



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós Graduação em Geofísica

MATHEUS SANTIAGO LOPES

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA 2DH NO FURO DA LAURA-
NORDESTE PARAENSE**

BELÉM – PA

2016

MATHEUS SANTIAGO LOPES

“MODELAGEM HIDRODINÂMICA 2DH NO FURO DA LAURA-
NORDESTE PARAENSE”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito final para obtenção de título de Mestre em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic

BELÉM – PA

2016

MATHEUS SANTIAGO LOPES

"MODELAGEM HIDRODINÂMICA 2DH NO FURO DA LAURA-
NORDESTE PARAENSE"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito final para obtenção de título de Mestre em Geofísica.

Data da Aprovação: 23/05/2016

Conceito: *Excelente*

Banca Examinadora:



Prof. Marcelo Rollnic - Orientador
Doutor em Oceanografia
Universidade Federal do Pará



Prof. Marcus André Silva - Membro
Doutor em Oceanografia
Universidade Federal de Pernambuco



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

Prof. Dr. Alexandre M. Casseb do Carmo
Universidade Federal do Pará - UFPA
Faculdade de Oceanografia
SIAPE: 1350216

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, Senhor Jesus, por seu constante amor e orientação.

Meus pais, Antônio Itamar Lopes e Luciedna Santiago Lopes, pelo total apoio e amor por toda minha vida.

A Laís Raiol, pelo suporte nos momentos turbulentos, pelo carinho e cuidado.

Ao Professor Dr. Marcelo Rollnic, pela sua orientação e valiosas considerações.

Aos colegas de Universidade, Arthur Santos, Fabiola Mota, Maurício Costa, Renan Peixoto, Thaís Borba e Yuri Prestes por suas contribuições seja de cunho acadêmico, moral ou ético, foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos companheiros do Laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR), pela sua disposição em compartilhar seus conhecimentos.

A Universidade Federal do Pará e o Programa de Pós-Graduação em Geofísica por proporcionar a realização de mais um sonho em minha vida.

*“Confia no Senhor de todo o teu coração,
e não te estribes no teu próprio
entendimento. O Senhor, com sabedoria
fundou a terra; com entendimento
preparou os céus” Pv.3:5 e 19*

(Rei Salomão)

RESUMO

Os ambientes estuarinos são objeto de árduo estudo ao longo das últimas décadas devido sua importância no contexto econômico, social e ambiental. As estratégias para contenção de derrames de óleo em corpos d'água, por exemplo, são baseadas em estudos de modelagem hidrodinâmica. O uso de modelos numéricos computacionais para prever e analisar os padrões de circulação dentro de corpos d'água costeiros vem crescendo no país. Na região norte do Brasil a utilização de modelos ainda está em caráter experimental. Neste trabalho, foi utilizado o software SisBaHia® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) para implementar, calibrar e validar um modelo hidrodinâmico para o corpo d'água chamado furo da Laura (rio Guajara-Mirim) que localiza-se na região costeira do nordeste Paraense. O modelo foi calibrado com dados pretéritos de elevação da superfície e velocidade de correntes coletados em três períodos: seco de 2013, chuvoso de 2014 e seco de 2014. O fluxo de enchente e vazante da maré ocorre de forma simultânea nas duas bocas que o furo da Laura apresenta. Objetivou-se localizar a região de tombo da maré ou convergência barotrópica e sua variação sazonal. Foi simulado a hidrodinâmica para um mês no período chuvoso (fevereiro) e um mês no período seco (agosto). O transporte lagrangeano com partículas lançadas na baía do sol foi analisado quanto sua dispersão horizontal. Os locais de convergência do campo de velocidade foram encontrados próximos à boca sul do FL e os locais de divergência variam espacialmente devido o ciclo da maré. As partículas lançadas na baía do Sol tendem a não entrar no FL, mas contribuem para o processo de sedimentação e erosão que ocorre no litoral da ilha de Colares.

Palavras-chave: Modelagem hidrodinâmica. Convergencia barotrópica. SisBaHia®.

