



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

ARTHUR SOUZA DOS SANTOS

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA ESTUARINO DOS RIOS MOJUM E
MOCAJUBA (PARÁ-BR)**

BELÉM-PA
2016

ARTHUR SOUZA DOS SANTOS

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA ESTUARINO DOS RIOS MOJUM E
MOCAJUBA (PARÁ-BR)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento às exigências para a obtenção de título de Mestre em Geofísica Marinha.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic

BELÉM-PA

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Santos, Arthur Souza dos, 1987-
Modelagem matemática do sistema estuarino dos rios
Mojuim e Mocajuba (Pará-BR) / Arthur Souza dos Santos. -
2016.

Orientador: Marcelo Rollnic. Dissertação
(Mestrado) - Universidade
Federal do Pará, Instituto de Geociências,
Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém,
2016.

1. Hidrodinâmica - Modelos matemáticos. 2.
Estuários - Trópicos. 3. Hidrografia - Pará. I.
Título.

CDD 22. ed. 532.50151

ARTHUR SOUZA DOS SANTOS

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA ESTUARINO DOS RIOS MOJUIM E
MOCAJUBA (PARÁ-BR)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento às exigências para a obtenção de título de Mestre em

Data da Aprovação: 29 / 02 / 2016

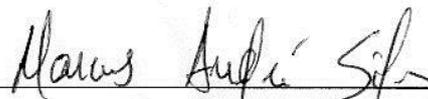
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Marcelo Rollnic – Orientador
Doutor em Oceanografia Física
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Alexandre Melo Casseb do Carmo
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Marcus André Silva
Doutor em Oceanografia Física
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Os estuários dos rios Mojuim e Mocajuba no setor leste da Zona Costeira Amazônica representam um ambiente peculiar e complexo, pois são conectados entre si e sofrem influência tanto da baía do Marajó quanto do Oceano Atlântico. O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo a implementação de um modelo hidrodinâmico baseado em malha flexível no sistema estuarino do rio Mojuim e Mocajuba, além de analisar as características hidrográficas e hidrodinâmicas dos estuários superiores desses rios. A metodologia é baseada na utilização do modelo D-Flow Flexible Mesh que abrangeu em seu domínio os rios Mojuim e Mocajuba, os canais que conectam esses rios, parte da desembocadura da baía do Marajó e as planícies de maré adjacentes. Também foi realizada uma coleta sistemática de dados “*in situ*”, no qual foram analisados os parâmetros de corrente, salinidade, turbidez e nível da água, durante um ciclo de maré em pontos localizados no estuário superior dos rios Mojuim e Mocajuba. No rio Mojuim foram feitas duas campanhas sazonais em dois pontos distintos e no rio Mocajuba foi feita apenas uma campanha no período chuvoso, entretanto, foi instalado nesta localidade uma estação maregráfica que operou por 25 semanas. Parte dos dados amostrais foram usados como entrada no modelo hidrodinâmico implementado. O estuário superior do rio Mocajuba apresentou um regime de macromaré com a altura máxima registrada de 5,8 m. Já no rio Mojuim é possível notar uma gradual atenuação da onda de maré, sendo que no ponto de coleta mais a montante do estuário foi possível observar um fluxo unidirecional de descarga no período chuvoso. Foi observado também um padrão hidrodinâmico diferenciado entre os rios, com as velocidades de vazantes mais intensas que as enchentes e suas propriedades hidrográficas diretamente influenciadas pela flutuação da maré. Por fim foi implementado e calibrado o modelo hidrodinâmico em malha flexível na área de estudo, onde foram atribuídas condições iniciais e de contorno, além de ajustes nas forçantes de fronteira. O modelo gerou uma boa representação das condições do estuário, mostrando padrões maregráficos e hidrodinâmicos aceitáveis quando comparados com medições “*in situ*”, uma vez que os erros entre os dados medidos e modelados em relação ao nível da água foram menores que 5% e os erros em relação ao transporte menores que 15 %.

Palavras-chave: D-Flow Flexible Mesh. Rio Mojuim. Rio Mocajuba. Estuário tropical. Baixa descarga. Malha flexível.

ABSTRACT

The estuaries of Mojuim and Mocajuba rivers are located in the eastern sector of the Amazon Coastal Zone and represent a peculiar and complex environment. They are connected by several channels and receive influence of the Bay of Marajó and the Atlantic Ocean. The following research aims to implement a hydrodynamic model based on a flexible grid on the of Mojuim and Mocajuba rivers estuarine system; and to analyze the hydrological and hydrodynamic characteristics of the upper estuary of these rivers. The methodology involves the use of D-Flow Flexible Mesh pack a get simulate hydrodynamics patterns into the domain that covers the Mojuim Mocajuba rivers, the canals connecting these rivers, part of the mouth of the Bay of Marajó and the adjacent tidal flats. It was also performed an "*in situ*" systematic data collection, in which parameters of flow, salinity, turbidity and water level were analyzed during a tidal cycle in sites located at the upper estuary of Mojuim and Mocajuba rivers. In the Mojuim river two seasonal campaigns were made in two different sites and in the Mocajuba river only one campaign were made in the rainy season, however, a tide station was installed in this location that operated for 25 weeks. Part of the sample data were used as input to the hydrodynamic model. The upper estuary of Mocajuba river presented a macrotidal regime with maximum height of 5.8m recorded. In the Mojuim river, a gradual attenuation of the tidal wave is noticeable and, in the collection point and in the upper estuary a one-way flow discharge during the rainy season was observed. A different hydrodynamic pattern between the two rivers was also observed, with ebb speed more intense than floods and their hydrological properties directly influenced by the tide fluctuation. Finally a hydrodynamic model in flexible grid was implemented and calibrated in the researched area, where initial and boundary conditions were assigned, as well as adjustments to the border forcing. The model generated a good representation of the estuary conditions, showing acceptable tidal and hydrodynamic pattern when compared with the "*in situ*" measurement, once the error between the measured data and modeled data related to the water level were less than 5%, and errors related to transportation are lower than 15%.

Keywords: D-Flow FM. Mojuim river. Mocajuba river. Tropical estuary. Low discharge. Flexible mesh.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Localização da área de estudo.	16
Figura 2- (a) Principais atividades da ZCA, com destaque as atividades portuárias, pesqueiras e petrolíferas. (b) Principais RESEX do sistema estuarino do rio Mojuim e Mocajuba.....	20
Figura 3- Tipos de malhas: (a) retangular, (b) curvilínea, (c) triangular.....	22
Figura 4- Princípio da ortogonalização em uma malha não estruturada.	23
Figura 5- Malha discretizada, com destaque para os elementos curvilíneos e triangulares nas áreas de conexão entre os canais.....	28
Figura 6- Batimetria interpolada dentro do domínio.	30
Figura 7- Gráfico indicando as intensidades e direções do vento.	32
Figura 8- Regime pluviométrico mensal referente ao ano de 2014.....	33
Figura 9- Mapa de localização das estações de coleta: (a) estações P1 e P2 no rio Mojuim, (b) estação L1 no rio Mocajuba.	35
Figura 10- (a) Curva de maré no rio Mocajuba, com destaque em (b) a maior sizígia e em (c) a menor quadratura.	38
Figura 11- Principais constituintes harmônicas.....	39
Figura 12- Intensidade e direção das correntes para estação L1.	40
Figura 13- Propriedades hidrográficas e hidrodinâmicas da estação L1.	41
Figura 14- Intensidade e direção das correntes para a estação P1: (a) período chuvoso, (b) período seco.	42
Figura 15- Velocidade longitudinal durante um ciclo de maré para a estação P1: (a) período chuvoso, (b) período seco. Obs: no período chuvoso só ocorreram medições de corrente durante meio ciclo de maré.....	43
Figura 16- Salinidade durante um ciclo de maré para a estação P2: (a) período chuvoso (b) período seco.	43
Figura 17- Intensidade e direção das correntes para a estação P2. (a) período chuvoso, (b) período seco.	44
Figura 18- Velocidade longitudinal durante um ciclo de maré para a estação P2: (a) período chuvoso, (b) período seco.	45
Figura 19- Estações usadas para a calibração do modelo.....	47
Figura 20- Comparação da série temporal dos dados de elevação do nível da água.....	49

Figura 21- Análise de correlação do nível da água onde os valores modelados são comparados com os valores previstos e/ou medidos.....	50
Figura 22- Série temporal do transporte para dados medidos e dados modelados.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Descarga fluvial de alguns rios da Amazônia.	18
Tabela 2- Localização das estações de coleta.....	34
Tabela 3- Média, máximos e mínimos das propriedades analisadas.	41
Tabela 4- Coeficientes de Manning usados no domínio.....	46
Tabela 5- Pontos de calibração e suas respectivas fontes e posições geográficas.....	46
Tabela 6- Características das constituintes de maré usadas na calibração do modelo.	48
Tabela 7- Coeficiente de correlação de Nash-Sutcliffe para a série inteira e Erro Quadrático Médio para quatro períodos lunares diferentes.	51
Tabela 8- Amplitude em metros das constituintes diurnas para os valores medidos e modelados.	51
Tabela 9- Amplitude em metros das constituintes semidiurnas para valores medidos e modelados.	52
Tabela 10- Amplitude em metros das constituintes de água rasa para valores medidos e modelados.	52
Tabela 11- Coeficiente de correlação de Nash-Sutcliffe e Erro Quadrático Médio para os valores de transporte modelados e medidos.....	53
Tabela 12- Transporte resultante medido e modelado.....	54

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	11
1.1 Organização do manuscrito	11
1.2 Introdução	11
1.3 Justificativa	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivos Gerais	15
1.4.3 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 Área de estudo	16
2.1.1 Aspectos Climáticos e Oceanográficos	17
2.1.2. Hidrologia	18
2.1.3 Geologia da Área	19
2.1.5 Principais atividades e Unidades de Conservação	19
2.2 Descrição da modelagem matemática	21
2.2.1 Modelo Hidrodinâmico	21
2.2.2 D-Flow Flexible Mesh	21
2.2.3 Malha Computacional	22
2.2.4 Integração no Tempo	24
2.2.5 Termo Advectivo	24
3 METODOLOGIA	28
3.1 Implementação do modelo hidrodinâmico	28
3.1.1 Domínio	28
3.1.2 Batimetria	29
3.1.3 Rugosidade	30
3.1.4 Maré Astronômica	31
3.1.5 Vento	31
3.1.6 Precipitação	32
3.1.7 Descarga Fluvial	33

3.1.8 Configuração de Tempo	33
3.2 Dados amostrais	34
3.2.1 Corrente e vazão	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1 Dados amostrais	38
4.1.1 Estação L1	38
4.1.2 Estação P1	42
4.1.3 Estação P2	43
4.2 Modelagem hidrodinâmica	45
4.2.1 Calibração	49
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	56

1 APRESENTAÇÃO

1.1 Organização do manuscrito

O presente trabalho é referente a pesquisa científica sobre alguns processos hidrodinâmicos do sistema estuarino do Rio Mojuim e do Rio Mocajuba através da obtenção de dados “*in situ*” e da modelagem hidrodinâmica da área. Este manuscrito se encontra organizado na forma de dissertação de acordo com as regras do Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, sua distribuição é feita em 5 capítulos.

O primeiro capítulo aborda a problemática que levou a realização deste trabalho, contendo uma breve introdução da área a ser estudada, a justificativa e os objetivos a serem atingidos. O segundo capítulo traz uma descrição da área de estudo, abordando seus aspectos climáticos, hidrológicos e geológicos, além das principais atividades que compõem a região. Em seguida, ainda neste capítulo, há uma discussão sobre modelagem hidrodinâmica e uma breve descrição sobre o modelo implementado na pesquisa. O terceiro capítulo apresenta a metodologia do trabalho destacando as configurações, as condições iniciais e de contorno do modelo adotado, além dos aspectos relativos a aquisição de dado realizada durante o desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo quatro apresenta os resultados e discussões das análises dos dados amostrais referentes aos aspectos hidrográficos e hidrodinâmicos da porção superior dos rios Mojuim e Mocajuba. Neste capítulo também é apresentado os aspectos sobre a implementação da modelagem hidrodinâmica e sua calibração. O capítulo cinco, por fim, aborda as principais conclusões obtidas através deste estudo científico.

1.2 Introdução

A região amazônica possui a mais extensa rede hidrográfica do planeta, no qual, duas grandes bacias hidrográficas influenciam fortemente a região: a do rio Amazonas e a do Tocantins-Araguaia (ANA, 2015). Essas bacias hidrográficas, juntamente com outras de menor aporte, desembocam no litoral dos estados do Amapá, Pará e Maranhão formando a Zona Costeira Amazônica (ZCA), um ambiente que abriga diversos estuários, planícies de maré, praias tanto oceânicas quanto estuarinas, além da maior faixa contínua de manguezais do mundo (SOUZA FILHO, 2005).

A ZCA possui características meteoceanográficas bastante peculiares quando comparado a outras regiões costeiras do país, pois está inserida em uma região tropical de elevada precipitação anual (até 3.300 mm/ano), altas temperaturas ($>20^{\circ}\text{C}$) com baixa variação térmica sazonal, regime de meso a macromaré e descarga de dezenas de estuários (NITTROUER; DEMASTER, 1996; BEARDSLEY et al., 1995; PEREIRA et al., 2009).

A ZCA, com destaque o rio Amazonas, contribui com aproximadamente 30 % da água doce despejada no oceano Atlântico (DAÍ; TRENBERTH, 2002). As descargas fluviais dos rios amazônicos podem variar da ordem de $10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o rio Amazonas, diminuindo para $10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para o rio Tocantins, chegando a ordem de $10^1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em alguns estuários do nordeste paraense (MASSON; DELECLUSE, 2001; LATRUBESSE; STEVAUX, 2002; ASP et al., 2013). Outro importante corpo hídrico da região é o rio Pará, este, é formado da conectividade com o rio Amazonas, através do estreito de Breves, e da sub-região do Marajó/Portel (COSTA, 2014). Juntamente com o rio Tocantins, o rio Pará origina a baía do Marajó, também chamada de estuário do rio Pará (GREGÓRIO; MENDES, 2009; PRESTES et al., 2014).

Os estuários são ecossistemas costeiros que podem ser encontrados na forma de fjords, vales de rios inundados, planícies costeiras, entre outros (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). De maneira clássica, define-se estuário como um corpo semifechado de água, que possui ligação livre com o oceano adjacente, onde a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental (CAMERON; PRITCHARD, 1963). Considerando outros pontos de vista, Dalrymple, Zaitlin e Boyd (1992), descreveu o estuário como um sistema de vales inundados, os quais recebem sedimentos de fontes marinhas e fluviais, podendo ser influenciado por processos de descargas fluviais e por processos costeiros como ventos, ondas e maré.

O estuário do rio Pará recebe o aporte de diversos sistemas menores, portanto, o monitoramento da contribuição desses sistemas é de fundamental importância para a gestão dos recursos hídricos da região. Atualmente, tornou-se prática comum o uso de modelos hidrodinâmicos para o monitoramento dos corpos hídricos. A modelagem visa solucionar numericamente as equações hidrodinâmicas básicas utilizando medições e teorias do comportamento dos oceanos, rios e estuários, adotando técnicas que discretizam o espaço contínuo em um número finito de pontos, de modo a possibilitar simulações e previsões dos processos ocorrentes nestes ambientes (ROSMAN, 2011).

Nos estuários amazônicos, a modelagem hidrodinâmica vem sendo utilizada para descrever uma série de processos em diferentes escalas. Gabioux (2002) implementou um modelo barotrópico para identificar a influência das camadas de lama sobre a maré na plataforma, enquanto Gallo (2004), estendeu o modelo até Óbidos observando a influência fluvial na propagação da mesma. Os rios Amazonas e Pará foram modelados com a utilização de malhas flexíveis por Le Bars et al. (2010) e por Borba (2014). Os corpos hídricos de menor porte também foram modelados, como exemplo, tem-se o rio Caeté no nordeste paraense por Abreu (2008), a baía do Guajará por Barros et al. (2011) e os canais de maré na ilha do Marajó por Nascimento (2013).

