento de interesse em três dimensões.

O tempo de residência das lagunas Mundaú e Manguaba foram estimados em 16 e 36 dias, respectivamente, por OLIVEIRA e KJERFVE (1993). Esta estimativa foi feita através de uma abordagem simples, baseada na descarga de água doce e tábua de marés, além de utilizar os dados de batimetria disponíveis na época, levantados pela Portobrás em 1985. LARSSON e NILSSON (2014) estimaram o tempo de renovação das lagunas utilizando os dados de prismas de maré como componentes principais e os dados de batimetria levantados pela Agência Nacional de Águas (ANA), em 2012. Devido à coleta de dados ter acontecido num período

seco (de 16 a 24 de fevereiro de 2014), a influência da vazão do principal afluente foi desconsiderada. A estimativa foi realizada através de modelagem matemática, e os resultados foram de 19 e 42 dias para as lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente. Outro estudo do comportamento hidrodinâmico e do tempo de residência foi realizado pela ANA em 2012, utilizando modelo hidrodinâmico somente para a laguna Mundaú. Este estudo considerou cenários de seca (11,54 m³/s) e cheia (300 m³/s) para vazão do rio Mundaú, baseados na vazão medida nos dias de campanha (04 a 05 de abril).

A variabilidade espaço-temporal do tempo de residência das lagoas, considerando eventos hidrológicos extremos e efeitos de maré, juntamente com as modificações físicas ainda é desconhecida. Este trabalho está inserido no projeto **Produtos e Processos - Modelagem Ecológica de Ecossistemas Aquáticos: Estrutura, Funcionamento e Previsão em Lagoas Costeiras**, financiado pela Finep, e tem como objetivo avaliar a variabilidade espaço-temporal da hidrodinâmica e do tempo de residência do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba, aplicando um modelo hidrodinâmico de trajetória de partículas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a variabilidade espaço-temporal da hidrodinâmica e do tempo de residência causada pelo efeito do assoreamento nas lagoas Mundaú e Manguaba, que compõem o CELMM, aplicando um modelo hidrodinâmico de trajetória de partículas.

2.2. Objetivos Específicos

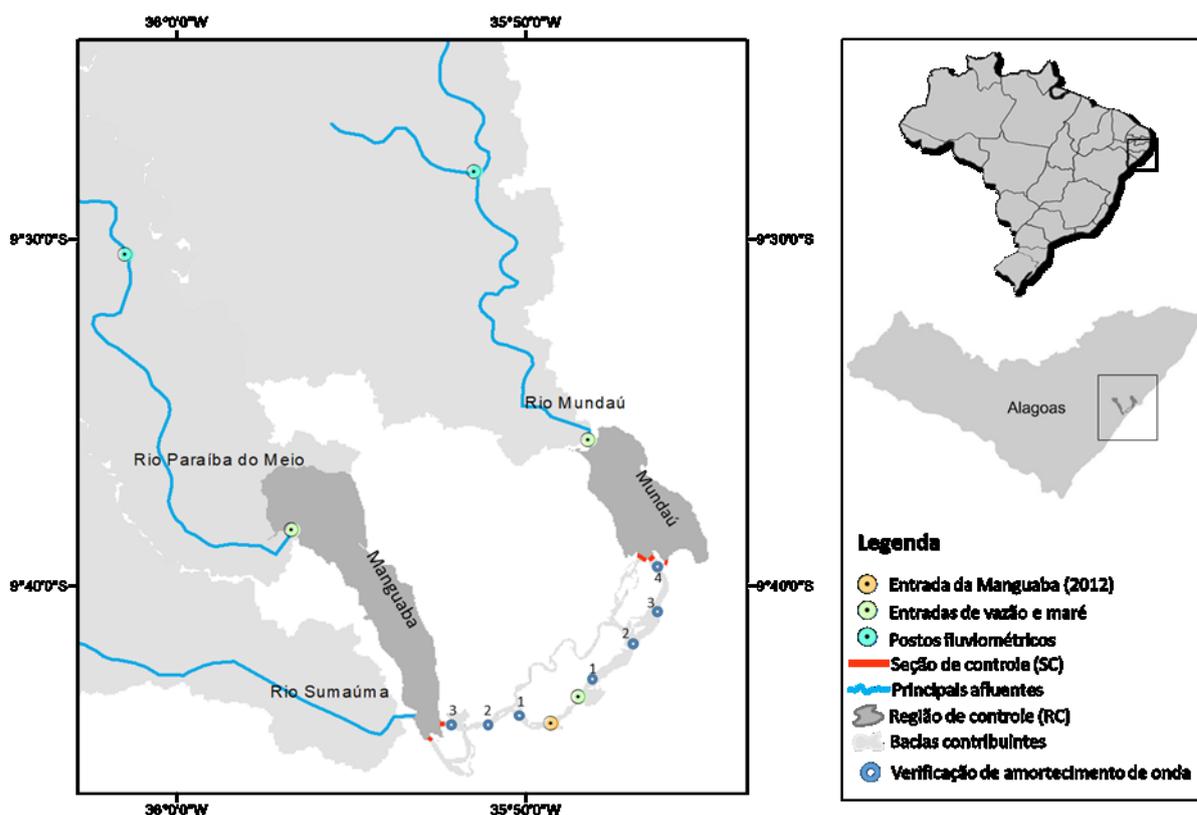
- i. Determinar as consequências do assoreamento no tempo de residência e na hidrodinâmica do CELMM;
- ii. Compreender a dinâmica das partículas sob diferentes condições de descarga fluvial e de marés;

3. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo (CELMM)

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) está localizado ao sul do município de Maceió, inserido entre os paralelos 9°35'00" a 9°45'00" Sul e 35°44'00" a 35°58'00" Oeste. Possui uma área de aproximadamente 81 Km², sendo 27 Km² da laguna Mundaú, 42 Km² da Manguaba e 12 Km² dos canais. A região do entorno do CELMM compreende sete municípios e tem como principais afluentes o rio Mundaú (laguna Mundaú), Paraíba e Sumaúma (laguna Manguaba). São estuários que têm a dinâmica influenciada fortemente pela maré e pelo regime hidrológico (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

Figura 1 - Localização da área de estudo



Muitas atividades realizadas nas bacias do CELMM são classificadas como modificadoras do meio ambiente pela Resolução CONAMA 01/1986, tais como: distritos industriais, extração de combustível fóssil, unidades industriais e

agroindustriais. Além disso, há os impactos negativos causados pela ocupação urbana desordenada nas margens das lagoas e ao longo de suas bacias, resultando numa grande contribuição para a deterioração da qualidade da água e dos sedimentos.

O Plano de Gestão do CELMM desenvolvido pela ANA (2013) avaliou alguns parâmetros da qualidade da água na lagoa Mundaú e comparou os resultados encontrados com os do ano de 2006. Em apenas 6 anos o padrão de qualidade da lagoa mudou bruscamente, indicando que a lagoa passa por um acelerado processo de degradação, com aumento da concentração de poluentes e nutrientes e eutrofização, promovida pelo aumento de fitoplâncton e macrófitas. De acordo com este estudo, a parte central e toda margem leste da Mundaú apresentaram os piores resultados para os parâmetros levantados. O mesmo ocorreu com a análise de metais pesados nos sedimentos: as regiões com maiores concentrações também eram a porção central e margem leste, onde o sedimento é mais fino.

A alta concentração de nutrientes e de oxigênio dissolvido encontrada na Mundaú justifica o diagnóstico de COTOVICZ JR. et al (2012), que mostrou que as lagoas têm características de ambientes mesotróficos a eutróficos, através da aplicação de dois modelos de avaliação de estado trófico: ASSETS e TRIX. Ambas apresentam alta vulnerabilidade estuarina (devido ao grande aporte de nutrientes) e baixa previsão de melhoria para o cenário ambiental atual. A presença de cianobactérias na lagoa Manguaba foi evidenciada por MELO-MAGALHÃES et al (2009) e em laudo de monitoramento do Instituto do Meio Ambiente de Alagoas, em 2015.

3.2. Modelo Hidrodinâmico

O modelo utilizado foi o IPH-eco, em sua forma bidimensional. O módulo hidrodinâmico é uma adaptação do TRIM3D, desenvolvido por CASULLI e CHENG (1992). Este modelo de diferenças finitas emprega o esquema semi-implícito para a solução do sistema de equações com uma abordagem mista Euleriana-Lagrangiana para os termos convectivos (CASULLI; CATTANI, 1994):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial[(h + \eta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h + \eta)v]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \gamma u + \tau_x + A_h \nabla^2 u + f v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \gamma v + \tau_y + A_h \nabla^2 v - f u \quad (3)$$

onde $u(x, y, t)$ e $v(x, y, t)$ são as componentes de velocidade nas direções x e y , t é o tempo; $\eta(x, y, t)$ é a elevação da superfície da água a partir de um nível de referência; $h(x, y)$ é a profundidade medida a partir de um nível de referência; g é a aceleração da gravidade; f é o parâmetro de Coriolis; τ_x e τ_y são as tensões de cisalhamento provocadas pelo vento; γ é o coeficiente de fricção junto ao fundo; A_h é o coeficiente de viscosidade dinâmica horizontal.

Os termos que representam a tensão de cisalhamento do vento na superfície da água e a fricção ao fundo são calculados por outras equações:

$$\tau_x = C_D \rho_A W_x \|W\| \quad (4)$$

$$\tau_y = C_D \rho_A W_y \|W\| \quad (5)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto do vento; ρ_A é a densidade do ar; W_x e W_y são as componentes horizontal e vertical de velocidade do vento, respectivamente; e $\|W\|$ é a magnitude do vetor de velocidade do vento. E o coeficiente de fricção junto ao fundo é definido por:

$$\gamma = g \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 H} \quad (6)$$

onde C_z é o coeficiente de Chezy e H é a profundidade total ($h + \eta$).