ABSTRACT

The estuarine environments are widely studied over the past decades due to its social, environmental and economic importance. For example, the strategies to contain oil spill are based on hydrodynamic modeling research. The application of numerical models to predict and analyze circulation patterns inside coastal water bodies is growing in the country. In northern Brazil the use of those models is still experimental. In this work was used the software SisBaHia to implement, calibrate and validate a hydrodynamic model to the water body “furo da Laura” (FL), located on Guajara-Mirin river, on the coastal region of northeastern Pará. The model was calibrated with previous data about surface elevation and current speed collected in three periods: dry season of 2013, rainy season of 2014 and dry season of 2014. The flood and ebb tide flow occurs simultaneously in two entrances that the FL presents. The goal was to locate the barotropic convergence and its seasonal variation. It was simulated one month during the rainy season (February) and one month during the dry season (August). It was simulated a lagrangian transport with particles released in Sol bay with an analysis of its horizontal dispersion. The convergence sites were found nearby the south entrance of the FL and the divergence sites have a spatial variation due the tide cycle. The particles released in the Sol bay tend to leave the modeling domain and don't penetrate the FL, but they contribute with the erosion and sedimentation process that occurs in coast of the Colares Island.

Keywords: Hydrodynamic Modeling. Barotropic convergence. SisBaHia®; Furo da Laura.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área.....	17
Figura 2 - Precipitação e temperatura na cidade de Vigia no ano de 2014.....	18
Figura 3 - Exemplo da distribuição de 9 nós do elemento quadrangular. Os números em azul indicam o número dos nós na malha, enquanto que a numeração em preto a localização dos nós nos elementos quadrangulares.....	22
Figura 4 - Malha confeccionada para discretização da área.....	23
Figura 5 - Mapa batimétrico da área de estudo.....	24
Figura 10 - Precipitação total na estação de Soure do INMET no mês de fevereiro.....	30
Figura 11 - Precipitação total na estação de Soure do INMET no mês de agosto.....	30
Figura 12 - Localização do transects (T) e indicação da fronteira do domínio modelado.....	32
Figura 13 - Localização dos pontos de calibração.....	38
Figura 14 - Comparação no ponto 1 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).....	39
Figura 15 - Comparação no ponto 2 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).....	39
Figura 16 - Comparação no ponto 3 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).....	40
Figura 17 - Comparação no ponto 4 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).....	40
Figura 18 - Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca norte do FL - período chuvoso.....	42
Figura 20 - Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período chuvoso.....	43
Figura 21 - Comparação das velocidades transversais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período chuvoso.....	43
Figura 22 - Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período seco.....	44

Figura 23 - Comparação das velocidades transversais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período seco.....	44
Figura 24 - Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca norte do FL - período seco.	45
Figura 25 - Comparação das velocidades transversais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca norte do FL - período seco.	45
Figura 26 - Mapa de localização da área de estudo e localização dos pontos amostrais.....	51
Figura 27 - Batimetria e malha de elementos finitos	53
Figura 28 - Comparação entre dados reais e modelados (Ponto 1). Segunda sizígia.....	57
Figura 30 - Comparação entre dados reais e modelados (Ponto 4). Segunda sizígia.....	58
Figura 31 - Comparação entre dados reais e modelados (Ponto 4). Segunda quadratura.....	58
Figura 32 - Resultado da calibração e validação das componentes longitudinais e transversais da velocidade no período chuvoso (PC) e seco (PS). 60	
Figura 33 - Campo de velocidade no instante de enchente na quadratura - Período chuvoso. Zona de convergência.....	62
Figura 34 - Campo de velocidade no instante de preamar na sizígia - Período chuvoso. Zona de divergência.	62
Figura 35 - Campo de velocidade no instante de vazante na sizígia – Período chuvoso. Zona de divergência.	63
Figura 36 - Campo de velocidade no instante de baixa-mar na sizígia – Período chuvoso. Zona de divergência.	63
Figura 37 - Variação temporal do módulo da velocidade na seção 1, ponto 3 e seção 2 - Período chuvoso.....	64
Figura 38 - Campo de velocidade no instante de enchente na quadratura – Período seco. Zona de convergência.....	65
Figura 40 - Mapa conceitual da região do FL e suas áreas de convergência e divergência.....	66
Figura 41 - Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na preamar de sizígia e quadratura.....	67