No setor leste da Zona Costeira Amazônica, está localizada a Costa Atlântica do Salgado Paraense, uma região constituída por um conjunto de reentrâncias ('rias') formadas por estuários de baixa descarga fluvial, de baixo relevo e, muitas vezes, comunicados entre si através de áreas de inundação ou por ligação direta de dois canais de maré (COSTA et al., 1991; EL-ROBRINI et al., 2006; ASP et al., 2012). O termo conectividade hidrodinâmica foi usado, por Araújo (2012), para fazer referência à conexão entre dois estuários de macromaré promovida por um canal de maré, através do qual ocorre troca de água e sedimentos em suspensão induzida pela ação da maré.

Inseridos nesse contexto encontra-se os rios Mojuim e Mocajuba, dois ambientes conectados entre si, que se localizam adjacentes à desembocadura da baía do Marajó. Esse sistema também recebe influência do oceano por uma conexão do rio Mocajuba com o rio Curuçá. Consequentemente, a modelagem individual desses corpos hídricos é de difícil implementação, pois a conectividade pode afetar substancialmente o fluxo residual do sistema e a quantidade de volume exportada ou importada com o meio externo.

Este trabalho, por sua vez, apresenta a implementação de um modelo hidrodinâmico em um sistema estuarino amazônico. Para tal, será utilizado o pacote de modelo D-Flow Flexible Mesh Grid para simular a hidrodinâmica dos rios Mojuim e Mocajuba, acompanhado de uma investigação hidrográfica e hidrodinâmica em relação ao estuário superior destes sistemas, a partir de observações realizadas "*in situ*".

1.3 Justificativa

A região amazônica possui grande importância ambiental, social e econômica. A complexidade dos processos ambientais que ocorrem na sua zona costeira, associada à aquisição de dados esparsa tanto no espaço e quanto no tempo, dificultam o gerenciamento dos seus recursos hídricos. Por essa razão, é necessário integrar as análises de diversos parâmetros, ampliar as coletas de dados e implementar modelos hidrodinâmicos na região, para melhor gerir os recursos, reduzindo dessa forma, possíveis impactos ambientais como poluição dos meios hídricos por despejo de esgoto ou derramamento de óleo por exemplo.

Do ponto de vista da gestão ambiental, a ocupação humana desordenada, o extrativismo desenfreado e a chegada de grandes projetos, a exemplo da construção de portos, refletem grandes ameaças aos ecossistemas costeiros amazônicos. Por essas razões, foi necessário que o Poder Público inserisse algumas áreas em programas de proteção como o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), que atribui um conjunto de diretrizes que possibilitam às esferas governamentais federal, estadual e municipal a criação, implementação e gestão de Unidades de Conservação (UC), visando a gestão e proteção dessas áreas (MMA, 2015).

Além disso, no âmbito econômico e social, a ZCA sustenta um enorme potencial pesqueiro, com a pesca constituindo-se em fonte de alimento, comércio, renda e lazer para grande parte da população, especialmente as que residem nas margens dos rios (SANTOS; SANTOS, 2005). A atividade portuária também ocorre na região, com destaque o Porto de Vila do Conde no município de Barcarena-PA, por meio do qual é escoado minério de bauxita, alumínio, insumos e cargas em geral (RODRIGUES; SZLAFSZTEIN, 2013). As perspectivas de novos investimentos na exploração do petróleo e gás natural na plataforma continental amazônica também é outra potencialidade econômica da região.

Os estuários localizados na ZCA são, muitas vezes, conectados entre si dificultando a elaboração de um plano de mitigação para os impactos ambientais. Além disso, até mesmo os pequenos estuários possuem grandes dimensões, tornando difícil a caracterização ambiental apenas com medições “*in situ*”. Nesse contexto, a modelagem hidrodinâmica se torna uma ferramenta fundamental para a gestão desses ambientes, uma vez que engloba vários ambientes em seu domínio e é capaz de realizar prognósticos através da simulação de cenários futuros.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral a implementação de um modelo hidrodinâmico com malha flexível no sistema estuarino do rio Mojuim e Mocajuba.

1.4.3 Objetivos Específicos

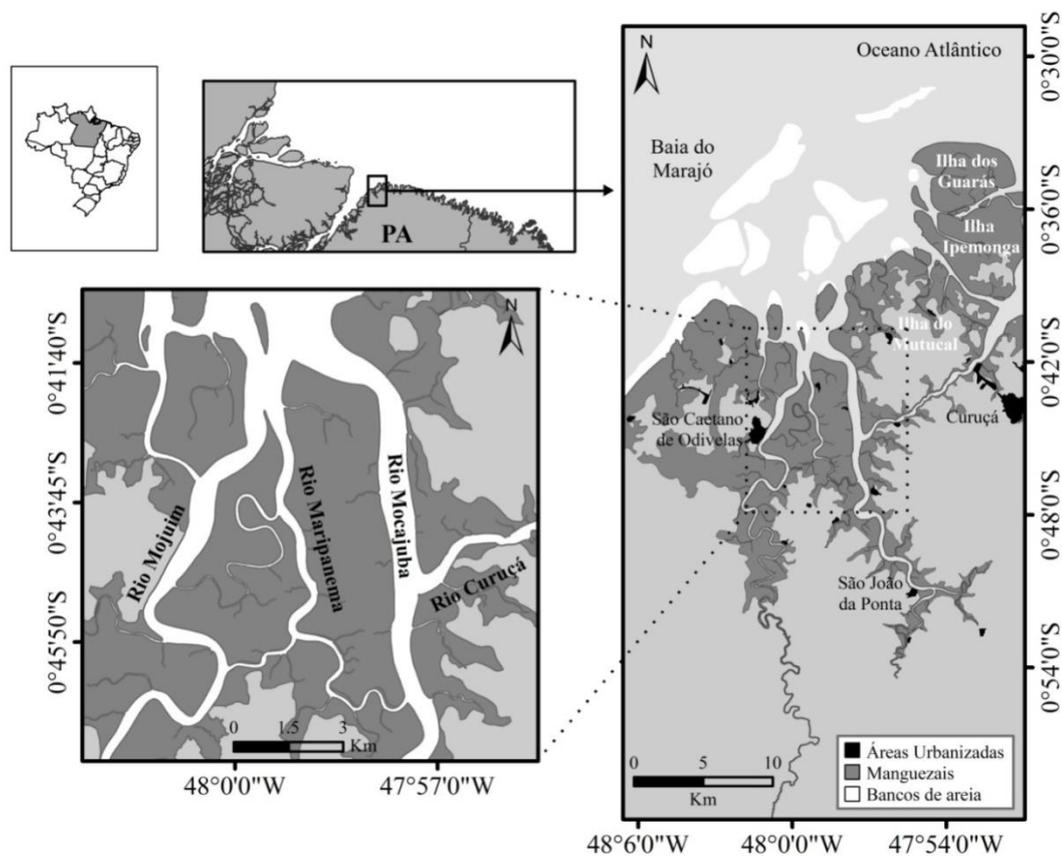
- Analisar a hidrodinâmica do estuário superior dos rios Mojuim e Mocajuba, através da coleta de dados hidrológicos e hidrodinâmicos para definição das condições iniciais e de contorno do modelo.
- Calibrar e validar um modelo hidrodinâmico em malha flexível.
- Analisar a propagação da onda de maré ao longo do sistema estuarino
- Analisar padrões hidrodinâmicos com ênfase no rio Mojuim.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Área de estudo

Os estuários dos rios Mojuim e Mocajuba integram a mesorregião do nordeste paraense, microregião do Salgado. Esses rios estão localizados entre os meridianos 48° e 47° W e os paralelos 0° e 1° S. Seus principais limites são a Oeste o município de São Caetano de Odivelas, a Leste o município de Curuçá e, ao Norte, um arquipélago formado pelas ilhas dos Guarás, Ipemonga e do Mutucal (Figura 1). A desembocadura deste sistema estuarino apresenta em sua morfologia de fundo numerosos bancos de areia, orientados nos sentidos das correntes de maré (MÁCOLA; EL-ROBRINI, 2004). A área se destaca na ZCA por ser uma costa de baixo relevo recortada por estuários e planícies costeiras que estão em contato direto com o oceano Atlântico, situação propícia à formação de extensas áreas de manguezais (PROST et al., 2001).

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.1 Aspectos Climáticos e Oceanográficos

O NE paraense é influenciado por um clima tropical úmido, classificado como do tipo AWA'A' (COSTA; RIBEIRO; SOUZA FILHO, 1996). A umidade do ar é relativamente alta durante o ano todo, mantendo-se sempre acima de 80%. As temperaturas são elevadas, variando ao longo do ano entre 25°C e 29°C. A região apresenta dois períodos sazonais distintos: o período chuvoso que se estende de janeiro a junho, com maiores índices pluviométricos nos meses de março a maio; e o período seco, que ocorre de julho a dezembro, com menores índices de setembro a novembro (LIMA et al., 2005).

As oscilações da Zona de Convergência Inter-Tropical (ITCZ) controlam as principais mudanças do clima na ZCA. A ITCZ fica predominantemente no Hemisfério Norte, estando mais próxima ao 0° N entre março e abril e próximo dos 10°N, entre agosto e setembro. Conseqüentemente, o deslocamento sazonal da zona intensifica a ação os ventos alísios de NE na foz do rio Amazonas e no litoral paraense (PHILANDER, 1990; COSTA et al., 1996).

Um papel importante dos ventos alísios é na geração de ondas na baía do Marajó, pois esta possui uma largura de 63 km na sua desembocadura, resultando em uma pista adequada de área suficiente para transferência de energia entre o vento e a superfície do estuário. Esse regime de ondas pode variar sazonalmente se considerarmos as oscilações dos alísios em termos de intensidade e ângulo de incidência sobre a costa (MUEHE; GARCEZ, 2005).

A região apresenta um regime de meso a macromaré onde as componentes semidiurnas M2 (componente lunar principal), S2 (componente solar principal) e N2 (componente lunar elíptica) são as mais significativas (BEARDSLEY et al., 1995). Nos estuários amazônicos, a propagação de maré envolve a oscilação da maré em sua desembocadura, o escoamento fluvial e as forças de atrito da margem e do fundo que vão progressivamente distorcendo a onda de maré ao longo do canal (GALLO, 2004).

As correntes de maré estão associadas à penetração da maré ao longo do estuário e exercem grande influência nos mecanismos de mistura, sedimentação, erosão e transporte. Estas velocidades de correntes no nordeste do Pará podem atingir valores máximos de 1,14 m/s e 0,43 m/s no rio Caeté e no rio Mocajuba, respectivamente (ASP et al., 2013).

2.1.2. Hidrologia

O ambiente amazônico abriga o sistema hídrico mais extenso e de maior massa líquida do planeta, no qual, quatro dos maiores rios do mundo se encontram na região: o rio Amazonas, rio Tocantins, rio Tapajós e o rio Xingu (SIOLI, 1985; DAÍ; TRENBERTH, 2002). De acordo com Souza Filho et al. (2005), os processos costeiros e marinhos da ZCA são influenciados diretamente pela sua complexa rede hidrográfica, constituída de rios com variadas descargas fluviais, extensos estuários, canais de maré e outros cursos de água que formam uma extensa rede de ramificações no qual o principal rio é o Amazonas (Tabela 1).

Tabela 1 - Descarga fluvial de alguns rios da Amazônia.

Rio	Descarga fluvial [m³/s]	Fonte
Amazonas	132.145	ANA (2015)
Tocantins	11.800	Latrubesse e Stevaux (2002)
Guamá	2.000	Freitas (2011)
Gurupi	1.277	Souza Filho et al. (2009)
Caeté	47	Souza Filho et al. (2009)
Mocajuba	12,5	Asp et al. (2013)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A sazonalidade é um fator determinante para o regime hidrológico da região amazônica. No período de janeiro a junho, as condições pluviais e fluviais atingem altas taxas, influenciando nos processos hidrodinâmicos do estuário, bem como ocasionando as expansões das áreas de inundação.

A baía do Marajó está inserida nesse contexto como um estuário dominado por maré formado principalmente pelos rios Pará, Tocantins e pela baía do Guajará (GREGÓRIO; MENDES, 2009). Na sua desembocadura, destacam-se os primeiros rios que integram a Costa do Salgado Paraense, a exemplo os rios Mojuim e Mocajuba.

O rio Mojuim tem um comprimento em linha reta de 36 km com sua nascente próxima ao município de Santo Antônio do Tauá, este rio é caracterizado por meandros em grande parte de seu percurso, atravessando cidades como São Caetano de Odiveiras. Enquanto o rio

Mocajuba tem um comprimento de aproximadamente 25 km e não possui uma nascente definida, entretanto apresenta-se largo em grande parte de seu percurso chegando a formar dois corpos hídricos: o rio Curuçá, que deságua no oceano Atlântico, e o rio Maripanema que se conecta ao rio Mojuim através de dois canais de maré (Figura 1).

2.1.3 Geologia da Área

No setor leste da ZCA, o embasamento é composto principalmente pelo terciário, que é marcado pela sedimentação da formação Pirabas e Barreiras. Nas áreas baixas, prevalecem sedimentos do Barreiras, com destaque às planícies costeiras do Holoceno. Além disso, encontram-se algumas formações Proterozóicas, metamórficas e metasedimentares, com idades variando do Pré Cambriano até o recente (EL-ROBRINI et al., 2006). Esses fatores, de acordo com Asp et al. (2013), contribuem para o pequeno tamanho relativo das bacias de alguns rios do nordeste paraense.

A rede de drenagem atual, caracterizada por anomalias diversas, reflete movimentos tectônicos que podem ser entendidos no âmbito da tectônica cenozóica ou provavelmente da tectônica ativa. Reconhecem-se extensos trechos de rios de sinuosidade alta alternados com segmentos retos poucos sinuosos, evidenciando soerguimento e abatimentos que impuseram instabilidade local nos sistemas fluviais. O sistema de drenagem atual do salgado paraense apresenta forte controle estrutural e encontram-se fortemente adaptado à orientações das falhas transcorrentes e das falhas normais, geradas a partir do Terciário Superior (COSTA et al., 1996).

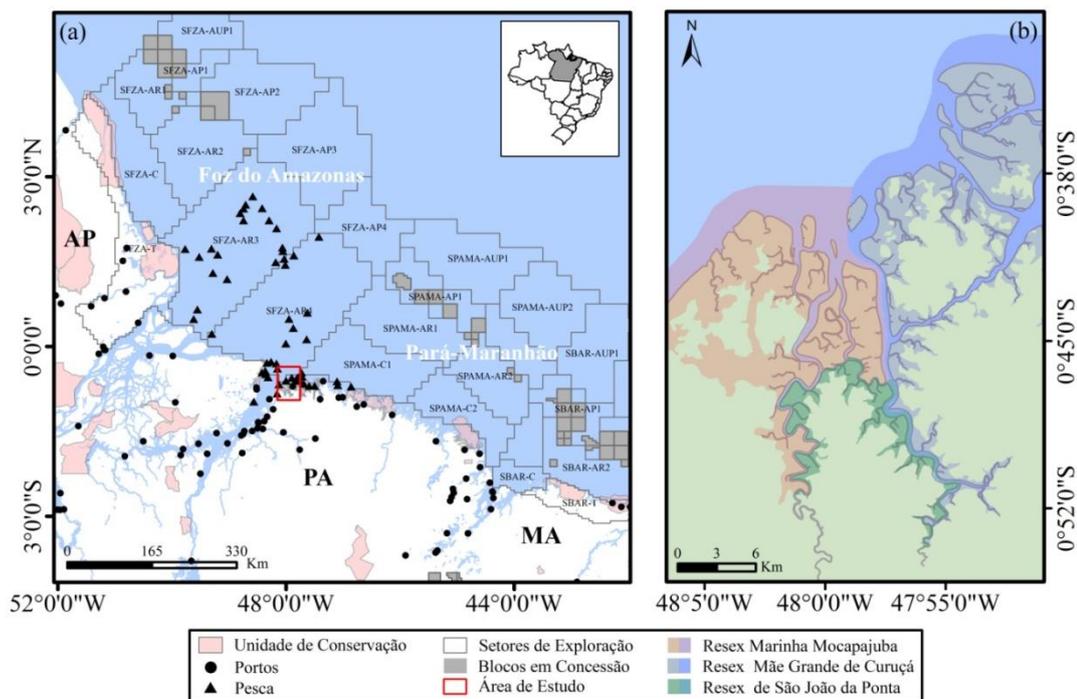
2.1.5 Principais atividades e Unidades de Conservação

No ponto de vista do gerenciamento costeiro, as questões sociais, ambientais e econômicas devem ser observadas sob uma mesma perspectiva, uma vez que esses âmbitos interagem entre si condicionando o espaço geográfico costeiro (SZLAFSZTEIN, 2009). Nos centros urbanos estão concentradas as principais atividades econômicas da Zona Costeira Amazônica, que são baseadas principalmente, nas atividades industriais, portuárias, exploração de minério, imobiliária, pesqueira, turística, comerciais, extrativistas e pecuaristas. Enquanto nas pequenas comunidades costeiras, as atividades econômicas são baseadas, sobretudo, na agricultura e na pesca (PEREIRA et al., 2009).