O método de diferenças finitas soluciona as equações governantes para um número finito de pontos no espaço e no tempo. O domínio de aplicação é subdividido em uma malha com um número finito de células, e as variáveis hidrodinâmicas são calculadas em cada uma das células. A malha utilizada para este estudo foi a estruturada, onde o contorno do corpo hídrico é representado por quadrados.

3.3. Dados de Entrada

O modelo apresenta módulos que definem o tipo de dado de entrada: grade, hidrodinâmico, meteorológico e de qualidade. O módulo de qualidade não foi utilizado neste trabalho.

Na grade, os dados de entrada são a batimetria e o coeficiente de Chezy. No módulo hidrodinâmico são definidos os processos, parâmetros, condições iniciais e de contorno. No módulo de dados meteorológicos são inseridos dados de meteorologia julgados necessários.

No módulo hidrodinâmico, os processos indicam as considerações feitas para simular o sistema: cisalhamento do vento baseado no coeficiente de arrasto do vento; rugosidade de fundo baseada no coeficiente de Chezy; viscosidade dinâmica e difusividade horizontais e verticais constantes; esquema advectivo Euleriano-Lagrangiano; e pressão hidrostática.

Os parâmetros utilizados e seus respectivos valores estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - parâmetros utilizados como dados de entrada do modelo

	Constantes	Unidade
Densidade da água	1000	Kg/m ³
Temperatura da água	20	°C
Temperatura do ar	20	°C
Latitude	0	-
Altitude	0	-
Coefficiente de arrasto	1e-09	-
Viscosidade e difusividade horizontal e vertical	0	-
Rugosidade de fundo	Coefficiente de Chezy	Definido na grade

Para caracterizar o estágio inicial de circulação, considera-se que as velocidades são iguais a zero e que o nível da água é constante e igual a 0,953m, quando o sistema não tem influência da maré. Em estuários, estas considerações tendem a resultado real num período de simulação correspondente a um ciclo de maré (FRAGOSO JR. et al, 2000).

As condições de contorno do modelo são as entradas de vazão e de maré no sistema. Estas foram definidas na construção dos cenários.

Na entrada do módulo de dados meteorológicos, a pressão atmosférica, a temperatura do ar e a umidade relativa foram de 1 atm, 20 °C e 100%, respectivamente. Os dados de velocidade e intensidade dos ventos foram os observados no local durante o período de simulação. A fim de simplificar o modelo, os dados de radiação solar, precipitação e evaporação foram considerados constantes e iguais a zero.

3.4. Calibração e validação do modelo

O processo de calibração é realizado para estimar parâmetros que tornem mínima a diferença entre valores calculados e observados. O parâmetro utilizado na calibração foi o coeficiente de Chezy, e a validação do modelo foi feita comparando dados horários de variação de nível nas estações de entradas de vazão e de maré (Figura 1). O coeficiente de determinação (R^2) foi empregado para avaliar a qualidade da calibração entre os níveis observados e calculados.

No processo de calibração e validação, no ano de 1985, foram utilizadas três estações de entrada: uma na laguna Mundaú, uma na Manguaba e uma no canal da Barra, com período de calibração de 01 a 28 de fevereiro de 1985.

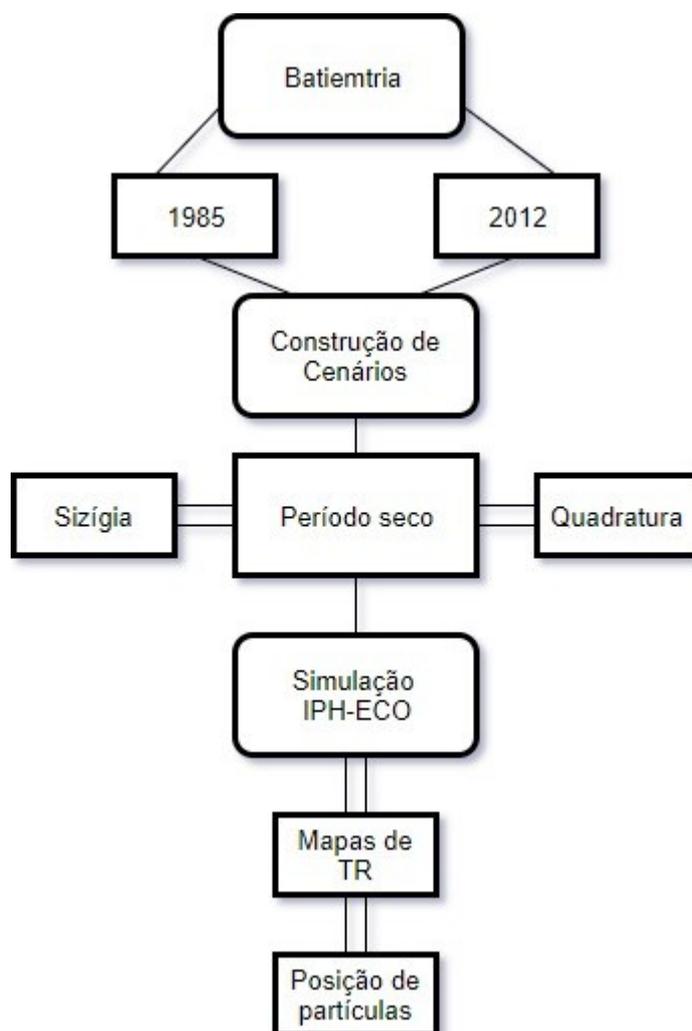
Para o ano de 2014, o projeto calibrado e validado foi cedido por (BRITO JR.; FRAGOSO JR.; LARSON, 2017). Aqui foram utilizadas quatro estações de entrada, pois para diminuir os efeitos de enchentes no povoado de Barra Nova, foi aberto um canal de ligação entre a laguna Manguaba ao mar (MARECHAL DEODORO, 2011). E o período de calibração foi de 13 de fevereiro a 12 de março de 2014.

3.5. Batimetria

A fim de avaliar as mudanças sofridas no CELMM ao longo do tempo, serão comparados os dois levantamentos de batimetria disponíveis do local: um realizado em 1985 pela PORTOBRÁS, e a combinação do levantamento feito em 2011 pela PETROBRAS na laguna Manguaba, com o realizado em 2012, pela ANA, na laguna Mundaú.

Após a comparação dos dados de batimetria, serão construídos cenários hipotéticos com diferentes condições de contorno. Estes cenários serão simulados utilizando as batimetrias para analisar as mudanças na hidrodinâmica e no tempo de residência das lagunas, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia utilizada.



3.6. Construção dos cenários

A fim de analisar a mudança no comportamento das lagunas em situações extremas, alguns cenários foram propostos. Estes cenários consideram a combinação entre marés e eventos extremos de vazão:

- Cenário 01: maré de sizígia;
- Cenário 02: maré de quadratura;

Para a construção dos cenários de marés, foram utilizados os dados medidos no porto de Maceió, no período de 01/09/1944 a 04/09/1945, disponibilizados pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR). Sabendo que a altura média é de 1,08m e

que o período do regime é semi-diurno (12,4h), foi realizado um ajuste senoidal para acompanhar as mudanças na maré:

$$h = hm + \left(\alpha * \frac{\sin 2\pi}{Pt} \right) \quad (7)$$

onde h é a altura da maré (m); hm é a altura média (m); α é a amplitude (m); P representa o período e t é o tempo, em horas.

Tabela 2 – Dados de maré do Porto de Maceió observados e disponibilizados pela FEMAR, em seu catálogo de estações maregráficas

Maré	Máxima (m)	Mínima (m)	Amplitude (m)
Sizígia	2,06	0,10	0,98
Quadratura	1,53	0,63	0,45

Para os eventos extremos de vazão, foi utilizada a vazão de referência Q_{90} (vazão que pode ser igualada ou superada em 90% do tempo), comumente adotada na gestão de recursos, representando o período seco.

A vazão Q_{90} foi obtida através da curva de permanência, utilizando dados de médias diárias medidos nas estações fluviométricas mais próximas às lagunas (Tabela 3). As séries históricas dos dados fluviométricos foram obtidas através do portal Hidroweb.

Tabela 3 - Informações dos postos fluviométricos

Código	Posto	Rio	Município	Latitude	Longitude
39770000	Fazenda	Mundaú	Rio Largo	-9:28:02	-35:51:35
	Boa				
	Fortuna				
39870000	Atalaia	Paraíba	Atalaia	-9:30:24	-36:01:22

Como as lagunas estão localizadas a jusante dos postos fluviométricos, a vazão afluente será estimada considerando uma relação linear entre a área de drenagem do posto e a área de drenagem da bacia, considerando as lagunas como

exutório. Para a laguna Manguaba, também foi considerada a área de drenagem do rio Sumaúma, um importante afluente.

3.7. Trajetória de Partículas

O modelo IPH-ECO calcula o deslocamento de partículas e as variáveis de interesse, como velocidade e superfície de elevação, ao longo do tempo e do espaço. Estas partículas funcionam como indicadores do comportamento da massa de água dos estuários estudados.

As partículas assumem o comportamento de uma substância conservativa, submetida ao transporte por advecção e são inicialmente posicionadas no centro de cada uma das células da malha que representa o contorno do CELMM. Para determinar quando as partículas saíam do sistema, criou-se uma seção de controle (SC) na interface entre as lagunas e os canais (Figura 1). Desta forma, foram lançadas 27.732 partículas na região de controle (RC) no ano de 1985, com período de simulação de 01 a 28 de fevereiro. E 27.483 partículas no ano de 2014, com simulação no período de 13 de fevereiro a 12 de março.

Como o tempo de simulação é de 28 dias para os anos de 1985 e 2014, o modelo gera 672 arquivos (um arquivo por hora) de posição de partículas, em formato .txt. Esses arquivos foram utilizados para criar mapas de tempo de residência e trajetória de partículas, a fim de identificar as mudanças ocorridas na área de estudo.

Para a elaboração dos mapas de TR foram utilizados dados do primeiro e o último arquivo de trajetória de partículas. Desta forma, foi construído um arquivo do tipo (x, y, z), onde x e y indicam a posição inicial das partículas, e z o tempo de residência final de cada uma delas.