Figura 42 - Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na vazante de sizígia e quadratura.....	68
Figura 43 - Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na baixa-mar de sizígia e quadratura.....	68
Figura 44 - Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na enchente de sizígia e quadratura.....	69
Figura 45 - Mapa probabilístico de passagem da nuvem de partículas.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações sobre a malha de elementos quadrangulares utilizada na área de estudo.....	23
Tabela 2 - Valores de rugosidade para diferentes tipos de leito.....	25
Tabela 3 – Constantes harmônicas de maré para estação em frente à ilha de Colares.	27
Tabela 4 – Configurações referentes ao modelo hidrodinâmico	34
Tabela 5 – Comparação entre os dados reais e modelados da elevação da superfície.....	40
Tabela 6 – Comparação entre os dados reais e modelados das velocidades nas seções 1 e 2 - Período seco.....	46
Tabela 7 – Comparação entre os dados reais e modelados das velocidades nas seções 1 e 2 - Período chuvoso.	46
Tabela 8– Dados de simulação do modelo transporte lagrangeano.	48
Tabela 9 – Configurações referentes ao modelo hidrodinâmico	55
Tabela 10 – Comparação entre os dados reais e modelados nos 4 pontos. Elevação máxima, mínima, coeficiente de correlação e erro quadrático médio.....	59
Tabela 11 – Comparação entre os dados reais e modelados nas seções 1 e 2 (período chuvoso). Velocidade longitudinal (U) e transversal (V) máxima, mínima e erro quadrático médio.	61
Tabela 12 – Comparação entre os dados reais e modelados nas seções 1 e 2 (período seco). Velocidade longitudinal (U) e transversal (V) máxima, mínima e erro quadrático médio.....	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Motivação	14
1.2 Área de estudo	16
1.3 Objetivo	19
1.3.1 Objetivo geral	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Metodologia	19
1.4.1 Domínio de modelagem e malha.....	22
1.4.2 Batimetria	23
1.4.3 Rugosidade do fundo	24
1.4.4 Condições de maré no contorno	26
1.4.5 Variáveis meteorológicas	28
1.4.6 Transporte de volume na baía do Sol	31
1.4.7 Configurações gerais utilizadas no modelo hidrodinâmico.....	33
1.4.8 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico	37
1.4.9 Modelo de transporte lagrangeano.....	47
2 CONVERGÊNCIA BAROTRÓPICA EM UM CANAL DE MARÉ NO ESTUÁRIO AMAZÔNICO	49
REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

A utilização de modelos computacionais para a compreensão de processos hidrodinâmicos no norte do Brasil ainda é recente, sendo grande parte dos modelos aplicados à investigação da dinâmica na plataforma continental. A escassez de dados oceanográficos é um dos grandes problemas na região norte, visto que são necessários para a calibração de qualquer modelo hidrodinâmico.

No nordeste do estado do Pará, encontra-se o estuário do rio Pará, composto por vários canais de maré e furos, onde a hidrodinâmica é fortemente influenciada pelas oscilações da maré e pela elevada descarga fluvial. De forma peculiar, no furo da Laura, o qual é banhado pela baía do Marajó, os fluxos de enchente e vazante das correntes de maré ocorrem de forma simultânea nas suas duas conexões, as quais distam, entre si, aproximadamente 28 km.

A metodologia do trabalho consistiu em: 1) fazer o levantamento de dados pretéritos de corrente, elevação da superfície livre, batimetria da região do Furo da Laura e adjacências e dados de transporte de volume da baía do Sol (área adjacente ao Furo da Laura), 2) confecção de malha discretizada para a área de estudo, 3) Implementação, calibração e validação de modelo hidrodinâmico utilizando o pacote computacional para modelagem hidrodinâmica ambiental SisBaHiA® 4) Análise da tendência do transporte lagrangeano e dispersão horizontal das partículas. Os dados utilizados na calibração do modelo tem como fonte o banco de dados do laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR) da Universidade Federal do Pará (UFPA)

Este trabalho de dissertação será apresentado em dois capítulos, sendo o primeiro destinado a expor uma visão sinótica do problema abordado, da área estudada e dos métodos utilizados. O segundo capítulo, na forma de artigo, intitulado "*Barotropic Convergence in tidal channel on the Amazon Estuarie*" a ser submetido à *Journal of Coastal Research*

1.1 Motivação

O estudo dos ambientes costeiros é de fundamental importância no âmbito social, econômico e ecológico, visto que nestes se desenvolvem não somente cidades, mas sua biodiversidade é alta e sensível às mínimas interferências, sejam elas de origem natural ou antrópicas. Portanto, estudar as características físicas, químicas e biológicas dos corpos d'água presentes nesses ambientes costeiros, em especial, os estuários, se faz necessário inserido neste contexto, este trabalho que está focado na compreensão dos processos físicos inerentes a estes ambientes estuarinos principalmente próximos a faixa equatorial.