Na ZCA é possível observar diversos pontos específicos de atividade pesqueira, diversos portos, além de um crescente interesse no ramo de petróleo e gás natural com blocos demarcados ao longo da plataforma e alguns já leiloados pela Agência de Petróleo (ANP, 2015) (Figura 2.a). No entanto o que mais chama atenção na região é quantidade de áreas afetadas por essas e outras atividades como o extrativismo fortemente impactante em regiões de manguezais. Diante desse cenário, faz-se necessário a criação de diversas Unidades de Conservação com o intuito de proteger os ecossistemas impactados por essas atividades.

As Unidades de Conservação (UC) são áreas delimitadas do território nacional especialmente protegidas por lei para a proteção de ecossistemas significativos. Ao longo dos estuários dos rios Mojuim e Mocajuba existem três UC do tipo Reserva Extrativista (RESEX), que são utilizadas por populações tradicionais, cuja subsistência baseia-se no extrativismo e, complementarmente, na agricultura de subsistência. O objetivo da RESEX é garantir o uso sustentável dos recursos naturais da UC (MMA, 2015). As Reserva Extrativistas que integram o sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba compreendem áreas de manguezais, canais de maré e a áreas adjacentes a desembocadura dos rios (Figura 2.b).

Figura 2 - (a) Principais atividades da ZCA, com destaque as atividades portuárias, pesqueiras e petrolíferas. (b) Principais RESEX do sistema estuarino do rio Mojuim e Mocajuba.



Fonte: Adaptado de (ANP, 2015; ANTAQ, 2015; ICMBIO, 2015).

2.2 Descrição da modelagem matemática

2.2.1 Modelo Hidrodinâmico

As Equações de Água Rasa (EAR), derivadas da equação de Navier-Stokes, são utilizadas em estudos sobre movimento de ondas e circulação de fluidos em ambientes cuja dimensão horizontal é muito maior que a vertical, a exemplo de rios, canais e estuários (HAGEN, 2014). O D-Flow Flexible Mesh utiliza essas equações em um domínio discretizado, onde o sistema passa a ser resolvido apenas em pontos pré definidos, determinados pela grade do modelo. Os resultantes das equações de água rasa são dados pelas equações de massa (Equação 1) e momento (Equações 2), onde a profundidade média, de acordo com Kernkamp et al. (2011), é obtida intrinsecamente pela integração das EAR:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (H\vec{u}) = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + adv(\vec{u}) + g\nabla\zeta + c_f\vec{u}\|\vec{u}\| + 2\Omega \times \vec{u} = d \quad (2)$$

em que H é a profundidade total, \vec{u} é o vetor velocidade horizontal, ζ é o nível de água segundo o plano, Ω é o vetor rotação da Terra, $adv(\vec{u})$ é o termo advectivo e ∇ é o operador horizontal. O segundo termo das equações contém o termo sorvedouro q e o termo das forçantes externas d . A constante g e c_f são a gravidade e o coeficiente de atrito de fundo, respectivamente.

2.2.2 D-Flow Flexible Mesh

O D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) faz parte da nova geração de software de simulação hidrodinâmica desenvolvido pela Deltares, um instituto holandês com interesse de pesquisar regiões costeiras e bacias de rios. O D-Flow FM é um modelo baseado nos conceitos numéricos dos sistemas Delft-3D e SOBEK-1D2D, utilizados respectivamente em estuários e em fluxos de água doce. Portanto, a combinação das equações permite uma

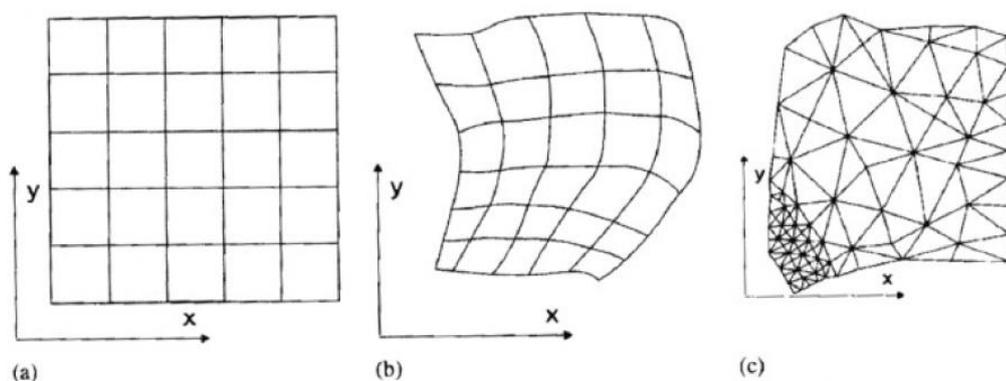
modelagem integrada 1D, 2D e 3D, simulando fluxos e transportes induzidos por forçantes de marés, descarga fluvial, meteorológicas e pelos efeitos gerados pelo componente longitudinal do gradiente de densidade (DELTARES, 2015).

O modelo resolve as equações de Navier-Stokes adotando técnicas que discretizam o espaço e o tempo em um número finitos de pontos, permitindo a solução para o sistema de equações, a partir de condições iniciais e de contorno (HAGEN, 2014). Na composição da sua malha são definidos elementos curvilíneos juntamente com as elementos não estruturados de triângulos, pentágonos e redes de canais 1D, tudo em uma única malha flexível, permitindo uma resolução de grade espacialmente variável (DAM et al., 2014)

2.2.3 Malha Computacional

Técnicas numéricas são necessárias para a resolução das EAR sem que sejam levados em conta parâmetros de larga escala, dessa forma a EAR necessita ser discretizada no tempo e no espaço, ou seja, a região de interesse deve estar compreendida em uma malha computacional, que pode ser definido por elementos finitos representativos das feições da área de estudo, sendo que, as propriedades (corrente, salinidade, temperatura, entre outros) são calculadas e interpoladas dentro de cada célula. Existem três tipos de malhas: as retangulares, as curvilíneas e as triangulares (Figura 3). Cada uma possui vantagens e desvantagens diante da situação a qual está sendo empregada.

Figura 3 - Tipos de malhas: (a) retangular, (b) curvilínea, (c) triangular.

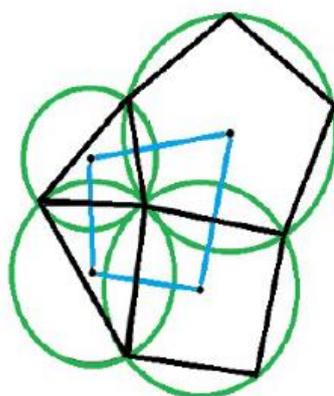


Fonte: (WARMINK, 2009).

Uma vez que os rios não costumam ter formato retangular, torna-se difícil uma representação realística de seus contornos utilizando uma malha retangular. Já os pontos da malha curvilínea, coincidem de forma natural aos meandros presentes nos rios, assim, ruídos próximos a essa feição são menos comuns (WARMINK, 2009). Conseqüentemente, as malhas curvilíneas são, em sua maioria, menos imprecisas que as retangulares, sendo mais utilizados em rios e estuários (HAGEN, 2014). O outro tipo de malha é o triangular, que tem como principal vantagem sua flexibilidade ao representar a malha de pontos, pois, tem a possibilidade de um refinamento local, no entanto, por se tratar de uma malha não estruturada tem como custo a eficiência computacional (GARCIA, 2008).

O método de malha flexível (Flexible Mesh) combina a malha curvilínea e a triangular gerando eficiência na modelagem, uma vez que, a malha curvilínea é alinhada com a direção de fluxo principal do rio e a triangular é utilizada para o refinamento local em feições complexas (KERNKAMP et al., 2011). Para manter a precisão de processamento do modelo, as células da malha devem ser ortogonais. De acordo com Verwey, et al. (2011), para que a ortogonalidade das faces das células e das linhas que ligam seus centros seja mantida é necessário que: os cantos dos triângulos de células adjacentes estejam posicionados em uma circunferência comum; e o centro de cada célula esteja contido em seus limites (Figura 4).

Figura 4 - Princípio da ortogonalização em uma malha não estruturada.



Fonte: (HAGEN, 2014).

2.2.4 Integração no Tempo

A malha flexível utiliza o método de volume finito como solução numérica, este método baseia-se na forma diferencial das equações da conservação da massa e do momento. Utilizando o método- θ (método de Euler), para integrar continuamente a equação (2) sobre o volume de controle, Kernkamp et al. (2011), estabelece um volume-finito padrão para o nível de água ζ :

$$A_{\zeta} \frac{\zeta^{n+1} - \zeta^n}{\Delta t^n} + \theta(A_{u_2} u_2^{n+1} - A_{u_1} u_1^{n+1}) + (1 - \theta)(A_{u_2} u_2^n - A_{u_1} u_1^n) = q_{\zeta} \quad (3)$$

no qual ζ subscrito denota os valores no centro da célula e u os valores das faces. A_{ζ} é a área de armazenamento horizontal da célula. A_u a seção da área da face de fluxo e $Q \equiv uA_u$ a descarga através da face. A equação do momento discretizada é dada por:

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} + adv(u^n) + \frac{g}{\Delta x_u} \times \left(\theta(\zeta_2^{n+1} - \zeta_1^{n+1}) + (1 - \theta)(\zeta_2^n - \zeta_1^n) \right) + bu^{n+1} = d \quad (4)$$

em que b representa o coeficiente de fricção, u^n agrega outros termos explícitos e d são as forçantes externas como o vento e a precipitação.

2.2.5 Termo Advectivo

O termo advectivo $adv(u^n)$ é integrado no tempo e formulado como momento conservativo (KRAMER; STELLING, 2008). O ponto chave da formulação conservativa do termo advectivo em malhas não estruturados recai na escolha de pares fechados da parcela advectada com fluxo advectivo.

A parcela advectada é determinada no circuncentro da célula e o fluxo advectivo que transporta esta parcela é definido na face das células que a circundam. Isto é válido para todos os tipos de células suportadas (triangular, quadrilateral, pentagonal, hexagonal ou células 1D). A formulação do termo advectivo se dá pela conservação de volume:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \sum_{in} Q - \sum_{out} Q \quad (5)$$

onde V é o volume e Q o fluxo de volume das faces das células. A conservação da massa (volume V x concentração c) no modelo de transporte é simplificada como:

$$\frac{\partial Vc}{\partial t} = \sum_{in} Qc_{in} - \sum_{out} Qc_{out} \quad (6)$$

Assumindo o fluxo homogêneo (fluido incompressível), a conservação do momento toma a forma abaixo:

$$\frac{\partial V_u u}{\partial t} = \sum_{in} Qu_{in} - \sum_{out} Qu_{out} + \dots, (u_{in} = \vec{u}_{in} \cdot \vec{n}_u) \quad (7)$$

no qual V_u é o volume de controle de momentum (diferente do volume controle para níveis de água da equação 3, devido a aproximação da malha escalonada).

A face normal da célula é definida por \vec{n}_u para cada ponto u , e a célula circuncentral base dos vetores velocidade \vec{u} é reconstruída pela face da célula com as velocidades normais, que serão definidas na equação 12. A face de saída do volume de controle ao redor dos pontos u é aquele para onde os vetores normais apontam, e a face de entrada é o lado oposto a esse. Agora, as parcelas u_{in} e u_{out} são componentes da célula circuncentral de vetores de velocidade que se encontram na direção normal. Desta forma a equação 7 pode ser escrita como:

$$V_u \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial V_u}{\partial t} = \sum_{in} Qu_{in} - \sum_{out} Qu_{out} + \dots \quad (8)$$

Substituindo a equação 5:

$$V_u \frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\sum_{in} Q - \sum_{out} Q \right) = \sum_{in} Q u_{in} - \sum_{out} Q u_{out} + \dots \quad (9)$$

$$V_u \frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\sum_{in} Q - \sum_{out} Q \right) = \sum_{in} Q u_{in} - \sum_{out} Q u_{out} + \dots \quad (10)$$

Resultando em:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{V_u} \left\{ \sum_{in} Q (u_{in} - u) - \sum_{out} Q (u_{out} - u) \right\} + \dots \quad (11)$$

A face de volume V_u de controle, de acordo com Kernkamp et al. (2011), é obtida da média dos incrementos de volume do lado esquerdo e direito da célula:

$$V_u = \alpha_L V_L + \alpha_R V_R \quad (12)$$

sendo que:

$$\alpha_L = \frac{\Delta x_{uL}^\zeta}{\Delta x_{uL}^\zeta + \Delta x_{uR}^\zeta}; \alpha_R = 1 - \alpha_L \quad (13)$$

Finalmente a contribuição por advecção dos lados direito e esquerdo da célula é incrementado ao passo que a formulação de volumes finitos (Equação 11) proveniente da equação do momentum, é definida por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{V_u} & \left\{ \alpha_L \left(\sum_{inL} Q(u_{inL} - u) - \sum_{outL} Q(u_{outL} - u) \right) \right. \\ & \left. + \alpha_R \left(\sum_{inR} Q(u_{inR} - u) - \sum_{outR} Q(u_{outR} - u) \right) \right\} + \dots \end{aligned} \quad (14)$$

Esta equação é aplicada a todas as células 2D, assumindo que o fluxo de propriedades para fora de uma célula é igual, se, e somente se, $u_{out} = u$, fazendo com que o segundo e o quarto membro do somatório da equação se cancelam. Isso também é aplicado as células 1D as quais tem uma ou duas células 1D adjacentes.