A trajetória das partículas foi feita utilizando o *Matlab*. O *software* foi programado para ler apenas a linha que continha informações sobre a partícula de interesse dos arquivos .txt gerados. Em seguida, o mesmo era feito para o ano de 2014, com uma partícula lançada no mesmo ponto escolhido anteriormente. Foram gerados arquivos do tipo (x, y, t), onde x e y representam a posição no instante de

tempo t , e t é dado em horas. Todos os mapas foram elaborados utilizando o ArcGIS.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Calibração do modelo

O coeficiente de Chezy, utilizado como parâmetro na calibração, foi de $40 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ para as lagunas pertencentes ao CELMM no ano de 1985. Para o ano de 2014, esse coeficiente foi de $46 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$ para todo o CELMM (BRITO JR.; FRAGOSO JR.; LARSON, 2017).

As figuras 3, 5 e 7 mostram, respectivamente, o resultado obtido na calibração do modelo para a laguna Mundaú, para o tempo seco e para o tempo chuvoso da laguna Manguaba. O coeficiente de determinação apresentou resultado satisfatório na comparação entre os dados de níveis calculados e observados para a laguna Mundaú (Figura 4), para o canal da Barra (Figura 6) e para o período de menores vazões da Manguaba (Figura 8). Para a condição de cheia na laguna Manguaba a calibração não se mostrou satisfatória (Figura 9).

Figura 3 - Resultado da calibração para a Laguna Mundaú

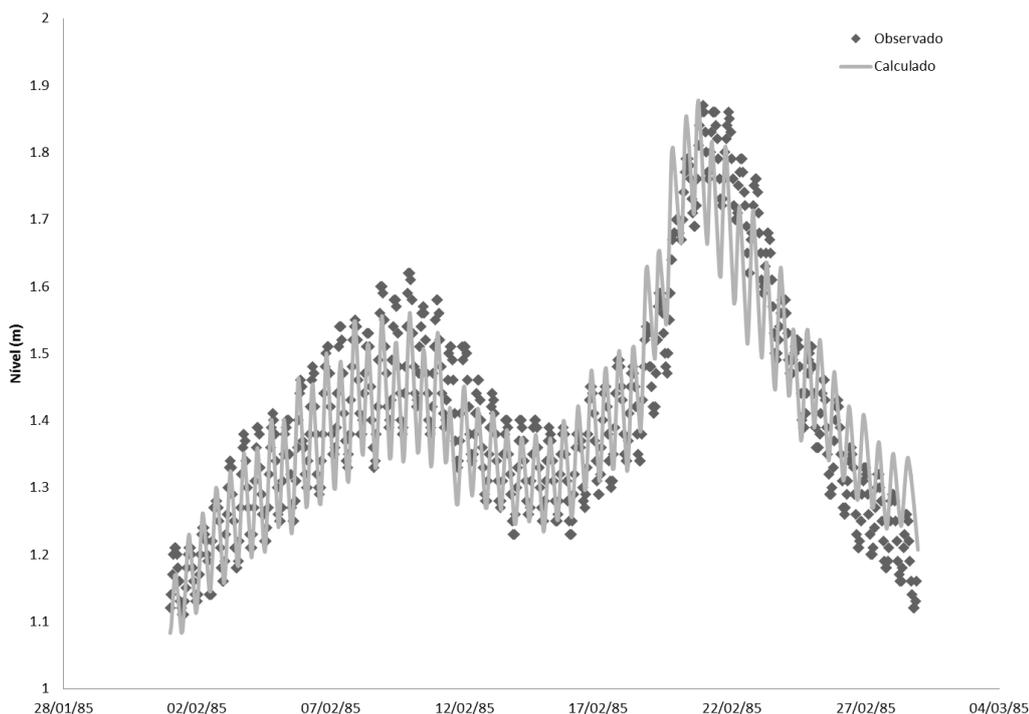


Figura 4 - Regressão linear entre os valores de níveis calculados e simulados na laguna Mundaú

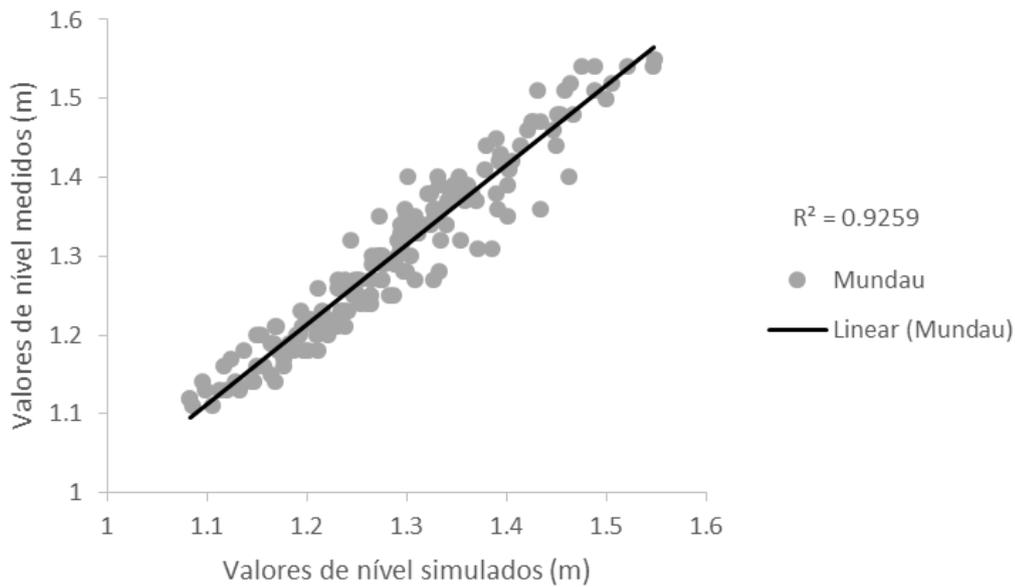


Figura 5 - Resultado da calibração para o canal da Barra

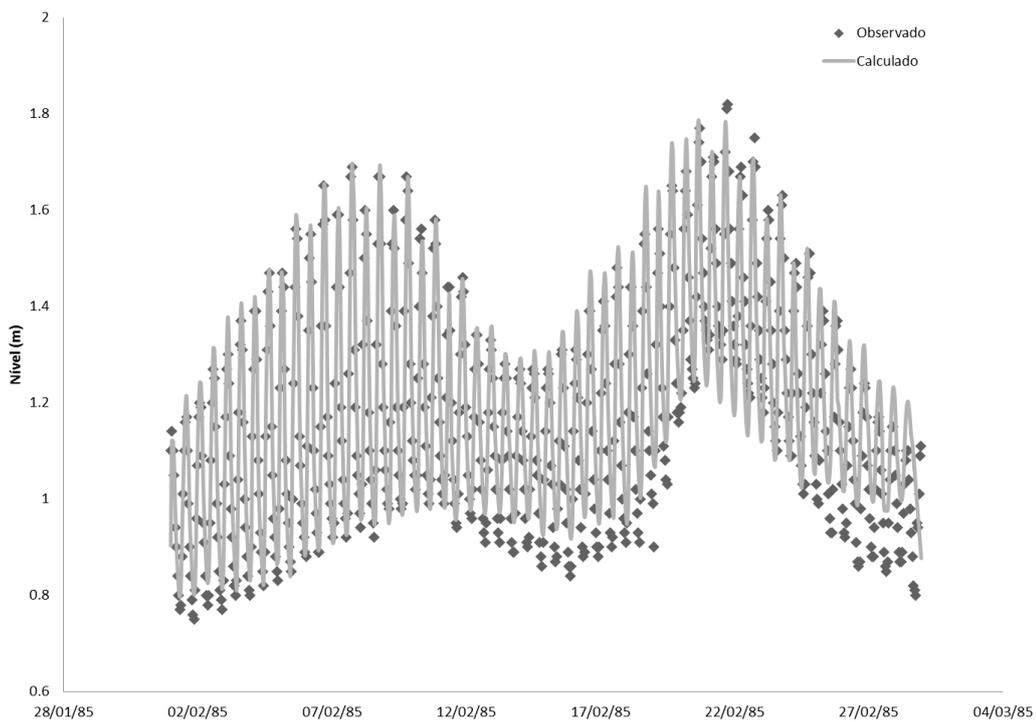


Figura 6 - Regressão linear entre os valores de níveis calculados e simulados no canal da Barra