A região amazônica possui uma das maiores bacias hidrográficas do mundo, abrangendo uma área aproximada de 6.112.000 km² que, somada a bacia do Tocantins, perfaz uma área total de 6.869.000 km² conferindo uma descarga média aos rios Amazonas e Tocantins de 213.000 m³/s (COBRAPHI, 1984). A Zona Costeira Amazônica Brasileira (ZCAB) é basicamente estuarina. Suas características e dimensões resultam em uma complexa rede de drenagem associada a uma ampla área sujeita a inundações diárias (devido à maré) e sazonais (devido aos períodos de cheia dos rios) (NASCIMENTO, 2013).

Para compreender melhor estes ambientes complexos e muitas vezes de difícil acesso para coleta de dados, a modelagem numérica hidrodinâmica tem sido uma ferramenta de uso crescente nos últimos anos, em virtude também do avanço da tecnologia e da disponibilidade de softwares. Rosman (2015) expõe nos seguintes termos: "A modelagem numérica permite a integração de informações espacialmente dispersas e a interpolação de informações para regiões nas quais não há informação. Isto auxilia nas medições feitas em estações pontuais e otimiza os custos de monitoramento, propiciando o entendimento da dinâmica de processos naturais".

Segundo Smith (2007), modelar é aplicação da matemática à solução de problemas, transformando um problema prático em um modelo matemático, buscando soluções que possam ser aplicadas na situação original. O objetivo de todo o modelo é explicar o funcionamento de determinado sistema. A premissa básica de todo o modelo, por mais complexo que possa ser, é que se trata de um método limitado de representação da natureza.

A modelagem matemática tornou-se uma ferramenta rotineira no auxílio a solução de problemas ambientais, sendo usada com frequência em projetos que necessitem de prévia avaliação de impactos, como os de previsão e simulação de alterações de níveis em cursos d'água, permitindo assim, otimizar o número de campanhas de amostragem necessárias ao estudo do comportamento dispersivo de um meio hídrico, revelando-se uma ferramenta útil na minimização de custos (CHRISTOFOLETTI, 1999). A aplicação de modelos que consigam descrever de forma satisfatória a hidrodinâmica em regiões costeiras possui grande importância na definição de estratégias de gerenciamento de corpos d'água costeiros, no estudo de impactos ambientais de projetos de engenharia, assim como na otimização das redes de monitoramento ambiental, que possuem custos elevados, mas que geram informações essenciais para um melhor entendimento dos sistemas de interesse. (BARROS, 2002).

Um exemplo da necessidade de modelos hidrodinâmicos na região norte, é o caso do acidente que ocasionou o afundamento da balsa Miss Rondônia, nas proximidades do Terminal de Vila do Conde, no dia 4 de fevereiro de 2000. Esta balsa transportava 1,8 milhões de litros de óleo combustível. Parte deste óleo vazou durante o resgate da embarcação. Um modelo hidrodinâmico bem calibrado seria uma ferramenta importante para o planejamento de recuperação ambiental neste caso, felizmente a maior parte do vazamento foi recuperada, sem muitos danos ambientais (BERRÊDO et al, 2001).

A região norte tem grande potencial no que diz respeito à exploração petrolífera, devido às bacias sedimentares paleozóicas, como a bacia da foz do Amazonas. Estas tem se mostrado promissoras em acumulação de hidrocarbonetos, sendo assim, faz necessário o aumento nos esforços para planejamento e proteção ambiental, visando à diminuição dos riscos advindos de possíveis acidentes envolvendo derrame de substâncias nocivas ao meio ambiente.