3 METODOLOGIA

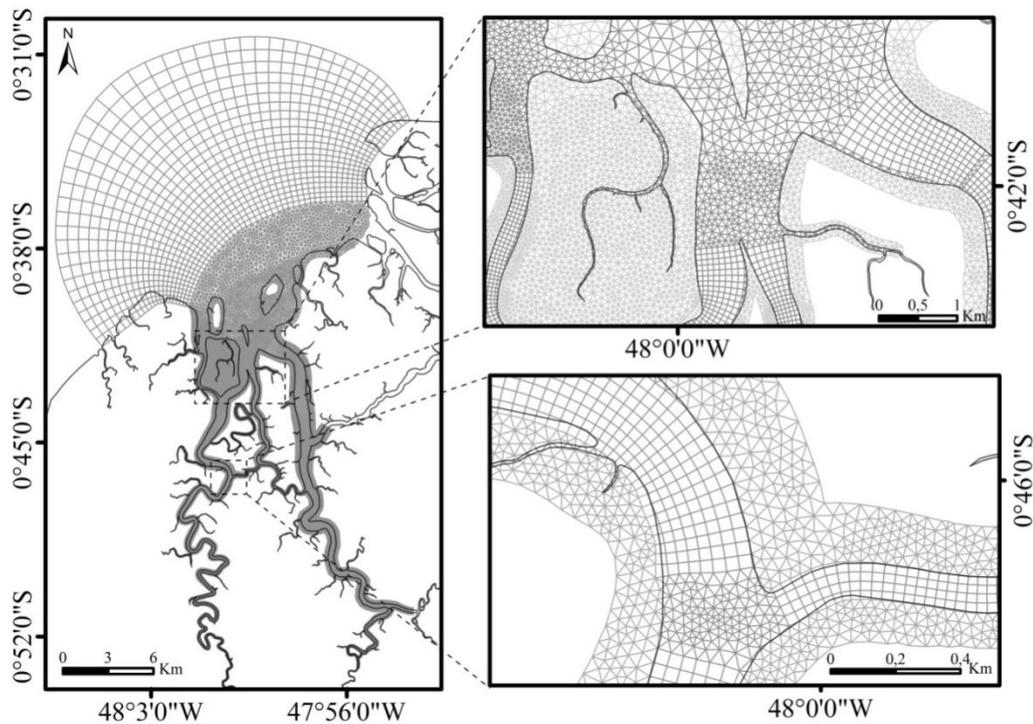
3.1 Implementação do modelo hidrodinâmico

3.1.1 Domínio

A complexa configuração dos estuários amazônicos exige um tratamento diferenciado na composição da malha e na escolha do domínio. Neste trabalho, o domínio é composto pelos rios Mojuim e Mocajuba, suas conexões, as planícies alagadas pela flutuação da maré e parte da desembocadura da baía do Marajó.

As malhas curvilíneas foram delimitadas para os rios Mojuim e Mocajuba, os canais das conexões e as fronteiras externas. Os elementos triangulares foram definidos para as áreas alagadas pela maré, as ilhas, os meandros acentuados e para comunicar os canais de malhas curvilíneas de tamanhos e números de elementos distintos (Figura 5). No domínio são contabilizados 150.202 elementos e 60.207 números de nós.

Figura 5 - Malha discretizada, com destaque para os elementos curvilíneos e triangulares nas áreas de conexão entre os canais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A qualidade da malha é fundamental para a precisão das simulações, de modo que a malha deve ser ortogonalizada e suavizada, além de suficientemente densa em regiões importantes para reduzir as instabilidades numéricas e singularidades (MAXIMOVA et al., 2013). No presente trabalho o parâmetro de ortogonalidade apresentou valores inferiores a 0,02 em grande parte do domínio.

Os limites abertos são definidos pelas forçantes atuantes no modelo, nos estuários essas forçantes podem ser determinadas pela maré, descarga fluvial e vento. O limite externo é referente a entrada da maré no sistema e se estende até aproximadamente 15 km após a desembocadura dos rios Mojuim e Mocajuba, pois o afastamento da área foco minimiza os erros no modelo. Enquanto o limite interno se estende até a ambiente do estuário superior onde supostamente ocorre um fluxo unidirecional relacionado a descarga fluvial do rio.

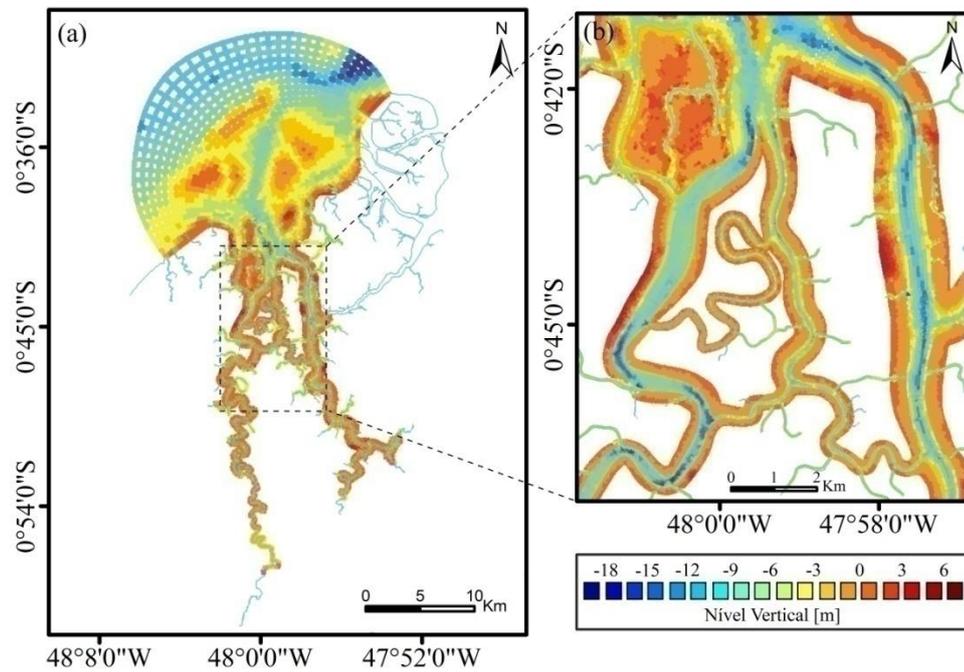
3.1.2 Batimetria

A batimetria adotada na pesquisa foi interpolada a partir de três fontes distintas de dados. O primeiro conjunto de dados foi extraído de cartas náuticas disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (CHM, 2015). Outra parte da batimetria foi realizada pelo Laboratório de Oceanografia Física (LOF) da Universidade Federal do Pará (UFPA) em parceria com Laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR), podendo ser encontrada no trabalho de Rocha (2015).

Por fim, foram obtidos valores de batimetria a partir do software Deft Dashboard, que integra o pacote aberto OpenEarth, desenvolvido pela Deltares para lidar com ferramentas e modelos nas áreas marinhas e costeiras (DELTARES, 2015). O Deft Dashboard disponibiliza a batimetria e os dados de elevações provenientes do modelo global GEBCO 08, que fornece a profundidade a partir da combinação de dados gerados por navios com dados gravimétricos de sensores orbitais (GEBCO, 2015). Para os dados terrestres o GEBCO 08 utiliza o modelo de elevação digital SRTM30.

Os dados utilizados para compor a batimetria do modelo foram nivelados no plano de referência do D-Flow FM (Figura 6), que é determinado no nível médio da maré, sendo que a profundidade é expressa em metros, de forma que a batimetria negativa é abaixo do plano de referência.

Figura 6 - Batimetria interpolada dentro do domínio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Rugosidade

O coeficiente de rugosidade é responsável pela resistência ao fluxo do fluido em um canal ou em planície de inundação. Neste trabalho foi utilizado o coeficiente de Manning, de acordo com as orientações de Arcement e Schneider (1989), a partir da fórmula de Manning através da velocidade média do fluido (Equação 15) e do fluxo transversal (Equação 16).

$$V = \frac{1,486}{n} R^{2/3} S_e^{1/2} \quad (15)$$

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \quad (16)$$

onde V é a velocidade média do fluxo, K é o fluxo da secção transversal, n é o coeficiente de rugosidade de Manning, R é o raio hidráulico, Se é o declive da linha de grau de energia e A é a área da secção transversal.

Os valores de n podem ser atribuídos à diferentes partes do domínio com base nas características do ambiente. Os fatores mais importantes que afetam os valores do coeficiente de Manning basicamente são: o tipo de material que compões o canal, a forma do canal, a vegetação e o grau de meandro. Cowan (1956) desenvolveu um processo para estimar os valores de n a partir dessas características, expresso por:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (17)$$

em que n_b é o valor base de n com base na composição do canal, n_1 é o fator de correção para o efeito de irregularidades da superfície, n_2 um fator de correção para as variações na forma e tamanho da secção transversal do canal, n_3 é o valor de obstrução, n_4 é um fator de correção em relação a presença e densidade de vegetação e m um fator de correção a partir da sinuosidade do canal.

3.1.4 Maré Astronômica

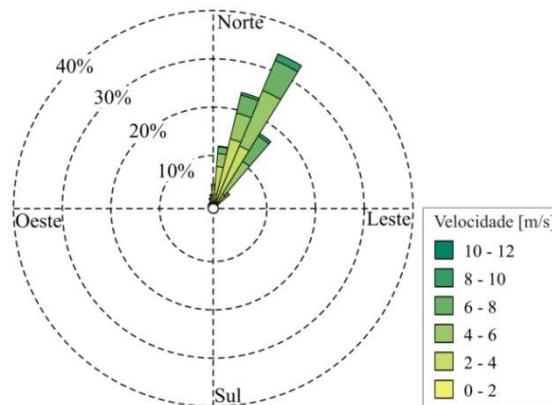
As condições de maré referente ao limite externo do modelo foram obtidas pelo Delft Dashboard, que utiliza uma versão atual do modelo global de maré TPXO 7.2 Global Inverse Tide alimentado com dados dos satélites TOPEX / Poseidon e Jason. As condições de maré são geradas a partir de constantes harmônicas para 13 componentes de maré: duas de longo período (MF, MM), quatro diurnos (K1, O₁, P1, Q1), quatro semidiurnos (M2, S2, N2, K2) e três não lineares (M4, MS4, MN4) (DELTARES, 2015).

3.1.5 Vento

O vento foi obtido a partir de dados de uma estação meteoceanográfica experimental localizado na cidade de São Caetano de Odivelas sob a responsabilidade do Laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR) e Laboratório de Oceanografia Física (LOF) da UFPA.

A região estudada apresenta como características a predominância de ventos com a direção norte-nordeste, com média de 4,3 m/s (Figura 7). Na condição de contorno de vento do modelo foi utilizado um valor constante de direção e intensidade do vento com o propósito de ter maior controle do modelo, no qual o valor adotado foi a Média do vento e a Moda da direção de 70°.

Figura 7 - Gráfico indicando as intensidades e direções do vento.

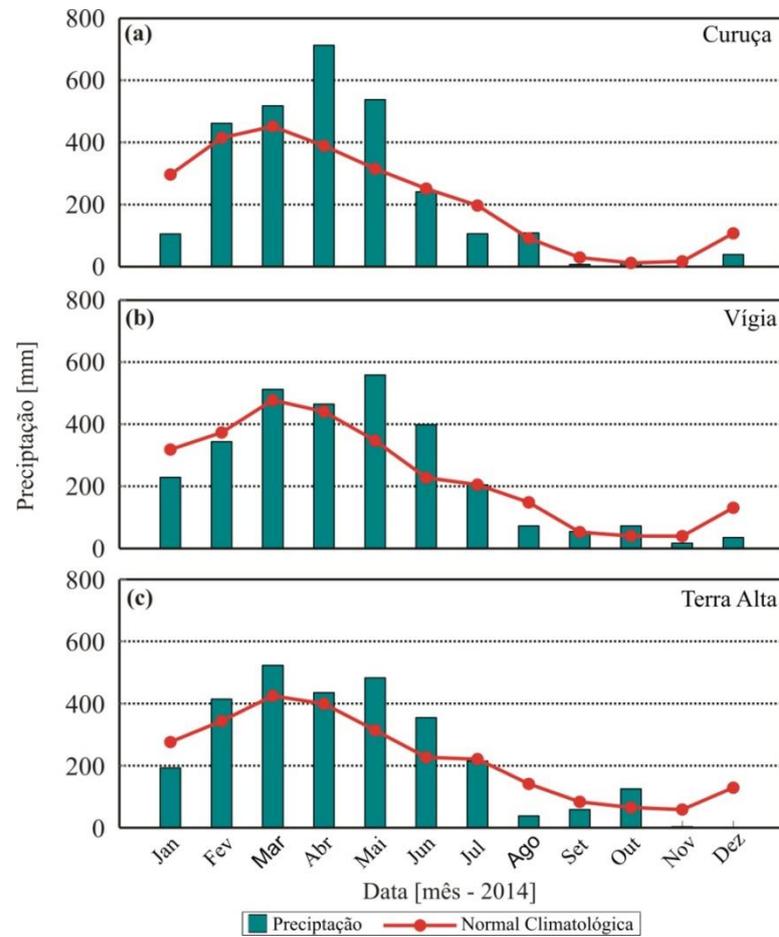


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.6 Precipitação

Os valores de precipitação foram obtidos de estações pluviométricas do Hidroweb-ANA (Figura 8) referente às estações de Vigia, Curuçá e Terra Alta (SNIRH, 2015). O sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba localizam-se entre essas estações pluviométricas, portanto, foi calculada a média pluviométrica mensal entre as estações para ser usado como valor de entrada no modelo.

Figura 8 - Regime pluviométrico mensal referente ao ano de 2014.



Fonte: Adaptado de (SNIRH, 2015).

3.1.7 Descarga Fluvial

A caracterização da porção superior do sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba faz parte desta pesquisa, portanto, a partir das análises dos dados coletados “*in situ*” foram definidos os valores de descarga fluvial para serem usados nos limites internos do modelo e serão discutidos mais detalhadamente nos capítulos posteriores.

3.1.8 Configuração de Tempo

Foi realizada uma simulação de 45 dias cobrindo metade do mês de fevereiro e o mês de março de 2014. Os primeiros 15 dias tiveram a finalidade de inicializar o modelo, uma vez

que o mesmo necessita de um tempo para entrar em equilíbrio a partir das condições iniciais. O mês de março foi usado na calibração do modelo abordada nos resultados deste trabalho.

O período de calibração foi escolhido em função das amostragens hidrográficas e hidrodinâmicas realizadas por Rocha (2015) no estuário do Rio Mojuim na localidade de São Caetano de Odivelas.

3.2 Dados amostrais

Os dados amostrais desta pesquisa estão baseados em medições realizadas em três estações fixas no interior dos rios Mojuim e Mocajuba. Para avaliar os aspectos hidrográficos e hidrodinâmicos da porção superior destes estuários foram executadas medições de corrente, condutividade, temperatura, turbidez e nível da água. Assim foi feita uma caracterização da área de estudo, de maneira que parte dos resultados foi usado na modelagem hidrodinâmica.

As localidades foram escolhidas de acordo com a facilidade de acesso e de modo que os pontos de coleta estivessem mais próximo da nascente de seus rios do que da desembocadura. Na porção superior dos rios Mojuim e Mocajuba implementaram-se as estações P1 e L1, localizadas a uma distância em linha reta da foz de 30 km e 23 km, respectivamente. Complementarmente, também foi implementado a estação P2 no rio Mojuim a uma distância da foz de 24 km (Tabela 2).

Tabela 2 - Localização das estações de coleta.