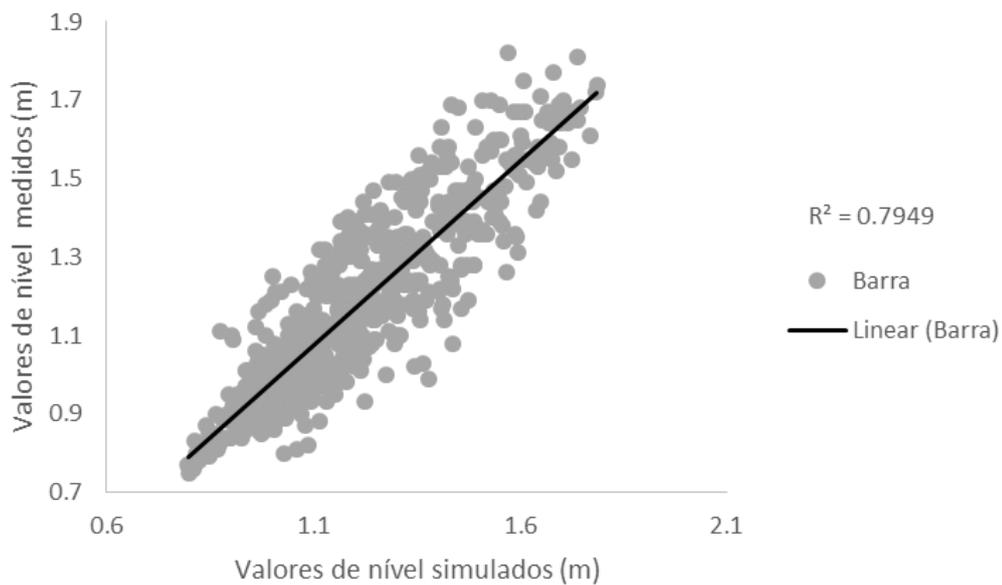


Figura 7 - Resultado da calibração para a Laguna Manguaba

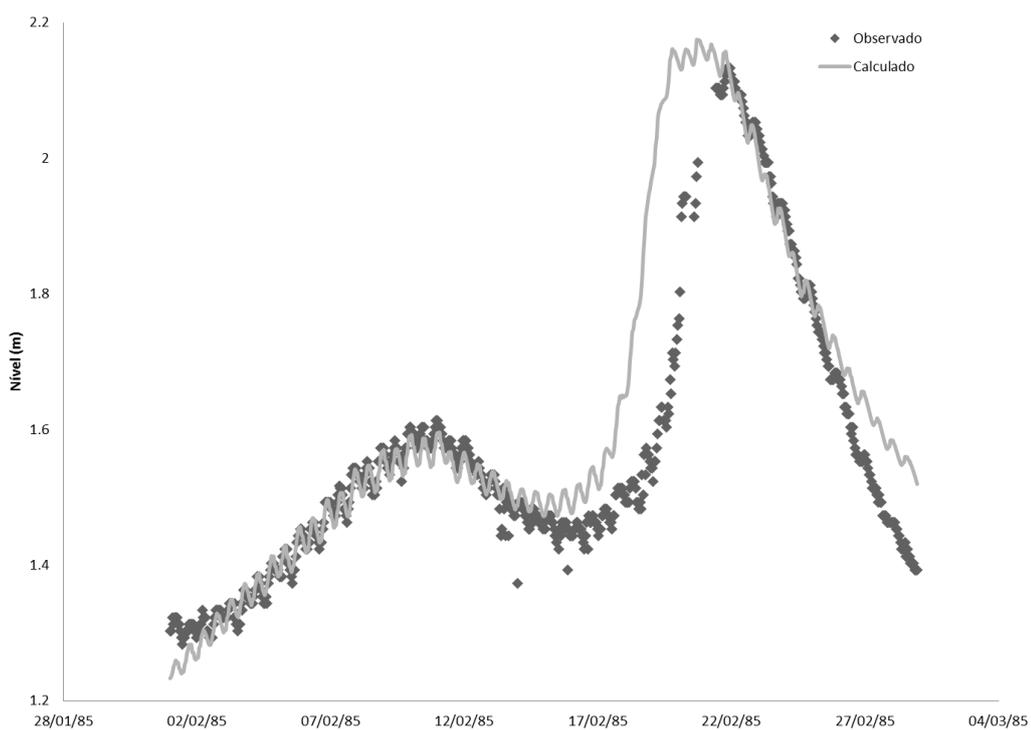


Figura 8 - Regressão linear entre os valores de níveis calculados e simulados na laguna Manguaba no período seco.

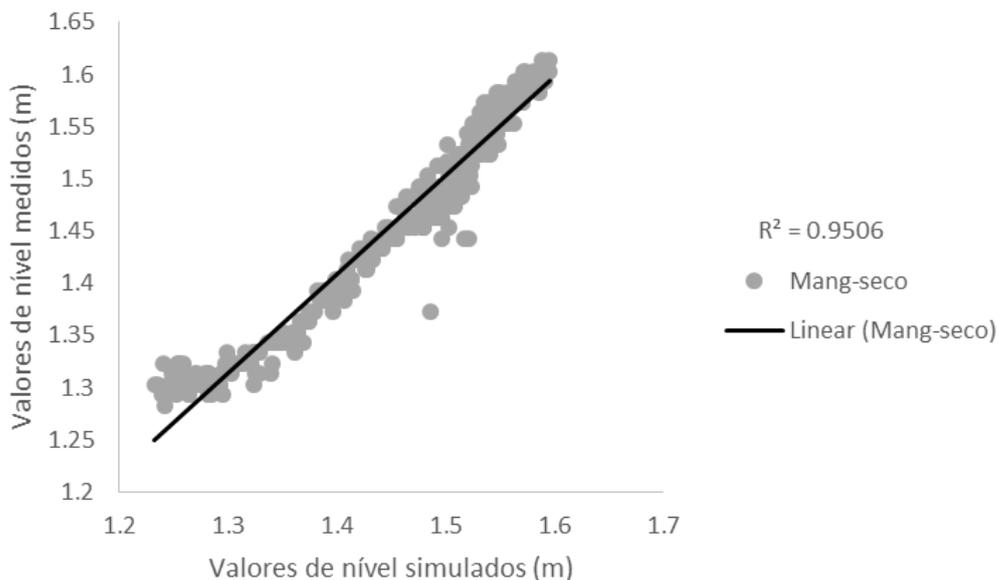
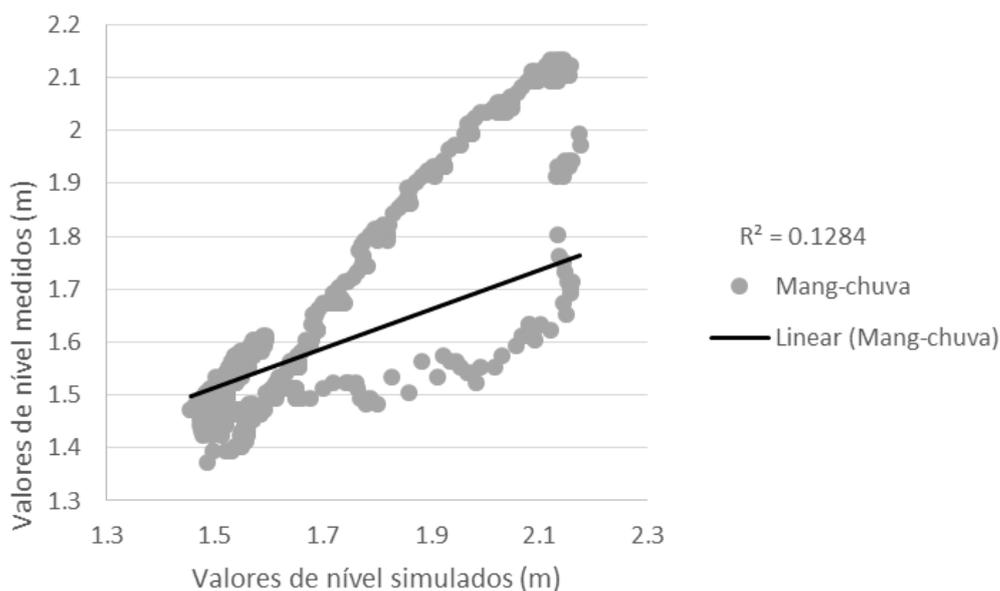


Figura 9 - Regressão linear entre os valores de níveis calculados e simulados na laguna Manguaba no período chuvoso.



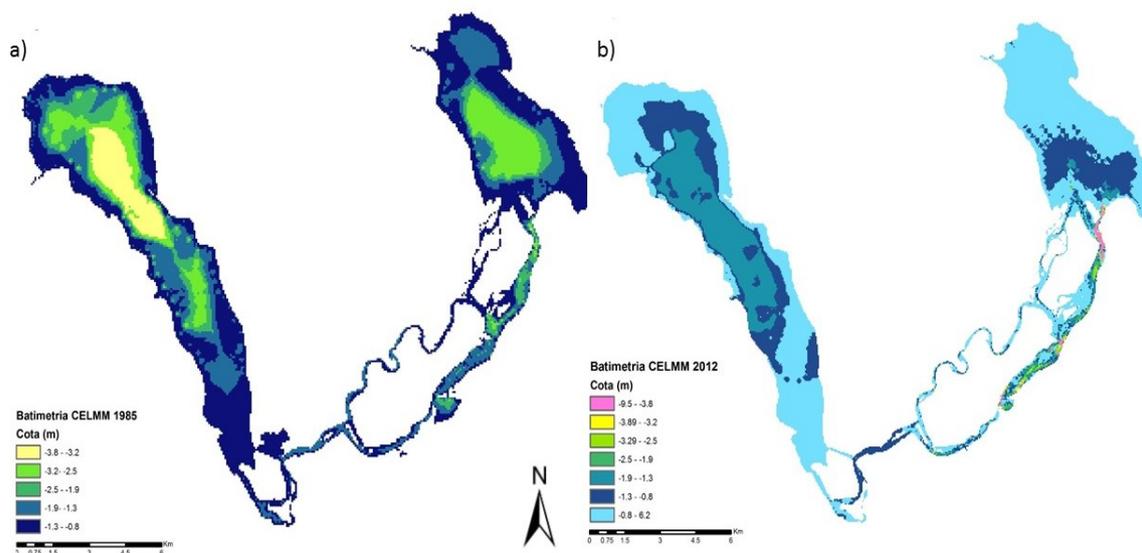
A diferença entre os valores calculados e observados para a entrada do hidrograma na Manguaba a partir do dia 14 (Figura 7) pode ser atribuída à diferença na frequência de obtenção de dados: o modelo utiliza médias diárias de vazão para estimar o nível, enquanto os dados observados são coletados numa frequência horária, podendo haver divergências em períodos de vazões maiores. Nota-se que o

modelo acompanhou bem a subida e a descida do nível, porém com uma defasagem no tempo, contribuindo para um resultado insatisfatório de calibração nesse período. Entretanto, como o período de interesse envolve pequenas vazões, este resultado não será considerado na sequência deste trabalho.

4.2. Batimetria

Analisando visualmente as batimetrias de 1985 e de 2012 (Figura 10), nota-se uma grande diferença nos valores de cota das lagunas. Para melhorar a análise, foram adicionadas duas faixas de valores ao ano de 2012: a região azul mais clara indica toda a área com profundidade menor que os menores valores levantados em 1985, e a região em rosa representa as áreas que sofreram erosão.