Portanto, enquadra-se entre os complexos contextos hidrográficos e de especial atenção ambiental, a região do Furo da Laura (FL), também conhecido como rio Guajara-Mirin. Assim como outros furos similares a este na costa nordeste do Pará, são utilizados como rota de navegação, principalmente de navios que saem do Porto de Vila do Conde (COELHO; MONTEIRO; SANTOS,

2004). Este ambiente estuarino está situado na região nordeste do estado do Pará, o qual ainda foi pouco explorado do ponto de vista físico-oceanográfico. A modelagem numérica hidrodinâmica realizada com software SisBaHiA®, será de fundamental importância na compreensão dos processos físicos existentes e poderá servir de base para geração de novos dados confiáveis, podendo também modificar os cenários modelados no tempo e no espaço

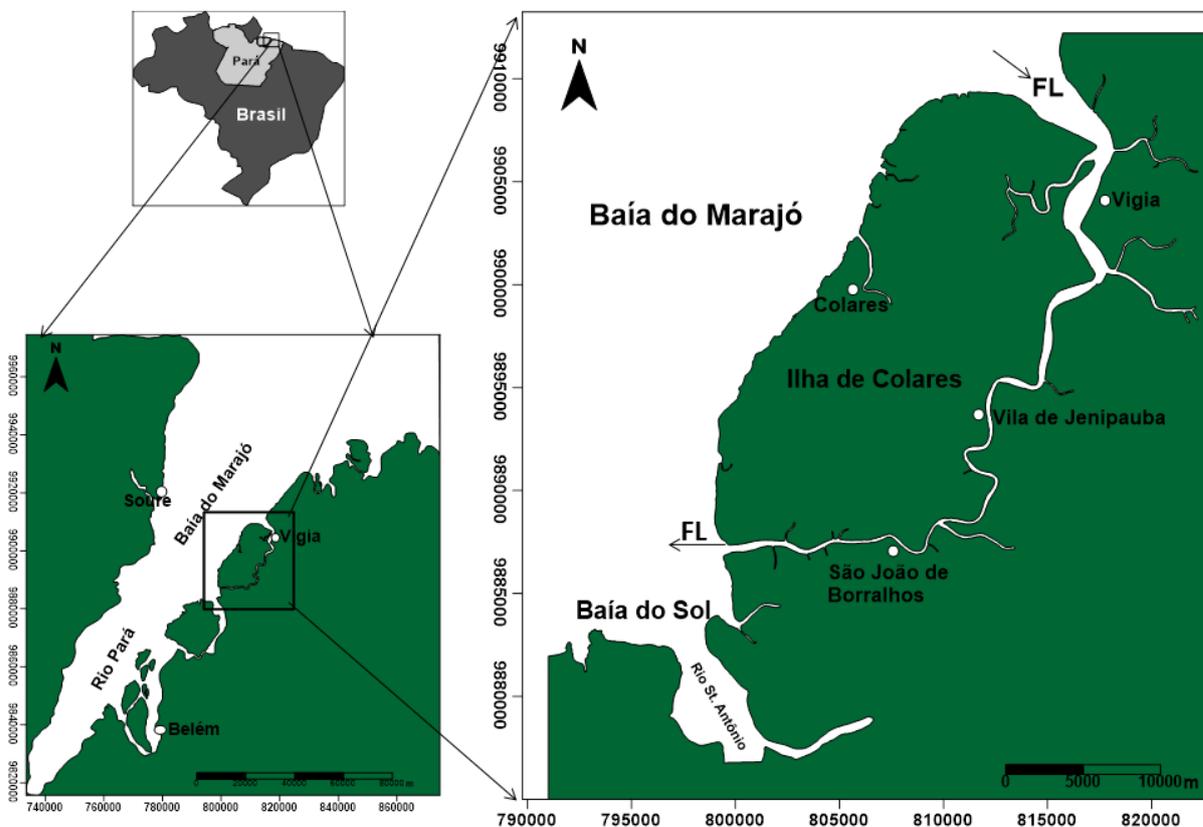
1.2 Área de estudo

O furo da Laura (FL) integra o estuário do rio Pará o qual se localiza na região norte do Brasil, fazendo parte da mesorregião nordeste do estado do Pará e da microrregião do Salgado. Sua distância da capital Belém, em linha reta, é de 77 km (IBGE, 2008). A cidade referência mais próxima é Vigia. O Furo da Laura tem como limitantes a Ilha de Colares a noroeste e o continente (e suas diversas comunidades ribeirinhas) a sudeste.