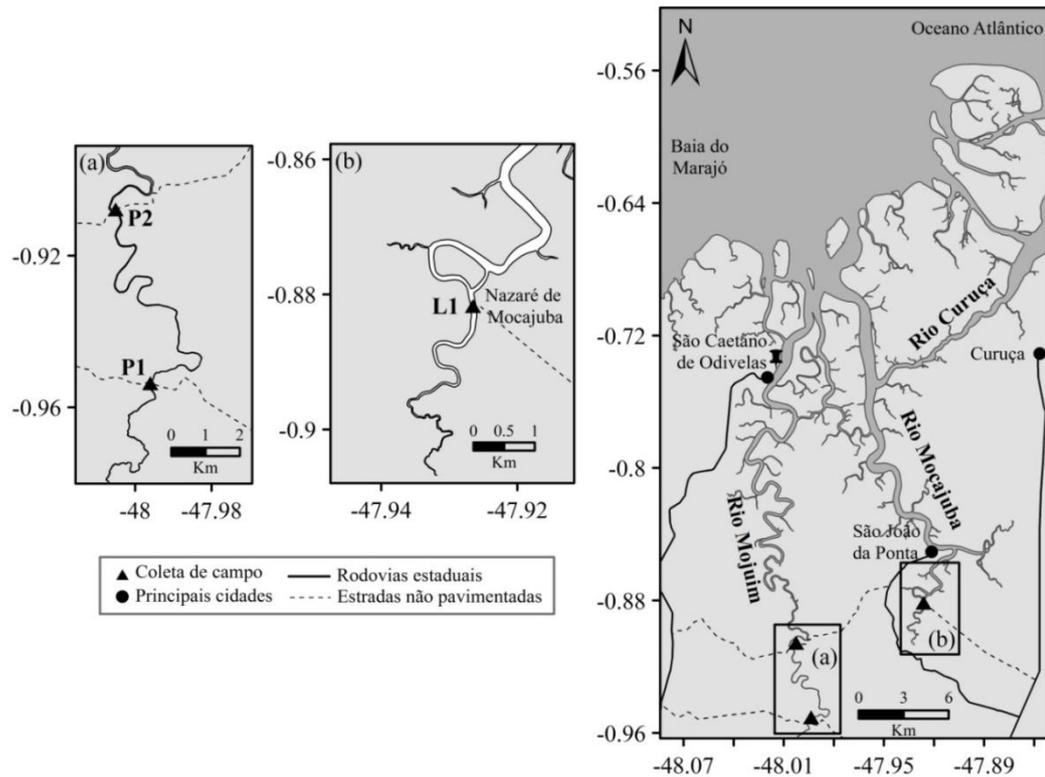
Pontos	Latitude	Longitude
P1	-0,9537°	-47,9958°
P2	-0,9082°	-48,0058°
L1	-0,8815°	-47,9264°

Fonte: Elaborado pelo autor.

As estações P1 e P2 estão localizadas próximas a pontes sobre o rio Mojuim, sendo que a distância entre as estações seguindo o curso do rio é de 10 km. Enquanto a estação L1 está situada no estuário superior do rio Mocajuba na cidade de Nazaré de Mocajuba que

integra o município de Curuçá (Figura 9). Todas as localidades de coleta possuem acesso por rodovias estaduais e estradas não pavimentadas.

Figura 9 - Mapa de localização das estações de coleta: (a) estações P1 e P2 no rio Mojuim, (b) estação L1 no rio Mocajuba.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o estudo foram realizadas duas campanhas oceanográficas durante o ano de 2015. No ponto L1, a campanha foi realizada durante um ciclo de maré de sizígia referente ao período chuvoso (Maio) e foi instalada uma estação maregráfica registrando o nível da água durante aproximadamente 25 semanas.

Nos pontos P1 e P2, foram realizadas medições simultâneas hidrológicas e hidrográficas durante um ciclo de maré de sizígia no período chuvoso (Maio - 2015) e um ciclo no período seco (Dezembro).

Os equipamentos foram fundeados em uma estrutura a uma distância de meio metro do fundo realizando medições a cada 1 minuto. Os dados de correntes foram coletados com o

auxílio de um correntômetro eletromagnético modelo Infinity-EM (AEM-USB) e a turbidez com um sensor modelo Infinity-Turbi ATU75W2-USB, ambos da marca JFE Advantech. Para a obtenção dos valores de salinidade foi utilizada a conversão da UNESCO a partir de dados coletados com um CTD Sea-bird modelo SBE37.

Por fim, a estação maregráfica no ponto L1 operou durante os meses de maio, junho, julho e agosto registrando o nível da água a cada 10 minutos a partir de um sensor de pressão Solinst modelo Levellogger.

3.2.1 Corrente e vazão

O tratamento numérico dos dados de velocidade de corrente utilizados neste trabalho foi adaptado de Miranda, Castro e Kjerfve (2002). Esta etapa foi de fundamental importância para calcular o fluxo de volume nos diferentes pontos do estuário. As medições do ponto P1 foram usadas como valores de descarga fluvial na fronteira interna do rio Mojuim, este procedimento será descrito abaixo.

Em um estuário ou canal trabalha-se com as componentes longitudinal (u) e transversal (v) de velocidade, portanto é necessário fazer a decomposição do vetor adotando um referencial cartesiano ortogonal. Os componentes u e v de velocidade são dados por:

$$u = V\cos(\theta) \quad (18)$$

$$v = V\sen(\theta) \quad (19)$$

onde V é o módulo da velocidade e θ é o ângulo trigonométrico formado entre o vetor e o eixo das abscissas do referencial adotado.

O ângulo utilizado no cálculo das componentes de velocidade difere do ângulo indicado no equipamento, pois a bússola existente no correntômetro é orientada em relação ao norte magnético, assim, o ângulo que indica a direção no equipamento deve ser corrigido para o norte geográfico. Entretanto, para as igualdades trigonométricas se tornarem válidas, deve ser adotado o referencial a partir do ciclo trigonométrico. Por fim, orienta-se

longitudinalmente o eixo na direção do canal, assim, o argumento θ final para a decomposição dos vetores de velocidade é dado por:

$$\theta = 90^\circ - (dd \pm D) \pm \gamma \quad (20)$$

de modo que os sinais de + ou - indicam a direção de rotação do eixo para leste ou oeste, respectivamente, 90 graus é a correção para o ciclo trigonométrico, dd é o ângulo indicado no equipamento, D a declinação magnética e γ a rotação do canal.

O procedimento para calcular o valor médio da velocidade, durante um ciclo de maré, deve ser aplicado aos componentes longitudinal e transversal, obtidos por meio da decomposição do vetor velocidade. Para a componente longitudinal o valor médio foi determinado através da média temporal das velocidades obtidas a partir dos dados do correntômetro pela equação:

$$\langle u \rangle = \frac{1}{n} \sum u(t) \quad (21)$$

A partir da média temporal da velocidade u e da área da secção (obtida “*in situ*”) foi calculado o valor de descarga fluvial na fronteira interna do modelo, está foi obtida com base nos princípios físicos da hidrodinâmica. Sabe-se que o transporte de volume e de massa são iguais ao volume e a massa de água que passa, por unidade de tempo, através de uma secção transversal. Assim, de acordo com esse conceito, os transportes instantâneos de volume T_v são expressos em unidades de volume, por unidade de tempo. Matematicamente, essas quantidades são calculadas, respectivamente pelas seguintes integrais de superfície estendidas a área:

$$T_v = \iint_A \vec{v} \cdot \vec{n} dA = \iint_A u dA \quad (22)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

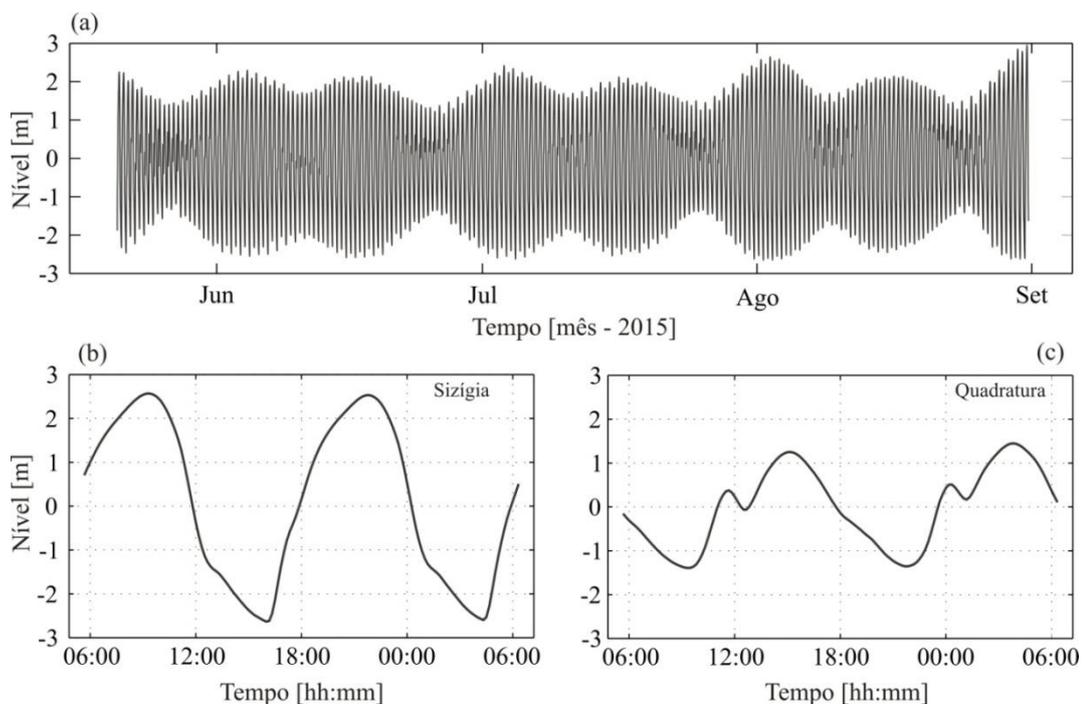
4.1 Dados amostrais

Considerando que um dos objetivos desta pesquisa é a caracterização hidrológica e hidrodinâmica dos estuários superiores dos rios Mojuim e Mocajuba, apresenta-se a seguir os resultados dos dados amostrais obtidos nas estações P1, P2 e L1.

4.1.1 Estação L1

Os resultados da estação maregráfica demonstraram que o estuário do rio Mocajuba é fortemente influenciado pela propagação de maré. O ponto L1 apresenta claramente um regime de macromaré, registrando alturas de 4,9 m na sizígia e 3,2 m na quadratura (Figura 10). Duas características são marcantes nos registros mareográficos, uma é a assimetria da onda de maré com vazantes mais longas que as enchentes. Outra é a deformação acentuada da onda de maré, verificada nas sizígias e principalmente nas quadraturas.

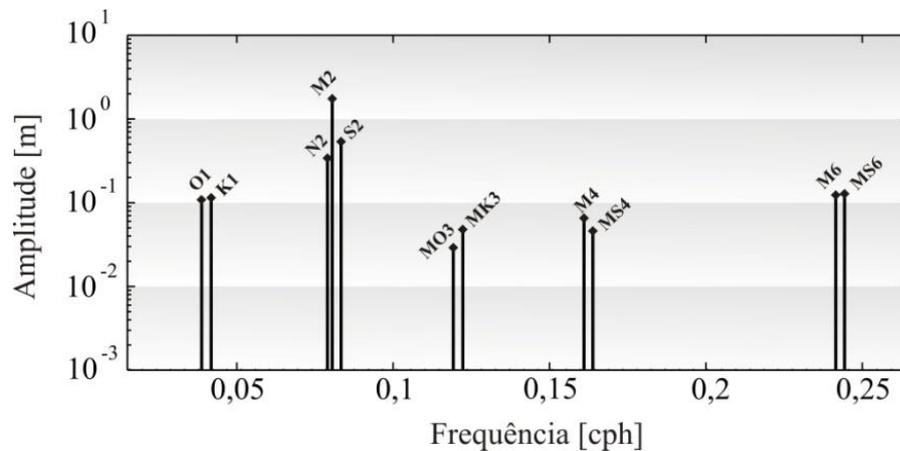
Figura 10 - (a) Curva de maré no rio Mocajuba, com destaque em (b) a maior sizígia e em (c) a menor quadratura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As componentes harmônicas foram determinadas por meio da análise harmônica da série temporal registrada (PAWLOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002), de forma que, foram destacadas as principais componentes diurnas, semidiurnas e de água rasas (Figura 11). As constituintes de maior energia são as semidiurnas (M2 S2 e N2) e as não lineares de 6 ciclos por dia (M6 e MS6), que são até mais significantes que as componentes diurnas.

Figura 11 - Principais constituintes harmônicas.



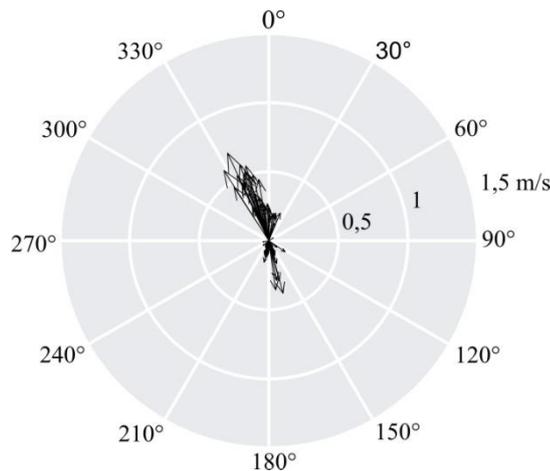
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao penetrar-se estuário acima, a maré é influenciada pela sua morfologia e pelas forças de atrito nas margens e no fundo, causando distorção progressiva da onda de maré (GALLO, 2004). Em águas rasas, a propagação da maré fica sujeita a distorções de natureza hidrodinâmica, que podem, conjuntamente, modificar seu padrão normal. Essas deformações podem ser representadas pelas componentes de água rasas que resultam da interação das componentes harmônicas principais (FRANCO, 2009). Nos rios Mocajuba as principais componentes de águas rasas são as de 4 ciclos por dia (M4 e MS4) e as de seis ciclos (M6 e MS6).

A partir das relações das componentes de maré M2 e M4, é possível realizar uma análise da distorção da onda com base na relação de suas amplitudes ($AM4 / AM2$) e uma análise da assimetria com base na relação de fase ($2x \theta_{M2} - \theta_{M4}$). É possível observar uma distorção de 3,7 % e uma assimetria positiva de 69° , indicando tempos de vazantes superiores ao de enchente, uma vez que seus valores estão entre 0° e 180° (PUGH, 1987).

Em relação a velocidades das correntes de maré, durante um ciclo de maré, observa-se as velocidades de vazantes superiores às velocidades de enchente. Na figura 12 são apresentados os vetores de velocidade e suas intensidades e direções de corrente em coordenadas polares.

Figura 12 - Intensidade e direção das correntes para estação L1.

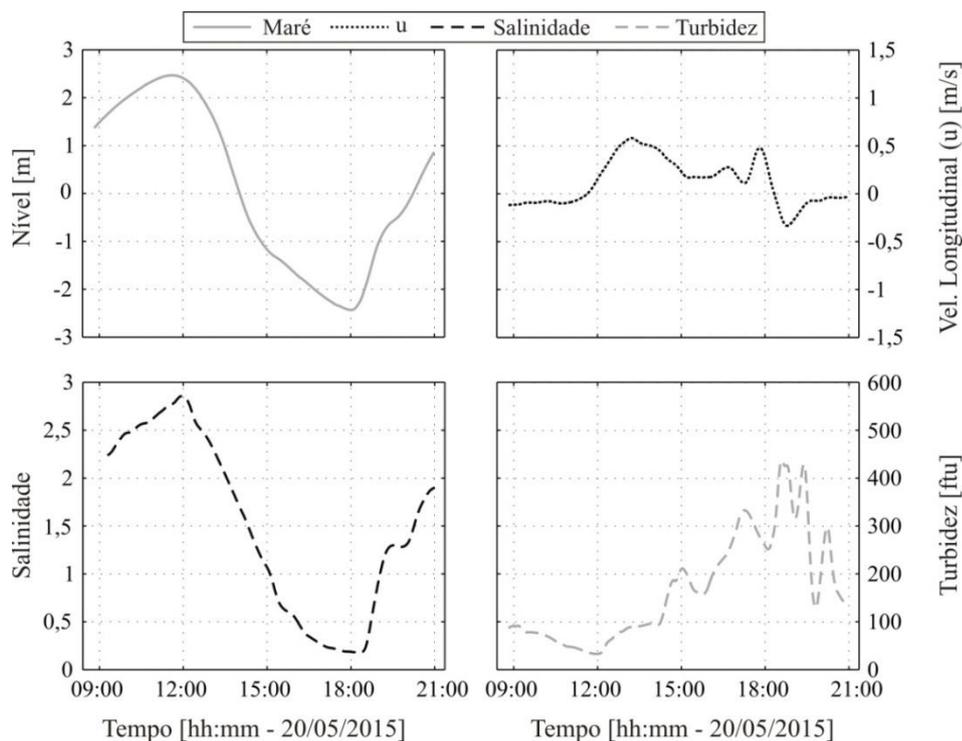


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em estuários, é mais conveniente utilizar a componente longitudinal (u) de velocidade, obtida a partir da decomposição dos vetores de velocidade. No rio Mocajuba as velocidades de enchente se mantiveram em uma média de $-0,1$ m/s alcançando seu máximo em módulo de $0,4$ m/s no início da enchente. As velocidades de vazante foram superiores às de enchente com máximo de $0,7$ m/s e uma média de $0,3$ m/s. As estofas de preamar e baixa mar são bem definidas com valores nulos de velocidade.