Figura 10 - Batimetria do CELMM a) em 1985 e b) em 2012



A fim de analisar quantitativamente a perda de capacidade de armazenamento do CELMM nos 27 anos que separam os levantamentos batimétricos, foi feita uma comparação entre as médias de profundidade de cada laguna. Em 1985 as lagunas Mundaú e Manguaba tinham profundidade média de 1,50 m e 2,10 m, respectivamente (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993). Em 2012, a média na Mundaú era de 1,19 m e, na Manguaba, de 1,67 m.

Em 27 anos a laguna Mundaú perdeu 31 cm de profundidade média, a uma taxa de 1,15 cm/ano. A Manguaba perdeu 43 cm de profundidade média, a uma taxa de 1,59 cm/ano. Estes resultados indicam que as lagunas Mundaú e Manguaba

perdem 310.000 m³/ano e 668.889 m³/ano de sua capacidade de armazenamento, respectivamente. Admitindo que a taxa de perda de profundidade se mantenha constante, a laguna Mundaú levará 104,5 anos para perder suas características estuarinas e transformar-se em pântano, enquanto a Manguaba levará 106 anos.

Segundo o diagnóstico do Plano de Ações e Gestão Integrada do CELMM desenvolvido pela ANA em 2006, algumas ações estão acelerando o processo natural de assoreamento do complexo: o desmatamento e a urbanização não consolidada ou planejada, aterro e ocupação de áreas de risco, práticas agrícolas inadequadas ao longo das bacias contribuintes, falta de saneamento básico, principalmente nas cidades do entorno do CELMM, e ações ambientalmente degradantes. Ainda segundo a ANA, estas ações somadas à fragilidade institucional do setor de recursos hídricos comprometem e influenciam diretamente na qualidade da água.

4.3. Cenários de vazão

A análise de dados de vazão nos postos fluviométricos trouxe os seguintes resultados: a Q_{90} encontrada nas curvas de permanência foi de 5,52 m³/s para a Fazenda Boa Fortuna e 2,49 m³/s para Atalaia.

Considerando a relação linear entre área de drenagem dos postos e área de drenagem da bacia, o aumento de contribuição de vazão foi de 16% para a laguna Mundaú e de 43% para a Manguaba (Tabela 4).

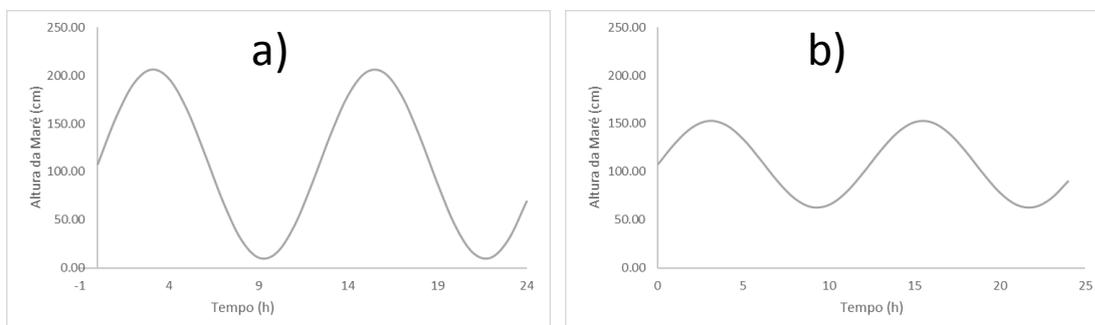
Tabela 4 - Valores das vazões Q_{90} utilizadas no modelo, considerando as áreas de contribuição de cada laguna.

	Código do posto	Área de drenagem do posto	Área de drenagem da bacia	Q_{90} (m³/s)
Mundaú	39770000	3.560 Km ²	4.126 Km ²	6,39
Manguaba	39870000	2.600 Km ²	3.718 Km ²	3,56

4.4. Cenários de maré

Como resultado da elaboração dos cenários de maré, obtivemos as seguintes representações (Figura 11):

Figura 11 - Cenários de maré de a) sizígia e b) quadratura.



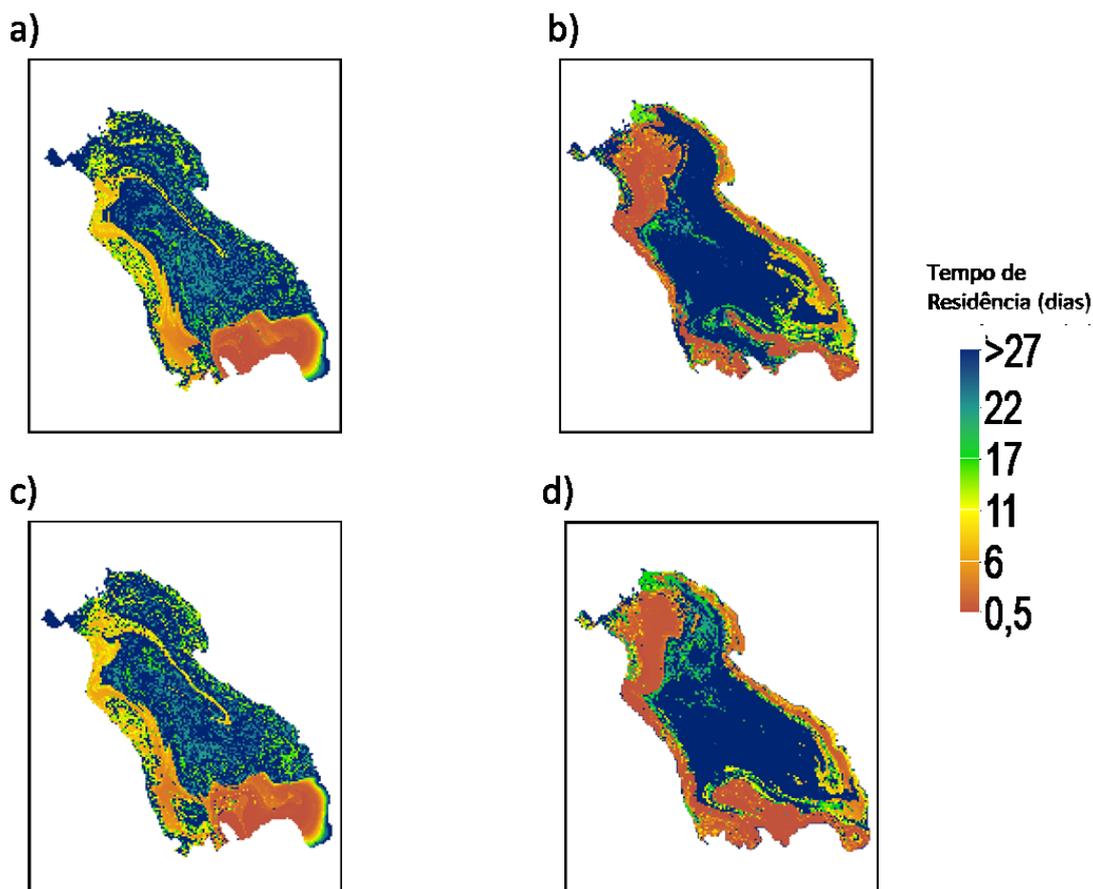
4.5. Tempo de Residência

Com o resultado da modelagem matemática, foram criados mapas de tempos de residência para os cenários propostos. A comparação de cenários auxilia na compreensão das principais mudanças ocorridas entre os anos de 1985 e 2014.

Em 1985 (Figura 12 a) e c)), nota-se que a mudança do tipo de maré não influencia significativamente na distribuição espacial do TR na laguna Mundaú. O TR na margem leste e na região central da laguna apresentam valores acima de 17 dias nas condições de sizígia e quadratura. Entretanto, quando submetida a uma maré de quadratura, a saída na margem oeste e na região central próxima à margem leste ocorre mais rapidamente.

Em 27 anos a configuração da espacialidade do TR foi drasticamente modificada. Em 2014 há uma melhora significativa do fluxo na margem oeste da laguna, que apresenta TR entre 0,5 e 6 dias, e piora na região central, que tem TR maior que o tempo de simulação. Quanto a influência do tipo de maré, o TR é reduzido na região próxima aos canais no cenário de quadratura (Figura 12-c)), indicando que, no balanço de fluxos, a saída é mais significativa que nas condições de sizígia (Figura 12-b)).

Figura 12 - Espacialidade do TR para as condições de maré de sizígia em a) 1985 e b) 2014, e de maré de quadratura em c) 1985 e d) 2014, na laguna Mundaú.