Os furos, a exemplo dos que ocorrem na região como o furo Maguari e das Marinhas comportam-se como canais fluviais sob influência das marés, e estas influenciam na sedimentação em virtude da oscilação diária do nível das águas (enchentes e vazantes) (LIMA, TOURINHO, COSTA, 2000). Não constituem rios propriamente ditos, mas porções superiores e internas do estuário, o que é confirmado pelo predomínio de processos fluviais. Além disso, estes canais recebem a descarga de pequenos rios que provêm do continente ou das ilhas (BARBOSA, 2007).

O furo da Laura está situado zona 22M, aproximadamente entre as coordenadas UTM 796169-830035 W e 9880864-9916228 S do datum horizontal Córrego Alegre, entre os paralelos 1°03'S e 0°45'S e meridianos 48°03'W a 48°21'W e separa a ilha de Colares do continente (figura 1).

Figura 1 – Localização da área.



Fonte: Autor.

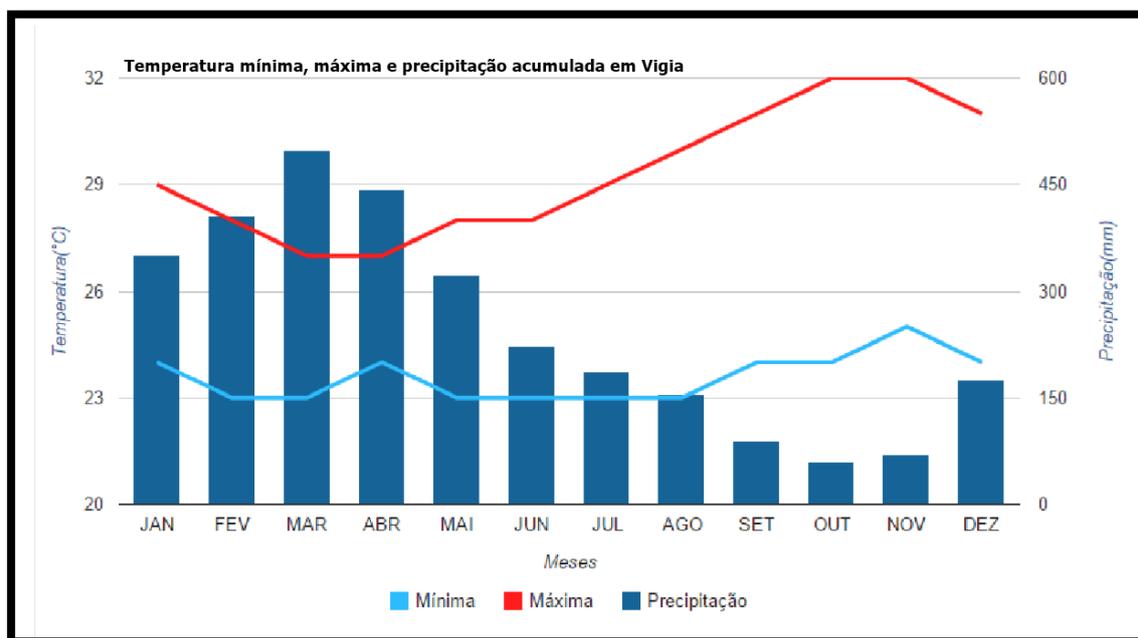
De acordo com Tuma (1997), a origem da ilha de Colares está ligada, do mesmo modo que outras ilhas situadas na porção oriental da baía do Marajó (Trambioca, Cotijuba, Outeiro e Mosqueiro), às dinâmicas neotectônica e glácioeustática da passagem do Pleistoceno para o Holoceno, momento no qual devem ter se instalado o furo da Laura, isolando do continente um bloco que se deslocou para NW.

É uma região de planícies de maré lamosas com sua típica vegetação de mangue que se estende por cerca de 10 km no Furo da Laura, primariamente na parte central do furo, seguido de formações de mangue isoladas pela vegetação aluvial próximo a boca sul do FL, o que indica a pouca influência da água salgada sobre a constituição do substrato (BARBOSA, 2007).