É possível observar uma relação entre as propriedades hidrográficas e hidrodinâmicas no rio Mocajuba (Figura 13). Na preamar, foram verificados valores máximos de salinidade e mínimos de turbidez, enquanto na baixa mar o padrão se inverteu, com a salinidade praticamente nula e o máximo de turbidez no sistema. Em relação a corrente, a cada deformação na curva de maré é possível observar uma mudança no padrão de velocidade.

Figura 13 - Propriedades hidrográficas e hidrodinâmicas da estação L1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A salinidade apresentou relação direta com a maré atingindo seu máximo de 2,8 no momento da preamar e na baixa mar apresentou o mínimo de 0,3. Já a turbidez apresentou o comportamento inverso, com valores mais baixos na preamar e valores máximos na baixa-mar de 33 ftu e 408 ftu, respectivamente. A tabela 3 apresenta os valores médios, máximos e mínimos das propriedades analisadas.

Tabela 3 - Média, máximos e mínimos das propriedades analisadas.

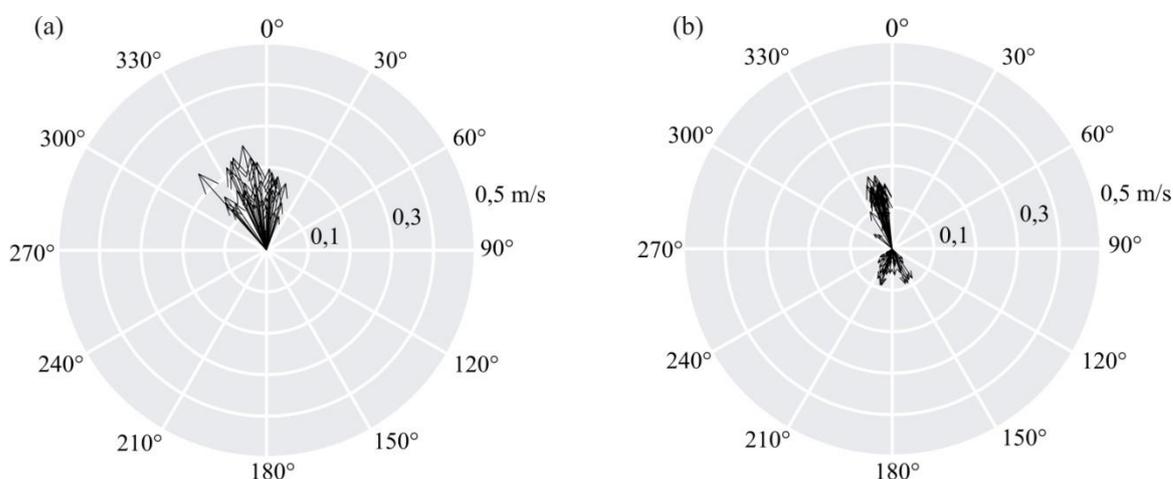
Propriedade	Média	Máx.	Min.
u vazante (m/s)	0,3	0,69	0,11
u enchente (m/s)	-0,1	-0,493	-0,04
Salinidade	1,5	2,85	0,18
Turbidez (ftu)	167,79	436,96	32,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Estação P1

A estação P1 manifestou um comportamento peculiar, pois na primeira coleta (março), o fluxo do campo de velocidade apresentava-se unidirecional (Figura 14.a), já na segunda coleta é possível notar uma inversão do fluxo caracterizado por correntes de enchente e vazante (Figura 14.b). A hidrodinâmica da região é baixa apresentando valores de velocidade inferiores a 0,3 m/s.

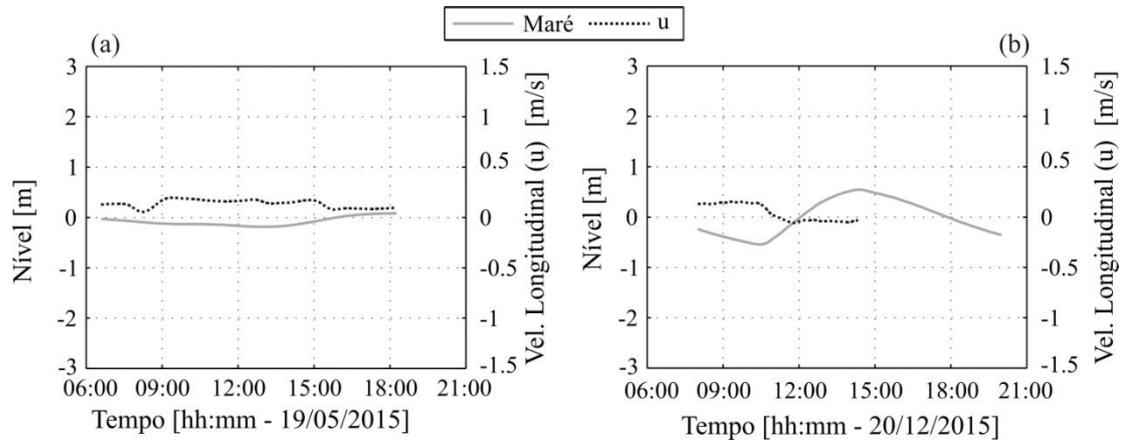
Figura 14 - Intensidade e direção das correntes para a estação P1: (a) período chuvoso, (b) período seco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No período chuvoso, como já foi dito anteriormente, não ocorreu inversão do fluxo de velocidade, sendo que a velocidade máxima foi de 0,27 m/s e a mínima foi de 0,02 m/s, entretanto, é possível observar uma singela variação do nível da água em momentos que a velocidade longitudinal apresenta os menores valores (Figura 15.a). No período seco, é possível observar uma inversão do fluxo com enchentes e vazantes bem definidas, a velocidade máxima da vazante foi de 0,15 m/s e a máxima da enchente em módulo foi de 0,05 m/s. Considerando altura de maré a distância entre o nível da preamar e o nível da baixa mar, no período seco a altura de maré foi de 1,1 m (Figura 15.b).

Figura 15 - Velocidade longitudinal durante um ciclo de maré para a estação P1: (a) período chuvoso, (b) período seco. Obs: no período chuvoso só ocorreram medições de corrente durante meio ciclo de maré.

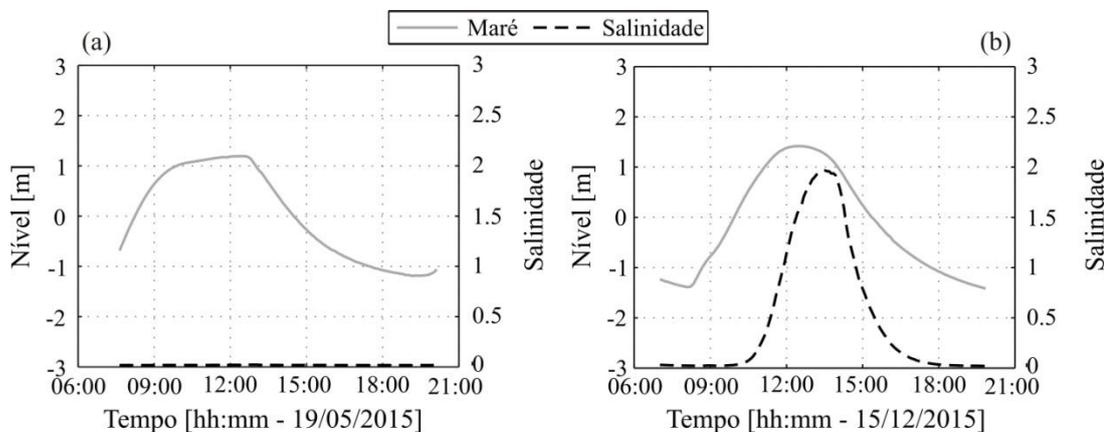


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Estação P2

Na estação P2, além das análises hidrodinâmicas, foram realizadas análises de salinidade (Figura 16), sendo que no período chuvoso não ocorre intrusão salina nesta região do estuário. Entretanto, no período seco, é possível observar um aumento de salinidade com o aumento do nível da água, atingindo o seu máximo de 2 logo no início da vazante.

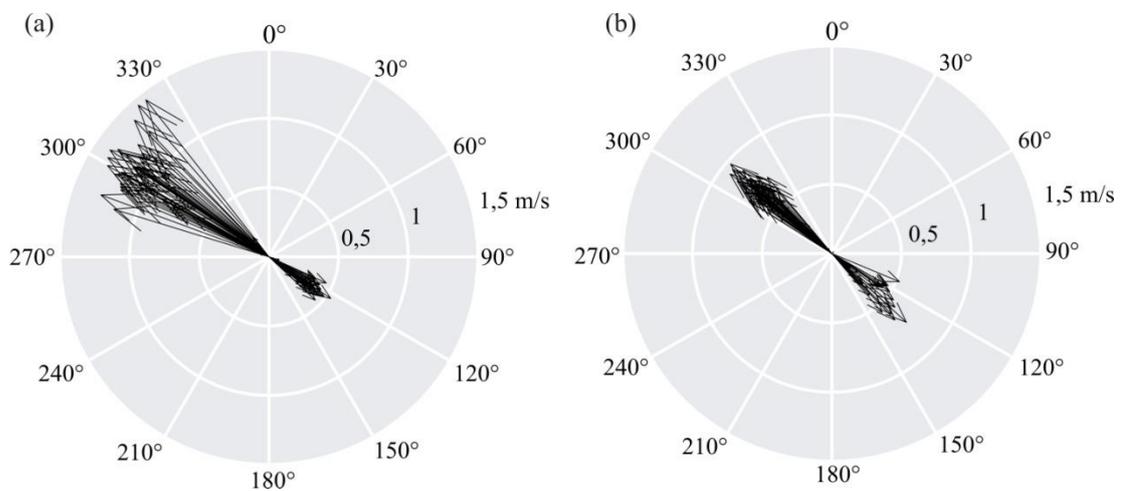
Figura 16 - Salinidade durante um ciclo de maré para a estação P2: (a) período chuvoso (b) período seco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva de maré no período chuvoso demonstrou uma deformação mais acentuada que a do período seco, entretanto, nas duas campanhas observa-se uma assimetria de maré, com o tempo de vazante muito superior ao tempo de enchente. Em relação às velocidades, a primeira campanha apresentou velocidades de vazantes extremamente intensas com máximo de 1,48 m/s e enchentes suaves com máximo de 0,51 m/s (Figura 17.a). Na segunda campanha a vazante diminui sua intensidade e a enchente aumenta a intensidade (Figura 17.b).

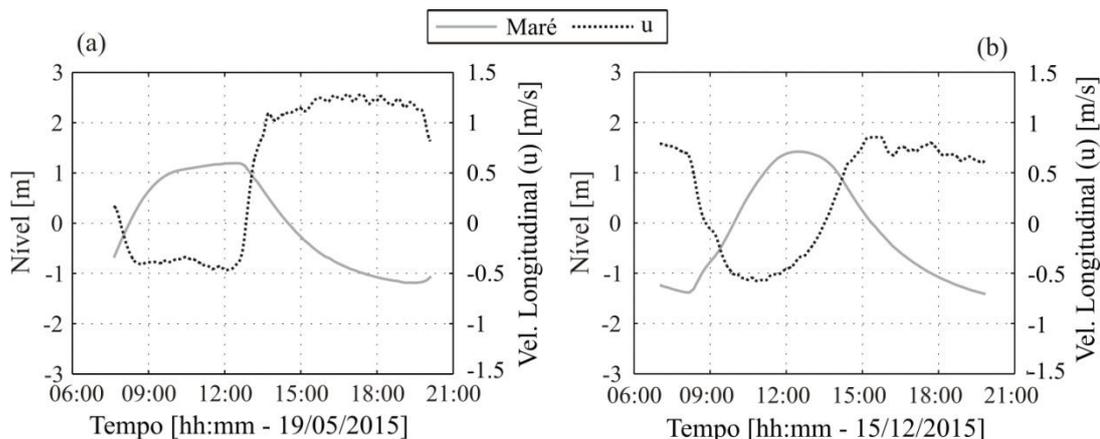
Figura 17 - Intensidade e direção das correntes para a estação P2. (a) período chuvoso, (b) período seco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A deformação da maré e a velocidade de corrente possuem uma relação direta, uma vez que no período chuvoso as vazantes são muito mais intensas que as enchentes e juntamente com a deformação da curva de maré (Figura 18).

Figura 18 - Velocidade longitudinal durante um ciclo de maré para a estação P2: (a) período chuvoso, (b) período seco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Modelagem hidrodinâmica

Após a implementação do modelo é realizado a sua calibração, por meio de análises comparativas entre os parâmetros observados com os parâmetros modelados, objetivando a representação hidrodinâmica da região estuarina. No processo de calibração alteram-se os valores de rugosidades do domínio e os valores de amplitude e fase das componentes harmônicas referentes a fronteira externa. Também foi definido um valor para descarga fluvial somente para o rio Mojuim, pois no rio Mocajuba as forçantes são condicionadas apenas pela maré e pelo atrito de fundo.

A primeira campanha do rio Mojuim serviu de base para atribuir os valores da fronteira interna do modelo. Foram considerados para cálculo de descarga fluvial a média temporal da velocidade que foi de 0,15 m/s e a área da secção transversal de 42 m², totalizando uma vazão de 6 m³s⁻¹.

O coeficiente de rugosidade foi definido para cada setor do sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba em função das características do ambiente, conforme foi descrito no subitem 3.2.2, de modo que os valores de n são expostos na Tabela 4. O ajuste do coeficiente de rugosidade visou obter uma representação aproximada das amplitudes e fases de maré, bem como dos fluxos que ocorrem no estuário.

Tabela 4 - Coeficientes de Manning usados no domínio.

Ambiente	n	Observações
Rio Mojuim Jusante Rio Maripanema	0.02	<ul style="list-style-type: none"> • Composição: lama e areia • elevada concentração de sedimento em suspensão
Rio Mojuim Montante	0.023	<ul style="list-style-type: none"> • composição de fundo: lama e areia • meandros acentuados
Rio Mocajuba Jusante	0.03	<ul style="list-style-type: none"> • composição de fundo: rochoso
Rio Mocajuba Montante	0.033	<ul style="list-style-type: none"> • composição de fundo: sedimento grosseiro
Canais de Maré	0.01	<ul style="list-style-type: none"> • composição de fundo: lama
Áreas Vegetadas	0.122	<ul style="list-style-type: none"> • Área Vegetada
Obstruções	0.023	<ul style="list-style-type: none"> • bancos de areia

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ajuste das componentes harmônicas nos limites do modelo foram utilizados os dados observados em campo e dados de Cartas de Maré referentes a duas estações do Catálogo de Estações Maregráficas da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2015). A Tabela 5 destaca os principais pontos de calibração e suas respectivas fontes.

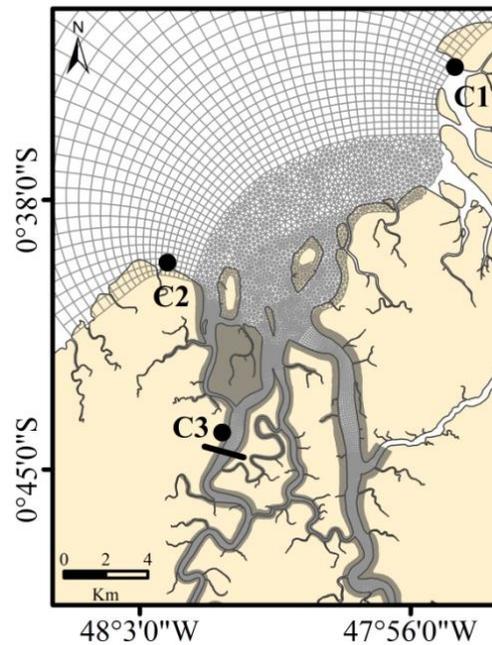
Tabela 5 - Pontos de calibração e suas respectivas fontes e posições geográficas.