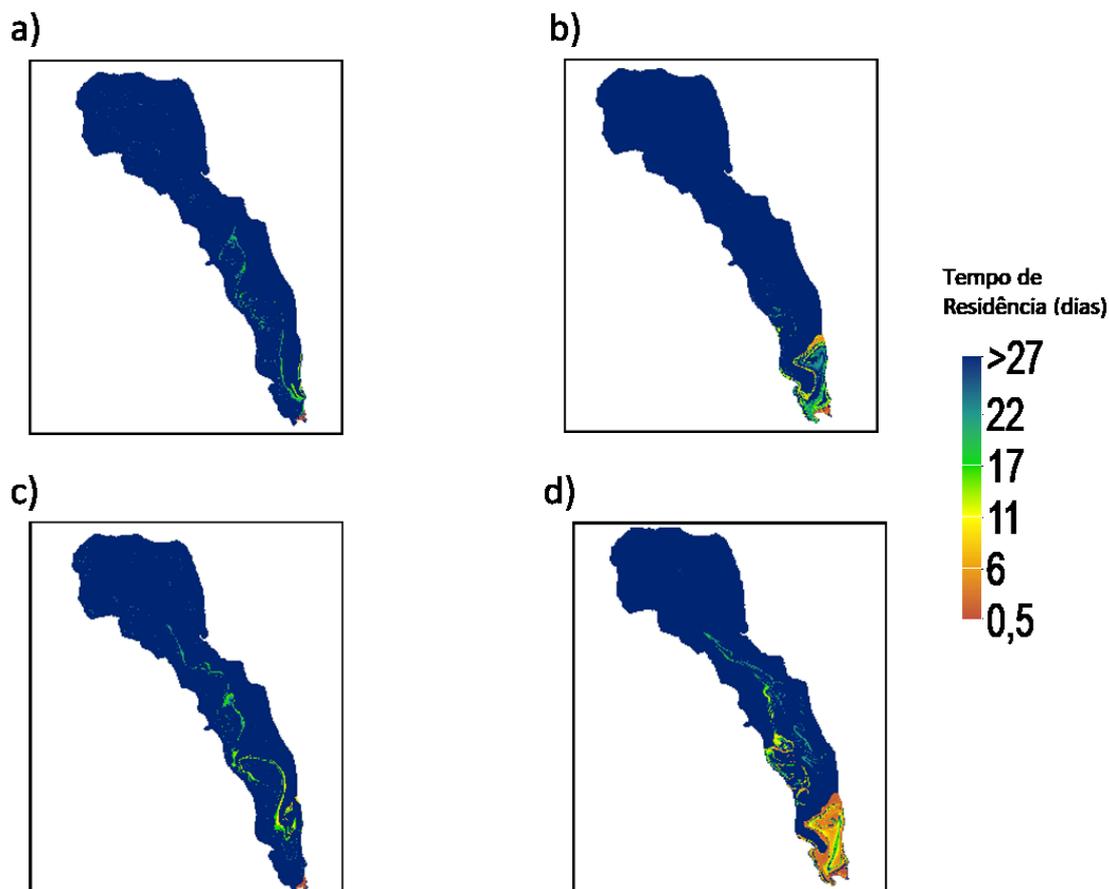


Para a Manguaba, em 1985, a porção norte e algumas regiões nas margens apresentaram TR maior que o tempo de simulação, onde o contorno da laguna favorece o aprisionamento (Figura 13-a) e c)).

Em 2014, os maiores TR se concentraram numa região da margem oeste, localizada próxima à entrada de vazão e, assim como na Mundaú, a influência fluvial foi menor na margem leste (Figura 13-b) e d)). A influência de marés não é significativa quando a laguna é submetida a vazões máximas extremas, visto que não houve modificação significativa com a mudança de sizígia para quadratura.

Comparando os cenários de 1985 e 2014, o aumento do TR e a diminuição da influência da descarga fluvial na margem leste, indica que esta região é mais afetada pelo assoreamento que as demais.

Figura 13 - Espacialidade do TR para as condições de maré de sizígia em a) 1985 e b) 2014, e de maré de quadratura em c) 1985 e d) 2014, na laguna Manguaba.



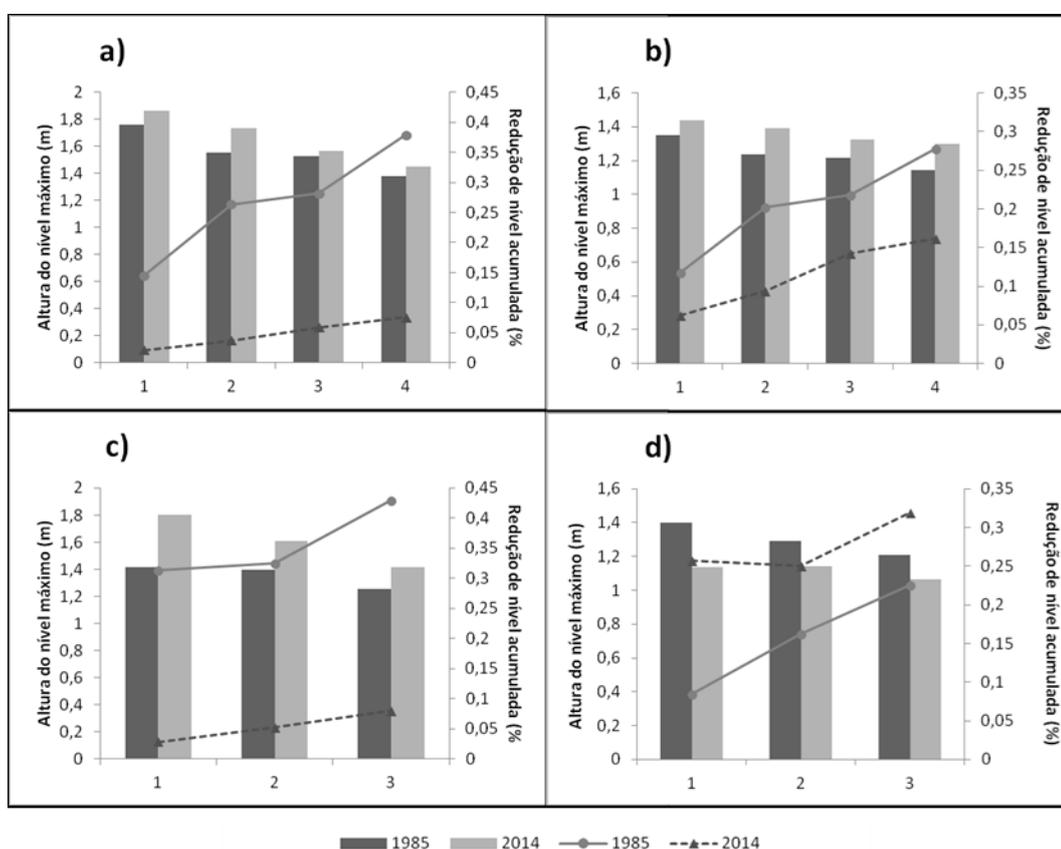
A simulação na laguna Manguaba, em 1985, mostrou que apenas uma pequena região do centro ao sul da laguna possui TR inferior ao tempo de simulação e que a maré de quadratura exercia maior influência, quanto a renovação da laguna, em comparação ao efeito da maré de sizígia (Figura 13-a) e c)).

Quanto as modificações ocorridas entre os anos de 1985 e 2014, nota-se uma melhora significativa no fluxo da região sul da Manguaba (Figura 13). Essa melhora está associada a abertura do canal na região da Barra Nova. Assim como no ano de 1985, a maré de quadratura se apresenta como principal forçante na renovação estuarina em condições de pouca vazão, quando comparada à maré de sizígia, e com menos influência na região mais ao norte da laguna.

Associando a geometria da entrada de lagoas estranguladas com o tempo de residência, RYNNE et al (2016) verificou que à medida que a entrada é restringida, a

magnitude de troca se aproxima de zero e o TR tende ao infinito. Em casos extremos, a fricção é dominante sob os efeitos de vazão e de maré, fazendo com que a velocidade e o prisma de maré sejam reduzidos. Desta forma, verificando o amortecimento da onda ao longo dos canais do CELMM que levam à laguna Mundaú (Figura 14 a) e c) e à Manguaba (Figura 14 b) e d)) sob as condições de sizígia (Figura 14 a) e c)) e quadratura (Figura 14 b) e d)), nota-se uma redução de nível acumulada menor no ano de 2014, exceto na laguna Manguaba em períodos de maré de quadratura (Figura 14 d)).

Figura 14 - Amortecimento de onda nos canais do CELMM na direção da laguna Mundaú (a) e b)) e Manguaba (c) e d)), sob as condições de maré de sizígia e quadratura, respectivamente.



Em 1985 havia uma única abertura de comunicação entre o CELMM e o oceano, diminuindo a capacidade de renovação do complexo. Com a abertura do canal na Barra Nova e a diminuição do volume do CELMM, devido ao assoreamento, o efeito do atrito diminuiu, aumentando a velocidade de troca.

Trajétoria de Partículas

A principal mudança ocorrida na trajetória das partículas foi a diminuição no TR (Figuras 15, 16, 17 e 18). Na laguna Mundaú as partículas movimentam-se no sentido anti-horário, com recirculação, corroborando com os estudos feitos por ANA (2012) e BRITO JR. et al (2017).

Na laguna Manguaba o movimento padrão também ocorre no sentido anti-horário, porém com maior recirculação, quando comparada à Mundaú. Comparando 1985 e 2014, houve uma mudança significativa na hidrodinâmica local. A abertura do canal na Barra Nova, associada ao assoreamento, contribuíram para que isto ocorresse.

Assim, a diminuição do volume de água no CELMM e o aumento de lançamento de efluentes causaram a piora na qualidade da água do CELMM, visto que o poder de renovação das lagunas foi melhorado devido à conexão direta da laguna Manguaba com o oceano.

Figura 15 - Trajetórias de partículas com diferentes pontos de lançamento em 1985 - a), b), c) - e em 2014 - f), g), h) - para o cenário 01, na laguna Mundaú.

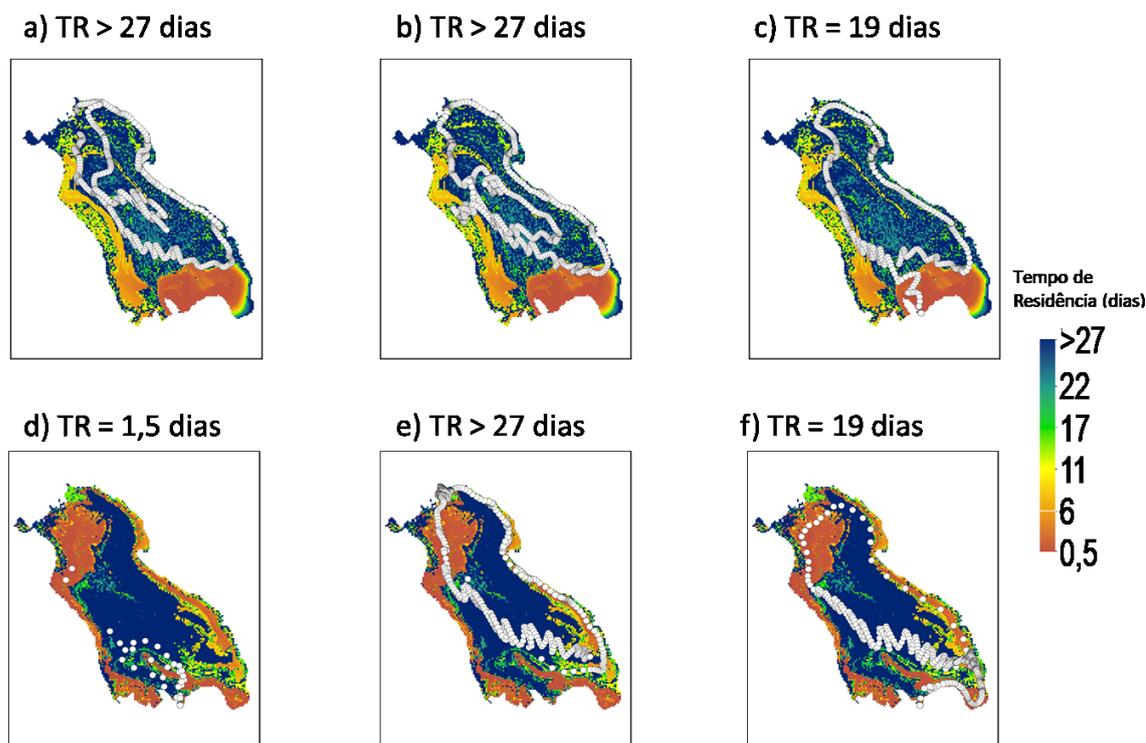


Figura 16 - Trajetórias de partículas com diferentes pontos de lançamento em 1985 - a), b), c) - e em 2014 - f), g), h) - para o cenário 02, na laguna Mundaú.