O clima da região é do tipo Af na classificação de Köppen (1900-1936), que significa um clima tropical equatorial, onde a umidade é constante e a pluviosidade atinge no mês mais seco o valor de precipitação total de 60 mm (CORRÊA et al., 1974). Segundo Moraes et al. (2005) a região apresenta clima

equatorial amazônico típico, com temperaturas que variam de 26 °C a 39 °C. O Regime pluviométrico da região é dividido em dois períodos no ano: os seis primeiros meses do ano (período chuvoso) e os últimos seis (período seco ou menos chuvoso). É válida a ressalva que, na região norte do país, mesmo no período seco, as chuvas estão presente de forma significativa a exemplo da cidade de Vigia (figura 2), que no período chuvoso (março) em 2014 atingiu um máximo de precipitação acumulada de 500 mm e no período seco (outubro) obteve-se 60 mm (Instituto Nacional de Meteorologia, 2014).

Figura 2 – Precipitação e temperatura na cidade de Vigia no ano de 2014.



Fonte: INMET (2014).

O FL está inserido no estuário do rio Pará e apresenta características peculiares que serão bastante relevantes na modelagem, pois este furo faz conexão com baía do Marajó por meio de duas bocas por onde ocorrem os fluxos de enchente e vazante concomitantemente. O fluxo no FL tem os mesmos sentidos tanto na boca norte como na boca sul, fato constatado por Fernandes (2014), o qual também sugeriu a investigação de ocorrência do fenômeno chamado tombo da maré ou convergência barotrópica no interior do FL, fenômeno já encontrado em outros estuários no Brasil como visto em Rigo e Sarmento (1993) e Rigo (2004).

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo geral

Aplicar o Modelo Hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA® simulando as condições hidrodinâmicas do Furo da Laura.

1.3.2 Objetivos específicos

- Calibração e validação do modelo hidrodinâmico através de dados coletados in situ
- Identificar as regiões de convergência barotrópica.
- Avaliar o transporte sedimentar da baía do Sol para dentro do FL.
- Identificar as diferenças sazonais no FL (seco e chuvoso).

1.4 Metodologia

O SisBaHia é um pacote profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Dentro do pacote escolhido utiliza-se o modelo FIST3D (Filtered in Space and Time). Uma característica importante deste modelo é o fato dele modelar os efeitos de sub-escala (turbulência) baseado em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na simulação de grandes vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*) (ROSMAN, 2015). O SisBaHia oferece duas opções de modelagem: 3D e 2DH. De acordo com Araújo (1993), a maioria dos corpos d'água rasos podem ser bem representada por um modelo matemático bidimensional no plano horizontal (2DH), quando as escalas verticais do movimento são muito menores que as horizontais, onde a coluna d'água é razoavelmente bem misturada, isto é, com pouca ou nenhuma estratificação vertical.

O FL é um corpo d'água relativamente raso com profundidade média de 5,5 metros e distância das margens em seus trechos mais estreitos igual a 150 metros. A estratificação salina é pouco relevante, onde no mês de setembro e

outubro de 2013 a salinidade não ultrapassa 4 PSU (Escala Prática de Salinidade) (FERNANDES, 2014). Portanto, no presente trabalho, optou-se pela modelagem 2DH, a qual caracteriza-se pela resolução das equações de movimento (Navier-Stokes) com aproximação de águas rasas (pressão hidrostática) para escoamentos homogêneos integrados na vertical na direção x (1) e na direção y (2) e a resolução da equação da continuidade (do volume) integrada na vertical (3), tendo como solução os valores U, V e ξ que representam a velocidade longitudinal média na coluna d'água, a velocidade transversal média na coluna d'água e a elevação da superfície livre, respectivamente

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_0)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + 2\omega V \sin\theta - \frac{U}{H} \sum q \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_0)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\omega U \sin\theta - \frac{V}{H} \sum q \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\xi+h)}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q \quad (3)$$

Para direção x, e analogamente para direção y, os termos da equação representam:

$\frac{\partial U}{\partial t}$ → Aceleração local.

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$ → Aceleração advectiva.

$-g \frac{\partial \xi}{\partial x}$ → Componente barotrópica do gradiente de pressão.