Estação	Localidade	Fonte	Latitude	Longitude
C1	Ilha dos Guarás	FEMAR	00° 34,5' S	47° 04,0' O
C2	Ponta Taipu	FEMAR	00° 39,7' S	48° 02,6' O
C3	São Cactano de Odivelas	Rocha (2015)	00° 44,3' S	48° 00,7' O

Fonte: Elaborado pelo autor.

As estações C1 e C2 são referentes às Cartas de Maré, que exibem apenas as componentes harmônicas e suas respectivas amplitudes e fase, portanto, foram realizadas previsões de maré para o mesmo período simulado no modelo, que foi definido em função das observações maregráficas e hidrodinâmicas da estação C3, referentes ao estuário do rio Mojuim, no qual encontram-se descrito em Rocha (2015). Na tabela 6 encontram-se os valores das componentes harmônicas usados na calibração e a figura 19 destaca as estações maregráficas e a secção transversal.

Figura 19 - Estações usadas para a calibração do modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Características das constituintes de maré usadas na calibração do modelo.

Espécie	Período (Horas)	C1		C2		C3	
		Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)
Longo Período							
MM	661,12	0,093	259	0,165	53	0,018	156
MF	-	-	-	-	-	-	-
Diurna							
Q1	26,87	0,099	183	0,032	158	0,023	217
O1	25,82	0,046	165	0,090	248	0,124	238
P1	24,07	0,030	253	0,024	303	0,044	259
K1	23,93	0,100	260	0,072	307	0,133	251
Semidiurna							
MU2	12,87	0,272	311	0,173	301	0,220	319
N2	12,66	0,453	251	0,387	215	0,280	246
M2	12,42	1,612	249	1,578	257	1,70	263
L2	12,19	0,306	265	0,145	353	0,125	288
S2	12,00	0,452	308	0,464	293	0,572	307
K2	11,97	0,069	313	0,126	296	0,155	329
Águas Rasas							
MN4	6,27	0,090	123	0,041	68	0,041	43
M4	6,21	0,061	140	0,090	81	0,030	49
MS4	6,1	0,041	166	0,071	105	0,063	73

Fonte: Elaborado pelo autor.

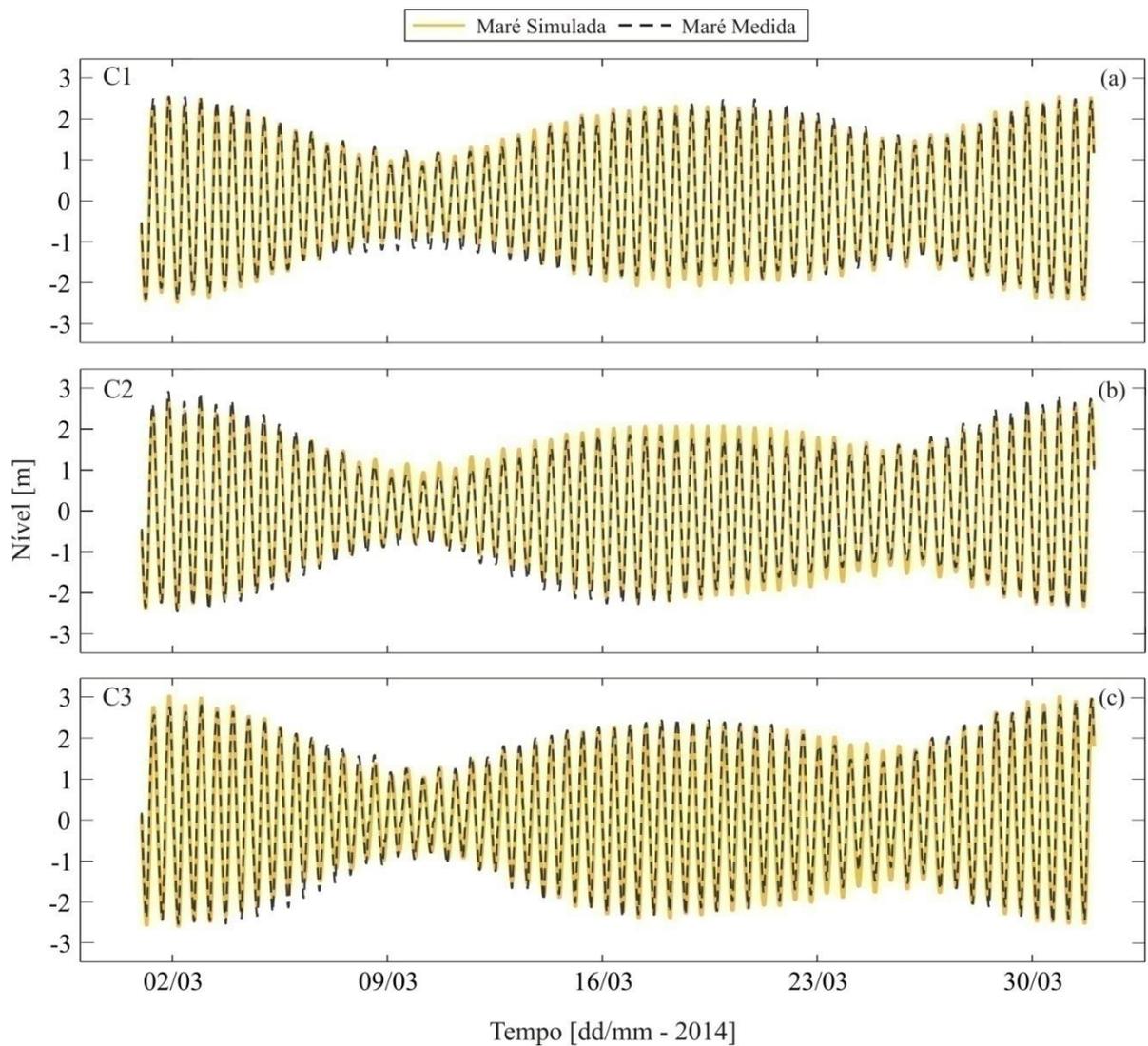
Os resultados da modelagem foram comparados com os dados previstos e observados, de modo que é apresentada uma comparação entre as séries temporais e a relação estatística entre os dados. Os parâmetros considerados durante o processo de calibração foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2) e o Erro Quadrático Médio (EQM).

O coeficiente de Nash-Sutcliffe é aplicado para a análise da eficiência de representação dos fenômenos hidrodinâmicos na utilização da modelagem, sendo que o coeficiente próximo a 1 (um) indica uma boa representação dos dados modelados. Este parâmetro foi calculado para a série de dados inteira. Enquanto o EQM avalia a diferença entre o dado simulado e o dado observado e foi calculado para quatro períodos diferentes da série temporal, referentes às duas sizíguas e as duas quadraturas.

4.2.1 Calibração

A figura 20 representa a comparação entre os dados observados e modelados para as estações C1, C2 e C3, durante o mês de março de 2014, período utilizado para análises comparativas entre os dados.

Figura 20 - Comparação da série temporal dos dados de elevação do nível da água.

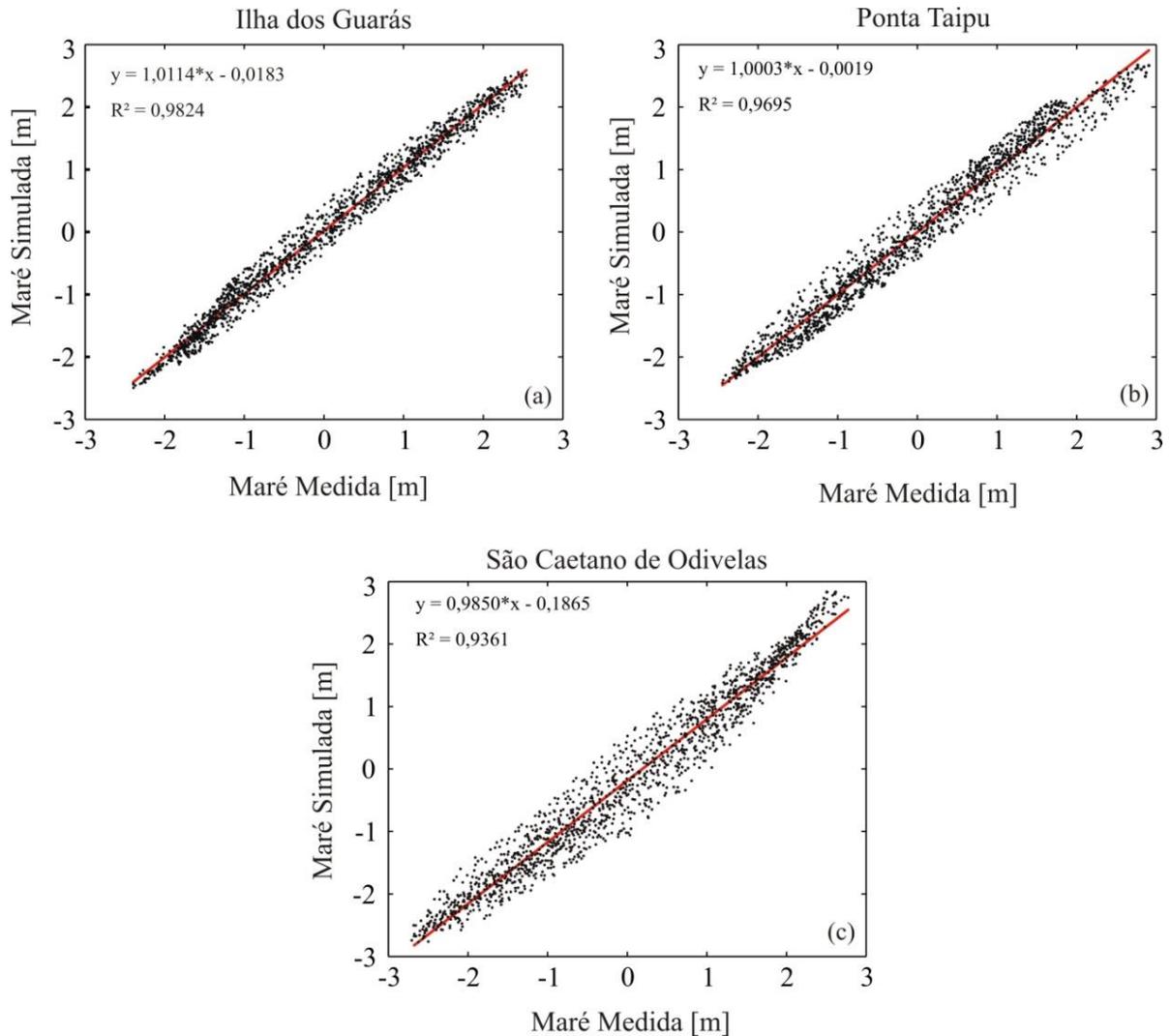


Fonte: Elaborado pelo autor.

A estação que melhor foi representada no modelo foi a da Ilha dos Guarás apresentando um coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2) de 0,9824. Enquanto a estação de Ponta Taipu apresentou o coeficiente de 0,9695 e o de São Caetano foi de 0,9361.

A figura 21 representa a análise da tendência linear ente os valores previstos e simulados de nível da água com os respectivos valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2) e equações da reta de tendência.

Figura 21 - Análise de correlação do nível da água onde os valores modelados são comparados com os valores previstos e/ou medidos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que o modelo representou melhor as áreas localizadas perto da fronteira como as estações C1 e C2, região de maior influência da maré. Mesmo assim, a estação C3 ainda foi bem representada. Em relação ao período lunar, a segunda quadratura foi a melhor representada em todos os pontos. A pior representação foi apresentada em C1 na

primeira quadratura e nas outras estações a segunda sizígia foi mal representada (Tabela 7). As estações C1 e C2 apresentaram um erro inferior a 5% e a estação C3 apresentou um erro de 5% na segunda quadratura e um erro de 7% na segunda sizígia, representando o pior erro da simulação.

Tabela 7 - Coeficiente de correlação de Nash-Sutcliffe para a série inteira e Erro Quadrático Médio para quatro períodos lunares diferentes.

Estação	Coeficiente de Nash-Sutcliffe [R ²]	Erro Quadrático Médio [m]			
		Sizígia 1	Quadratura 1	Sizígia 2	Quadratura 2
C1	0,9824	0,1569	0,2108	0,1781	0,1468
C2	0,9695	0,2211	0,2125	0,2694	0,1767
C3	0,9361	0,3876	0,3146	0,4075	0,3097

Fonte: Elaborado pelo autor.

As tabelas abaixo destacam as amplitudes medidas (amp med) e as amplitudes modeladas (amp mod) das componentes usadas na calibração do modelo hidrodinâmico, indicando que o modelo fez uma boa representação das constituintes harmônicas.

Tabela 8 - Amplitude em metros das constituintes diurnas para os valores medidos e modelados.

Estação	Q1		O1		P1		K1	
	amp med	amp mod						
C1	0,099	0,085	0,046	0,055	0,030	0,033	0,100	0,099
C2	0,032	0,054	0,090	0,072	0,024	0,028	0,044	0,086
C3	0,023	0,054	0,124	0,070	0,072	0,028	0,133	0,086

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Amplitude em metros das constituintes semidiurnas para valores medidos e modelados.

Estação	N2		M2		S2		K2	
	amp med	amp mod						
C1	0,453	0,4145	1,612	1,596	0,452	0,460	0,069	0,125
C2	0,387	0,377	1,578	1,581	0,464	0,475	0,126	0,129
C3	0,280	0,390	1,700	1,70	0,572	0,513	0,155	0,139

Fonte: Elaborado pelo autor.

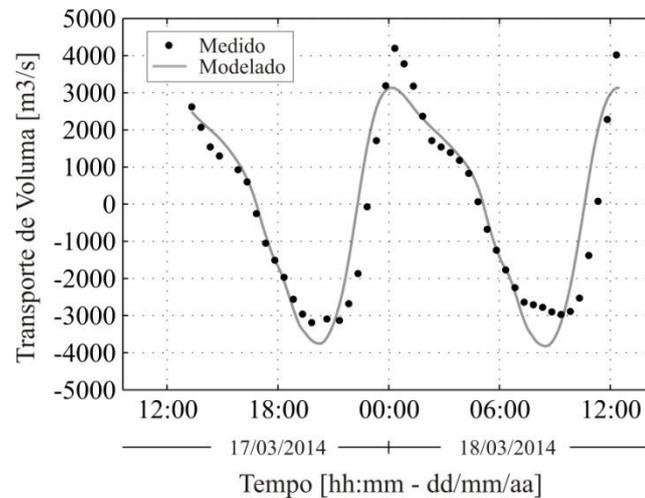
Tabela 10 - Amplitude em metros das constituintes de água rasa para valores medidos e modelados.

Estação	MN4		M4		MS4	
	amp med	amp mod	amp med	amp mod	amp med	amp mod
C1	0,090	0,070	0,061	0,069	0,041	0,051
C2	0,041	0,057	0,090	0,069	0,71	0,056
C3	0,041	0,076	0,030	0,101	0,063	0,083

Fonte: Elaborado pelo autor.

O transporte foi calculado a partir de uma secção transversal no rio Mojuim, durante dois ciclos de maré do período chuvoso. A figura 22 representa a comparação entre o dado modelado e o dado medido, sendo que é possível observar que o modelo não representou significativamente os momentos de máximos e mínimos de transporte.

Figura 22 - Série temporal do transporte para dados medidos e dados modelados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo com uma diferença significativa de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no máximo da vazante, o resultado do modelo pareceu satisfatório, uma vez que o coeficiente de Nash-Sutcliffe foi de 0,8722 e o Erro Quadrático Médio foi de 811, representando um erro de aproximadamente 11% (Tabela 11).