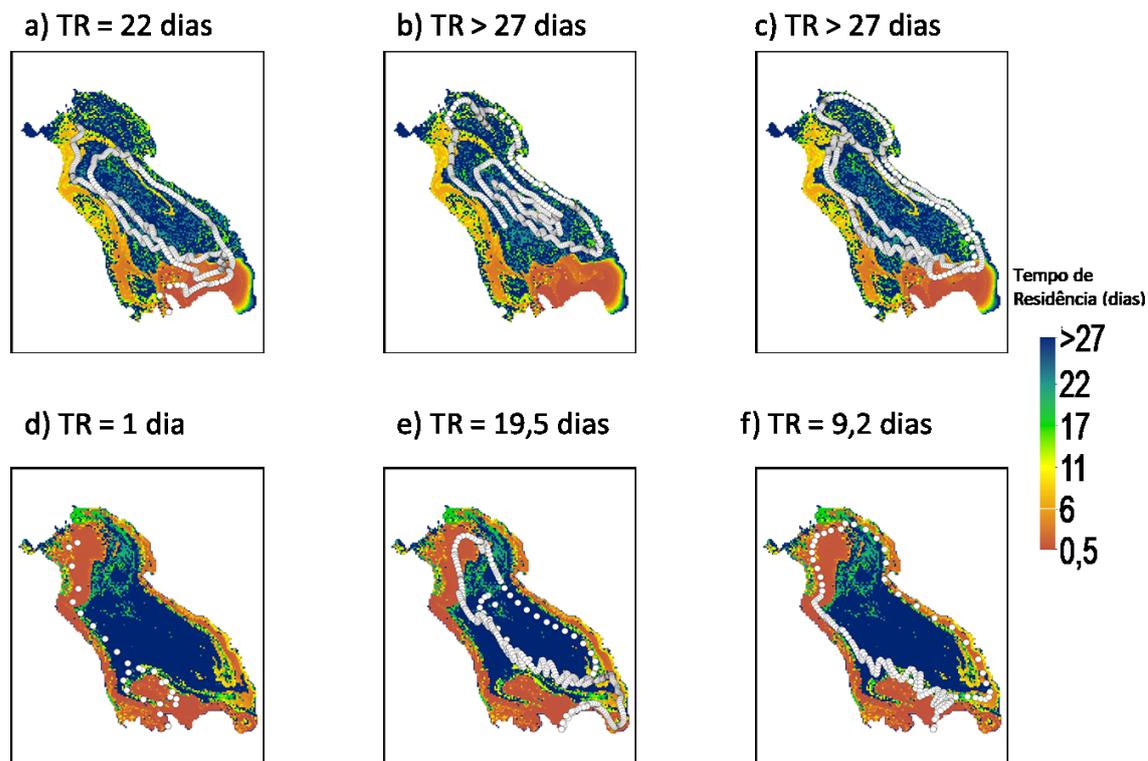


Figura 17 -Trajetórias de partículas com diferentes pontos de lançamento em 1985 - a), b), c) - e em 2014 - f), g), h) - para o cenário 01, na laguna Manguaba.

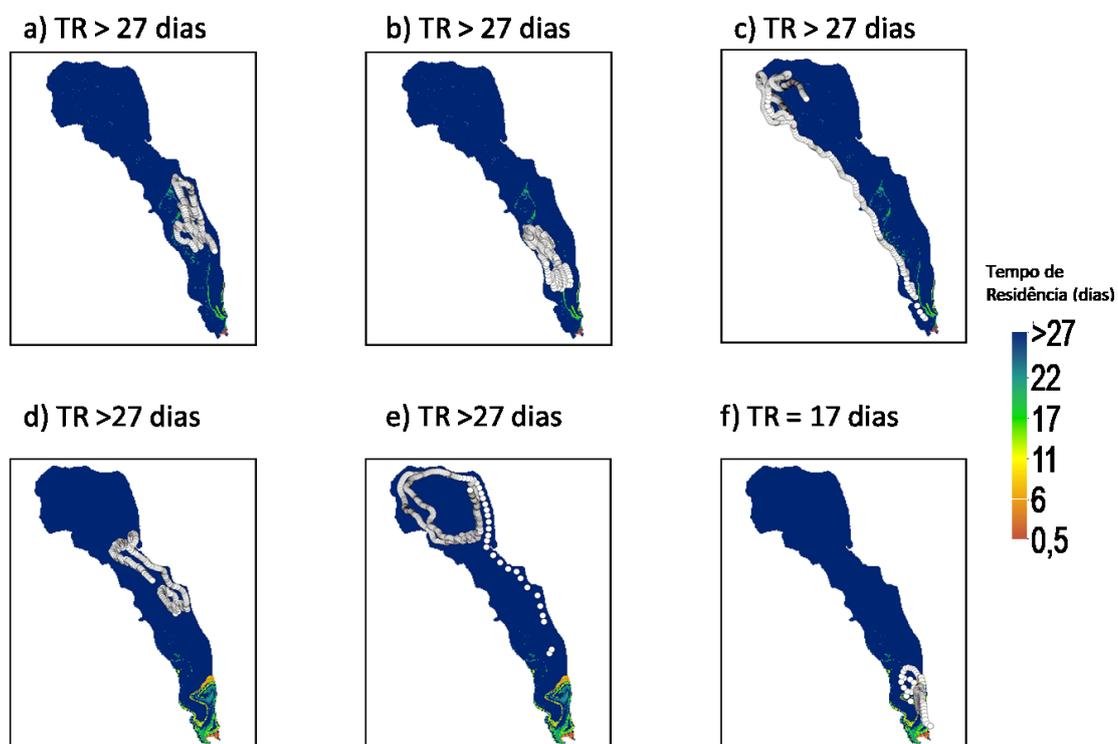
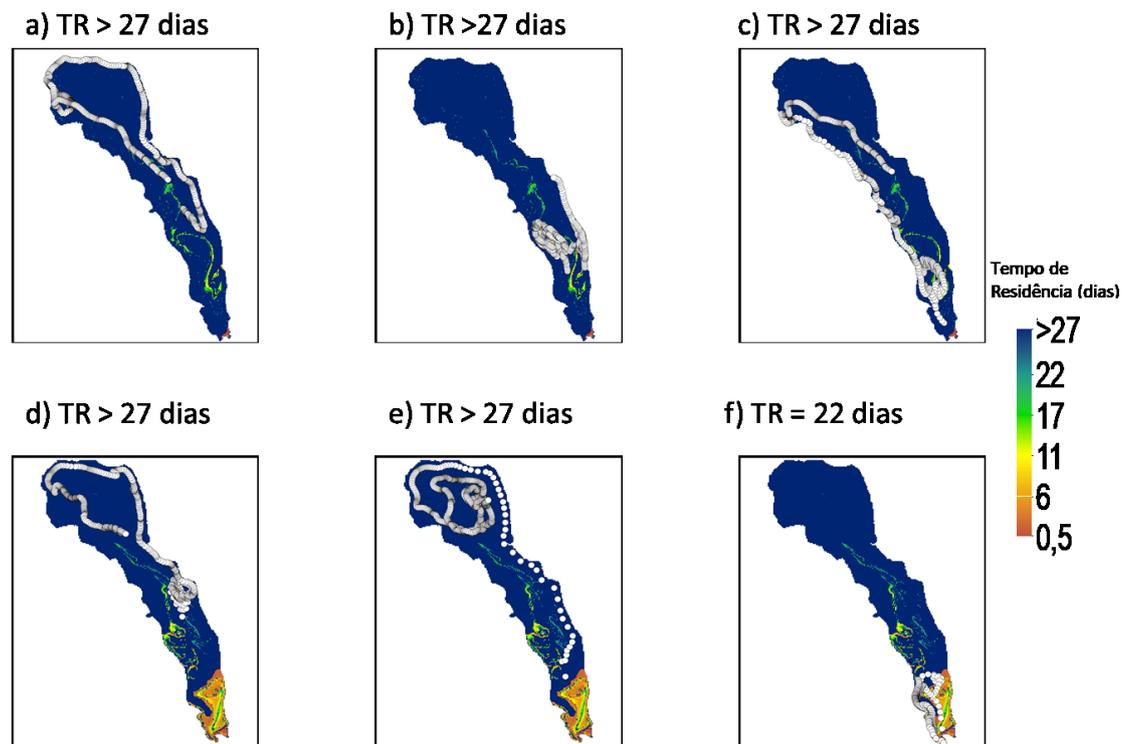


Figura 18 - Trajetórias de partículas com diferentes pontos de lançamento em 1985 - a), b) c) e em 2014 - d) e) b) para o cenário 02 na laguna Manguaba



MELO-MAGALHÃES et al (2009) caracterizou a comunidade fitoplanctônica das lagunas. Na Mundaú, a espécie em abundância foi a *Skeletonema cf. Costatum*, diatomácea. Sua presença é justificada pela grande disponibilidade de nutrientes e por sua capacidade de suportar variações de salinidade, corroborando com os resultados encontrados de aumento da influência da maré no meio e maior permanência de nutrientes, devido à recirculação.

A geomorfologia da Manguaba associada a baixas velocidades, altas concentrações de nutrientes e elevados TR, favorecem o crescimento de cianobactérias, espécie de alga que pode trazer sérios problemas à saúde humana, bem como implicações na cadeia trófica aquática, devido à sua toxicidade. Essas espécies são encontradas na laguna tanto em períodos secos, quanto em períodos chuvosos (MELO-MAGALHÃES et al, 2009).

5. CONCLUSÕES

O assoreamento e as modificações na boca do CELMM são as principais causas de modificações na hidrodinâmica e no tempo de residência das lagunas Mundaú e Manguaba. A nova conexão entre a laguna Manguaba e o oceano e a diminuição do volume, devido ao assoreamento, faz com que o efeito do atrito seja menor, reduzindo o tempo de residência do CELMM.

As modificações físicas sofridas ao longo dos anos alteram a espacialidade e a magnitude do TR e da velocidade. Na Manguaba, estas modificações alteraram o padrão de circulação da laguna. Na Mundaú, a renovação da margem leste é possível graças à comunicação, agora exclusiva, desta com o oceano.

Como o TR diminuiu, a deterioração da qualidade da água do CELMM está associada ao aumento de lançamento de efluentes domésticos e industriais e à baixa diluição dos mesmos, já que o volume do complexo foi reduzido devido ao assoreamento. Assim, as regiões com maiores TR e recirculação são as mais prejudicadas quanto à qualidade da água, pois os nutrientes e poluentes são retidos e acumulados por mais tempo e com maiores concentrações.

Os resultados deste trabalho mostram como o assoreamento e outras modificações físicas alteram significativamente as características do CELMM, e como as ações antrópicas estão acelerando a transformação do ambiente estuarino em pântano que, de maneira otimista, levará cerca de 100 anos para ocorrer. Desta forma, ações que visem diminuição e/ou mitigação desse processo devem ser tomadas com urgência.

Para trabalhos futuros, recomenda-se utilizar tempo de simulação superior a 28 dias e cenários com vazões menos extremas, a fim de observar melhor o que ocorre em situações recorrentes e em regiões com tempo de residência elevado.

REFERÊNCIAS

ANA, Diagnóstico e modelagem hidrodinâmica e de qualidade das águas do Complexo Estuarino da lagoa Mundaú. Brasília: ANA, 2013.

Bolin, B., Rodhe, H. A note on the concept of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*. v. 25 (1). 1973. p. 58-62.

Brasil, 1986. Resolução CONAMA 01, de 17 de fevereiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF. Seção 1. p. 2548 – 2549.

Brito Jr. A. N.; Fragoso Jr. C.R.; Larson, M. Tidal Exchange in a choked coastal lagoon: A study of Mundaú Lagoon in northeastern Brazil. *Em execução*. 2017.

Casulli, V.; Cattani, E., Stability, Accuracy and Efficiency of a Semiimplicit Method for 3-Dimensional Shallow-Water Flow. *Computers & Mathematics with Applications* v.27, 1994. p. 99-112

Casulli, V.; Cheng, R.T., Semiimplicit Finite-Difference Methods for 3-Dimensional Shallow-Water Flow. *Int. J. Numer. Methods Fluids* v. 15, 1992. p. 629-648.

Cotovicz Júnior, L.C.; Brandini, N.; Knoppers, B.A.; Souza, W.F.L.; Medeiros, P.R.P. Comparação de modelos e índices de estado trófico do complexo estuarino lagunar mundaú-manguaba, (AL). *Geochimica Brasiliensis*. v. 26(1). 2012. P. 7-18.

Defne, Z.; Ganju, N.K. Quantifying the Residence Time and Flushing Characteristics of a Shallow, Back-Barrier Estuary: Application of Hydrodynamic and Particle Tracking Models. *Estuaries and Coasts*. v.38. 2014. p. 1719-1734.

Ferreira J.G., Wolff W.J., Simas T.C., Bricker S.B. Does biodiversity of estuarine phytoplankton depend on hydrology? *Ecological Modelling*. v. 187. 2005. p. 513-523

Fragoso Jr.; C. R.; Souza, R. C.; Lages, E. N.; Acioli, L. A. Desenvolvimento de um Modelo Matemático de Circulação de Águas usando o MATLAB. In: Anais do V Simposio de Recursos Hídricos do Nordeste/ABRH. Natal/RN. 02, 737 – 744. 2000.

Geyer, W.R. Influence of wind on dynamics and flushing of shallow estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. v. 44. 1997. p. 713-722.

Gillanders, B.M.; Kingsford, M.J. Impacts of changes in flow of freshwater on estuarine and open coastal habitats and the associated organisms. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. v.40. 2002. p. 233-309.

González, F.U.T., Herrera-Silveira, J. A., Aguirre-Macedo, M.L. Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. v.76. 2008. p.418-430.

Hearn, C.J., Robson, B.J. On the effects of wind and tides on the hydrodynamics of a shallow Mediterranean estuary. *Continental Shelf Research*. v. 22. 2002. p. 2655-2672.

Larsson, L.; Nilsson, S. Hydrodynamic Modeling of the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon System, Brazil. *Department of Building and Environmental Technology – Lund University – Faculty of Engineering, LTH*. 2014.

Lazure, P.; Salomon, J. Coupled 2-D and 3-D Modelling of Coastal Hydrodynamics. *Oceanologica Acta*. v. 14 (2). 1991. p. 173-180.

Liu, B.; Swart, H. Impact of River Discharge on Phytoplankton Bloom Dynamics in Eutrophic Estuaries: A Model Study. *Journal of Marine Systems*. v. 152. 2015. p. 64-74.

Liu, W.; Chen, W.; Hsu, M. Using a Three-Dimensional Particle-Tracking Model to Estimate the Residence Time and Age of Water in a Tidal Estuary. *Computers & Geosciences*. v. 37. 2010. p. 1148-116.

Loneragan, N.R.; Bunn, S.E. River flow and estuarine ecosystems: Implications for coastal fisheries from a review and a case study of the Logan River, southeast Queensland. *Australian Journal of Ecology*. v. 24. 1999. p. 431-440.

MARECHAL DEODORO. *Prefeitura Municipal*, 2011. Disponível em <<http://www.marechaldeodoro.al.gov.br/2011/08/prefeitura-faz-acao-para-diminuir-enchente/>>

Martins, M.C.S.; Ferreira, J.G.; Calvão, T.; Figueiredo, H. Nutrientes no Estuário do Tejo: Comparação da situação em caudais médios e em cheia, com destaque para alterações na qualidade da água. *I Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Lisboa, Portugal, 1984.

Melo-Magalhães, E.M.; Medeiros, P.R.P.; Lira, M.C.A.; Koenig, M.L.; Moura, A.N. Determination of eutrophic áreas in Mundaú/Manguaba lagoons, Alagoas-Brazil, through studies of the phytoplanktonic community. *Brazilian Journal of Biology*, v. 69. 2009. p. 1-10

Mohlenberg, F. Effect of meteorology and nutrient load on oxygen depletion in a Danish micro-tidal estuary. *Aquatic Ecology*. v. 33. 1999. p. 55-64.

Ni, X., Huang, D., Zeng, D., Zhang, T., Li, H., Chen, J. The Impact of wind mixing on the variation of bottom dissolved oxygen of the Changjiang Estuary during summer. *Journal of Marine Systems*. v. 154. 2014. p. 122-130.

Officer, C.B.; Kester, D.R. On Estimating the non-advective Tidal Exchanges and Advective Gravitational Circulation in an Estuary. *Estuarine Coastal Shelf*. v. 32. 1991. p. 99-103.

Oliveira, A.; Baptista, A.M. Diagnostic Modeling of Residence Time in Estuaries. *Water Resources Research*. v.33 (8). 1997. p. 1935-1946.

Oliveira, A.M., Kjerfve, B. Environmental responses of a tropical coastal lagoon system to hydrological variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. v. 37. 1993. p. 575-591.

Pearson, R. V.; Barber, R.W. Modelling depth-integrated Contaminant Dispersion in the Humber Estuary using a Lagrangian Particle Tracking. *Water Resources Research Group, Telford Institute of Environmental Systems, University of Salford, UK*. 1996.

Pilson, M.E. On The Residence Time of Water in Narragansett Bay. *Estuaries*. v. 8(1). 1985. p. 2-14.

Rousseau, V.; Lancelot, C.; Cox, D. *Current Status of Eutrophication in the Belgian Coastal Zone*. Université Libre de Bruxelles, Université D'Europe. p.20. 2006.

Rynne, P.; Reiners, A.; Kreeke, J.; MacMahan, J. The Effect of Exchange on Residence Time in a Coastal Embayment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. v.172. 2016. p. 108-120.

Scott, C. Particle Tracking Simulation of Pollutant Discharges. *Journal of Environmental Engineering*. v. 23. 1997. p. 919-927.

Takeoka, H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*. v.3 (3). 1984. p. 311-326.

Valentim, S.S. Importância do balanço hídrico na circulação em um estuário do semiárido: O estuário do rio Coreaú (NW/Ceará/Brasil). 2016. 163 f. *Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais)* – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016.

Zhang, M.; Townend, I.; Zhou, Y.; Cai, H. Seasonal variation of river and tide energy in the Yangtze estuary, China. *Earth Surface Process and Landforms*. v.41. 2015. p. 98-116.

Zhang, W.G.; Wilkin, J.L.; Schofield, O.M.E. Simulation of Water Age and Residence Time in New York Bight. *Journal of Physical Oceanography*. v. 40. 2010. p. 965-982.

Zimmerman, J.T.F. Mixing and flushing of tidal embayments in the western dutch wadden sea Part 1: distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Netherlands Journal of Sea Research*. v. 10 (2). 1976. p. 149-191