Tabela 11 - Coeficiente de correlação de Nash-Sutcliffe e Erro Quadrático Médio para os valores de transporte modelados e medidos.

Estação	Coeficiente de Nash-Sutcliffe	Erro Quadrático Médio [m]
C3 - secção	0,8722	803,11

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados de transporte adquiridos durante o ciclo de maré, calcula-se a resultante do transporte. Em relação ao rio Mojuim, tanto o resultante da modelagem quanto o dado observado se mostraram importadores (Tabela 12), este fato pode ser associado a proximidade com a baía do Marajó e à influência das conexões

Tabela 12 - Transporte resultante medido e modelado.

Dado	Transporte Resultante [m³/s]
Modelado	-1806,2
Medido	-3699,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Os rios Mojuim e Mocajuba apresentaram hidrodinâmica diferenciada., uma vez que o estuário do rio Mocajuba ocorre um regime de macromaré em toda sua extensão, enquanto no rio Mojuim, é possível observar uma macromaré na sua desembocadura e uma atenuação da onda estuário acima, isto pode ser atribuído ao fato da diferença altimétrica dos dois rios.

A sazonalidade é um fator determinante para o regime hidrológico da região, uma vez que no ponto de coleta mais interno do rio Mojuim para o período chuvoso é possível observar uma maré suavizada, já no período seco, ocorre uma clara elevação do nível da água com enchentes e vazantes bem definidas, sendo que em todas as localidades estudadas, as velocidades de vazantes são superiores as de enchente.

É possível observar também a influência da sazonalidade sobre a intrusão salina no estuário, pois no rio Mojuim para o período seco, ocorre um máximo de salinidade no início da vazante e zero na baixa mar. Já no rio Mocajuba é possível observa a intrusão salina no período chuvoso, acompanhando a movimentação da maré, com máximos na preamar e mínimos na baixa mar.

A coleta amostral permitiu atribuir os valores de entrada referente a fronteira interna do modelo, uma vez que não foi atribuído descarga fluvial para o rio Mocajuba, pois o este rio parece ser dominado por maré em toda sua extensão. E no rio Mojuim, a partir da medições de corrente do fluxo unidirecional da primeira campanha foi estabelecido um valor para a descarga fluvial.

A escolha da malha flexível na definição da malha do domínio permitiu uma boa representação da complexa morfologia dos estuários. As malhas triangulares conseguiram representar as planícies alagadas pela flutuação da maré, bem como as comunicações de canais com malhas curvilíneas. Os valores de ortogonalidade e suavidade também se mostraram aceitáveis.

O modelo apresenta bons valores de calibração do sinal da maré e de transporte de volume. O coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2) apresentou valores inferiores a 0,93 para ambos os pontos de calibração de elevação e valores referentes ao Erro Quadrático Médio (EQM) inferiores a 5 % para a maré e inferiores a 15% para o transporte de volume.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. W. M. *Aplicação do modelo hidrodinâmico no estuário do rio Caeté (NE do Pará)*. 2008. 147f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Bacias Hidrográficas*. 2015. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/default.aspx>>. Acesso em 05/2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (ANP). *Blocos Exploratórios*. 2015. Disponível em: <<http://www.brasil-rounds.gov.br/index.asp>>. Acesso em 08/2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). *Plano Nacional de Integração Hidroviária*. 2015. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH.asp>>. Acesso em 08/2015.
- ARAÚJO JR.; W. P.; ASP, N.E. Hydrodynamic connectivity between two macrotidal Amazonian estuaries. *Journal of Coastal Research*, Special n. 65, p. 1086-1091, 2013.
- ARAÚJO JUNIOR, W. P. *Conectividade hidrodinâmica entre dois estuários amazônicos de macromaré*. 2002. 62f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ecossistemas Costeiros e Estuarinos) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Biologia Ambiental, Instituto de Estudos Costeiros da Universidade Federal do Pará, Campus Bragança, 2012.
- ARCEMENT JR, G. J.; SCHNEIDER, V. R. *Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. United States: [s.n.], 1989. (Paper 2339)
- ASP, N. E.; FREITAS, P. T. A.; GOMES, V. J. C.; GOMES, D. J. Hydrodynamic overview and seasonal variation of estuaries at the eastern sector of the Amazonian coast. *Journal Coastal Research*, Special No. 65, p. 1092-1097, 2013.
- ASP, N.E.; SCHETTINI, C.A.F.; SIEGLE, E.; SILVA, M.S.; BRITO, R.N.R. The dynamics of a frictionally-dominated Amazonian Estuary. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 60, n. 3, p. 391-403, 2012.
- BARROS, M. L.; SENA, M. J. S.; MESQUITA, A. L. A.; BLANCO, C. J. C.; SECRETAN, Y. A water flow pattern analysis of Guajará bay - Amazon estuary - Brazil. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 33, n. 1, p. 79-85, 2011.
- BEARDSLEY, R. C.; CANDELA, J.; LIMBURNER, R.; GEYER, W. R.; LENTZ, S. J.; CASTRO, B. M.; CACCHIONE, D.; CARNEIRO, N. The M2 tide on the Amazon shelf. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, n. C2, p. 2283–2319, 1995.
- BORBA, T.A.C. *Hydrodynamic modelling in amazonian estuary: a flexible mesh approach*. 2014. 46f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Marinha) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós Graduação em Geofísica, Belém, 2014.
- CAMERON, W. M.; PRITCHARD, D. W. Estuaries. In: M. N. HILL, M. N. (ed.). *The Sea*. New York: John Wiley & Sons, 1963. v. 2, p. 306–324.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). *Cartas Náuticas*. 2015. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html#>. Acesso em 02/2015.

COSTA, A.C.L.; RIBEIRO, J.B.M.; SOUZA FILHO, J.D.C. *Estudo micrometeorológico em manguezais*. Belém: MADAM/UFPA/ZMT, 1996. (Projeto de Pesquisa).

COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; IGREJA, H.L.S. & PINHEIRO, R.V.L. Aspectos da tectônica cenozóica na região do salgado, litoral nordeste do Estado do Pará. In: Anais do III SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA. Belém, 1991. p 156-165.

COSTA, M. S. *Aporte hídrico e do material particulado em suspensão para a baía do Marajó: influência dos rios Amazonas e Tocantins*. 2014. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Belém, 2014.

COWAN, W. L. Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, v. 37, n. 7, p. 473-475, 1956.

DAI, A.; TRENBERTH, K. E. Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations. *Journal of Hydrometeorology*, v. 3, n. 6, p. 660-687, 2002.

DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A.; BOYD, R. A conceptual model of estuarine sedimentation. *Journal Sedimentary Petrology*, v. 62, p. 1130-1146, 1992.

DAM, A.; KERNKAMP, H.; PIJL, S.; BALEN, W. D-Flow Flexible Mesh, User Manual, Deltares, 2014.

DELTARES. *Open Earth*. 2015. Disponível em: <<https://publicwiki.deltares.nl/display/OET>>. Acesso em 07/2015.

DELTARES. *Delft3D-flow, user manual: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. Delft, The Netherlands, 2014.

EL-ROBRINI, M.; ALVES, M. A. M. S.; SOUZA FILHO, P. W. M.; EL-ROBRINI, M. H. S.; SILVA JÚNIOR, O. G.; FRANÇA, C. F. Atlas de erosão e progradação da zona costeira do estado do Pará - Região amazônica: áreas oceânica e estuarina. In: MUEHE, D. (Ed.) *Atlas de Erosão e Progradação da Zona Costeira Brasileira*. São Paulo, 2006. p. 1-34.

FRANCO, A. S. *Marés: fundamentos, análises e previsão*. São Paulo, Brasil. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 2009.

FREITAS, P. T. A. *Distorção e atenuação da maré em um Tidal River Amazônico: Efeitos da sazonalidade da vazão fluvial e geomorfologia (Sistema Guamá-Capim)*. 2011. 85f. Dissertação (Mestrado em Biologia Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Biologia Ambiental. Campus Bragança, 2011.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR (FEMAR). *Catálogo de Estações Maregráficas*. 2015. Disponível em: <<http://www.fundacaofemar.org.br/>>. Acesso em: 07/2015.

GABIOUX, M. *Influência da lama em suspensão sobre a propagação da maré na plataforma amazônica*. 2002. 99f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Rio de Janeiro, 2002.

GALLO, M. N. *A influência da vazão fluvial sobre a propagação da maré no estuário do rio Amazonas*. 2004. 99f. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

GARCIA, M.H. *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2008.

GENERAL BATHYMETRIC CHART OF THE OCEANS (GEBCO). *Gridded bathymetry* 2015. Disponível em: <http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/>. Acesso em: 02/2015.

GREGÓRIO, A. M. S.; MENDES, A. C. Characterization of sedimentary deposits at the confluence of two tributaries of the Pará river estuary (Guarajá bay, Amazon). *Continental Shelf Research*, v. 29, p. 609-618, 2009.

HAGEN, E. D. M. T. *Hydrodynamic river modelling with D-Flow Flexible Mesh: Case study of the side channel at Afferden and Deest*. 2014. 60f. Dissertação (MSc thesis in Civil Engineering and Management) - University of Twente, Civil Engineering and Management, Enschede, 2014.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). *Unidades de Conservação (RESEX – Reserva Extrativista)*. 2015. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/biomas-brasileiros/marinho/unidades-de-conservacao-marinho/>>. Acesso em 08/2015.

KERNKAMP, H. W. J.; DAM, A. V.; STELLING, G. S.; GOEDE, E. D. Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf. *Ocean Dynamics*, v. 61, n. 8, p.1175–1188, 2011.

KRAMER, S. C.; STELLING, G. S. A conservative unstructured scheme for rapidly varying flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 58, p. 183–1212, 2008.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C. Geomorphology and environmental aspects of the Araguaia fluvial basin, Brazil. *Zeitschrift für geomorphologie NF*, v. 129, p. 109-127, 2002.

LE BARS, Y.; LYARD, F.; JEANDEL, C.; DARDENGO, L. The AMANDES tidal model for the Amazon estuary and shelf. *Ocean Model*, v. 31, p. 132-149, 2010.

LIMA, A. M., OLIVEIRA, L. L., FONTINHAS, R. L., LIMA, R. J. S. Ilha do Marajó: revisão histórica, climatológica, bacias hidrográficas e propostas de gestão. *HOLOS Environment*, v.5, n.1, p 65-80, 2005.

MÁCOLA, G.; EL-ROBRINI, M. *Ilha dos Guarás (Mariteua) - município de Curuçá (NE do Pará): aspectos físicos, meteorológicos & oceanográficos*. Companhia das Docas do Pará, 2004. (Relatório Final - Cartografia, Hidrografia e Digitalização - CHD & Grupo de Estudos Marinhos e Costeiros - GEMC).

MASSON, S.; DELECLUSE, P. Influence of the Amazon river runoff on the tropical Atlantic. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 26, n. 2, p. 137–142, 2001.

MAXIMOVA, T.; VANLEDE, J.; PLANCKE, Y.; VERWAEST, T.; MOSTAERT, F. *Testcase D-Flow FM: model set-up and validation*. Antwerp, Belgium: Flanders Hydraulics Research, 2013.

- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). *Unidades de conservação*. 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/sistema-nacional-de-ucs-snuc>>. Acesso em 05/2015.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípio de oceanografia física em estuários*. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- MUEHE, D.; GARCEZ, D.S. A Plataforma Continental Brasileira e sua relação com a zona costeira e a pesca. *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, v. 4, n. 08, p. 69-88, 2005.
- NASCIMENTO, I. B. A. *Aplicação de modelo hidrodinâmico 2dh em canais de maré da costa Leste da ilha do Marajó - Pará*. 2013. 127f. Dissertação (Mestrado em Biologia Ambiental) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Biologia Ambiental. Campus Bragança, 2013.
- NITTROUER, C.A.; DEMASTER, D.J. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 5/6, p. 553-573, 1996.
- PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*, v.28, p.929-937, 2002.
- PEREIRA, L. C. C.; DIAS, J. A.; CARMO, J. A.; POLETTE, M. A Zona Costeira Amazônica Brasileira. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 9, n. 2, p. 3-7, 2009.
- PHILANDER, S.G. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. First Edition. San Diego; New York: Academic Press, 1990, 230p. (*International Geophysics Series*, v. 46).
- PRESTES, Y. O.; ROLLNIC, M.; SILVA, M. S.; ROSÁRIO, R. P. Volume transport in the tidal limit of the Pará river, Brazil. In: PHYSICS OF ESTUARIES AND COASTAL SEAS CONFERENCE, 17th., 2014, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil. *Proceedings*. Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil.2014. CD-ROM.
- PROST, M.T.; MENDES, A. C.; FAURE, J.F.; BERREDO, J. F.; SALES, M. E. C.; FURTADO, L. G.; SILVA, M. G. S.; SILVA, C. A.; NASCIMENTO, I.; GORAYEB, I.; SECCO, M. F. V.; LUZ, L. M. Manguezis e estuários da costa paraense: exemplo de estudo multidisciplinar integrado (Marapanim e São Caetano de Odivelas). In: PROST, M. T.; MENDES, A. C. (org.). *Ecossistemas costeiros: impactos e gestão ambiental*. Belém: Ministério da Ciência e Tecnologia, Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 75-87.
- PUGH, D. T. *Tides: surges and mean sea level*. New York: John Wiley, 1987.
- ROCHA, A. S. *Caracterização física do estuário do rio Mojuim em São Caetano de Odivelas - PA*. 2015. 50f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Marinha) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós Graduação em Geofísica, Belém, 2015.
- RODRIGUES, J. E. C.; SZLAFSZTEIN, C. F. Análise do Porto de Vila do Conde como uma área de ameaça potencial ao derramamento de óleo. *Revista GeoAmazônia*, v. 01, p. 93-106, 2013.
- ROSMAN, P. C. C. *Referência técnica do SisBaHiA*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Engenharia Costeira e Oceanográfica, 2011.

SANTOS, G. M.; SANTOS, A. C. M. Sustentabilidade da pesca na Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 19, n.54, p. 165-182, 2005.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH) – *Dados pluviométricos*. 2015. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em 10/2015.

SIOLI, H. *Amazônia: fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais*. Rio de Janeiro: [s.n.], 1985.

SOUZA FILHO P.W.M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.

SOUZA FILHO, P. W. M.; SALES, M. E. da C.; PROST, M. T. R. da C.; COSTA, F. R.; SOUZA, L. F. M. de O. Zona Costeira Amazônica: o cenário regional e os indicadores bibliométricos em C&T. In: SOUZA FILHO, P. W. M. et al. *Bibliografia da Zona Costeira Amazônica*. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2005. p. 09-20.

SOUZA FILHO, P. W. M.; LESSA, G. C.; COHEN, M. C. L.; COSTA, F. R.; LARA, R. J. The subsiding macrotidal barrier estuarine system of the eastern Amazon coast, Northern Brazil. In: DILLENBURG, S. F.; HESP, P. A. *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. New York: Springer-Verlag, 2009. p. 347-376.

SOUZA, R. R. *Modelagem numérica de correntes de maré na baía de Marajó e rio Pará (PA)*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2006.

SZLAFSZTEIN, C. F. Indefinições e obstáculos no gerenciamento da zona costeira do estado do Pará, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 9, n. 2, p. 47-58, 2009.

VERWEY, A.; KERNKAMP, H.W.J.; STELLING, G.S.; TSE, M.L.; LEUNG, W.C. Potential and application of hydrodynamic modelling on unstructured grids. Proceedings of the Sixth International Conference on Asian and Pacific Coasts, Hong Kong, 2011.

WARMINK, J.J. *Literature report: uncertainty analysis of hydrodynamic river models*. 2009. Dissertação (MSc thesis in Civil Engineering and Management) - University of Twente, Civil Engineering and Management, Enschede, 2009.