$-g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_0)}{\partial x}$ → Componente baroclínica do gradiente de pressão.

$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right)$ → Resultante das tensões turbulentas 2DH.

$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E)$ → Resultante das tensões de atrito entre o fundo, superfície e estruturas inseridas no escoamento.

$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \rightarrow$ Efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período.

$2\omega V \sin\theta \rightarrow$ Aceleração de Coriolis.

$-\frac{U}{H} \sum q \rightarrow$ Efeitos na quantidade de movimento devido à variação de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação, evaporação e infiltração.

Para a correta implementação do modelo hidrodinâmico, as características de fronteira devem ser fornecidas. Dentre essas características, aquelas que vão nortear a resolução numérica do modelo, são chamadas condições de contorno. As informações básicas a serem fornecidas na condição de contorno e iniciais são: Domínio de modelagem e malha, os quais delimitam a região modelada, esta região é limitada pelos contornos (ou fronteira) de terra, que podem representar ilhas, porções continentais e margens dos corpos d'água e pelo contorno aberto, que representa o limite do domínio de água modelada; a batimetria do corpo d'água e a rugosidade do fundo (ROSMAN, 2015).

O ambiente em questão está sob a influência de macromarés (marés com amplitude superior a 4 metros), que dão origem a correntes de maré que regem a hidrodinâmica, portanto é necessário fornecer a elevação da superfície como condição de contorno nos limites de fronteira que é baseada na análise harmônica das constantes de maré obtidas na região de interesse.

O SisBaHia disponibiliza a opção de modelar volumes de água que estejam entrando no domínio através de seus limites (fronteiras). Para os nós da malha que representam a seção transversal do rio St. Antônio que deságua na baía do Sol, foram fornecidos valores de vazão nodal (vazão total do rio dividida pelo comprimento da seção transversal), de forma que a integração da vazão nodal ao longo da seção seja equivalente à vazão total. Esta vazão trata-se, de fato, de um transporte de volume resultante que será explicado com mais detalhe no item 1.4.6.

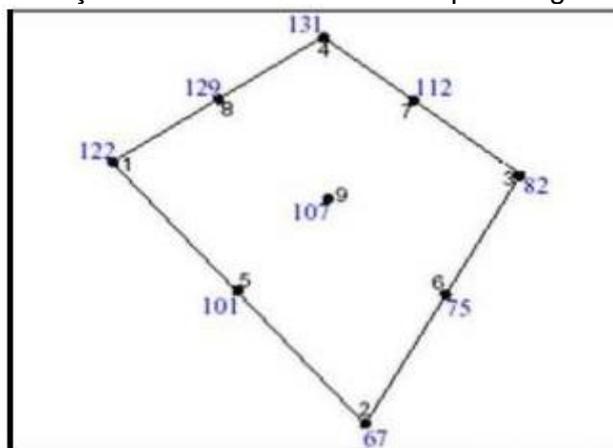
Neste trabalho as condições de entrada para precipitação, intensidade e direção do vento, foram extraídas de bases fornecidas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). De forma geral, é comum a inserção de condições iniciais e de contorno obtidos através de parametrização em trabalhos de

modelagem, ou seja, dados que foram gerados por outros modelos, porém quanto maior a fidelidade dos dados ao ambiente natural, maior será a confiabilidade do modelo hidrodinâmico. No nosso caso, utilizou-se dados de observações oceanográficas e meteorológicas realizadas próximas ao FL.

1.4.1 Domínio de modelagem e malha

Na confecção da malha utilizou-se um software próprio para confecção de malhas com elementos finitos chamado Argus ONE Student®, o qual exporta a malha em um formato reconhecido pelo SisBaHia. A opção de malha utilizada foi de uma composta por elementos do tipo *quadmesh*. Estes elementos são quadrangulares, com 4 nós (um em cada vértice), porém quando a malha é importada pelo SisBaHia, estes elementos ficam com nove nós dispostos como mostra a figura 3.

Figura 3 – Exemplo da distribuição de 9 nós do elemento quadrangular. Os números em azul indicam o número dos nós na malha, enquanto que a numeração em preto a localização dos nós nos elementos quadrangulares.



Fonte: Rosman (2015).

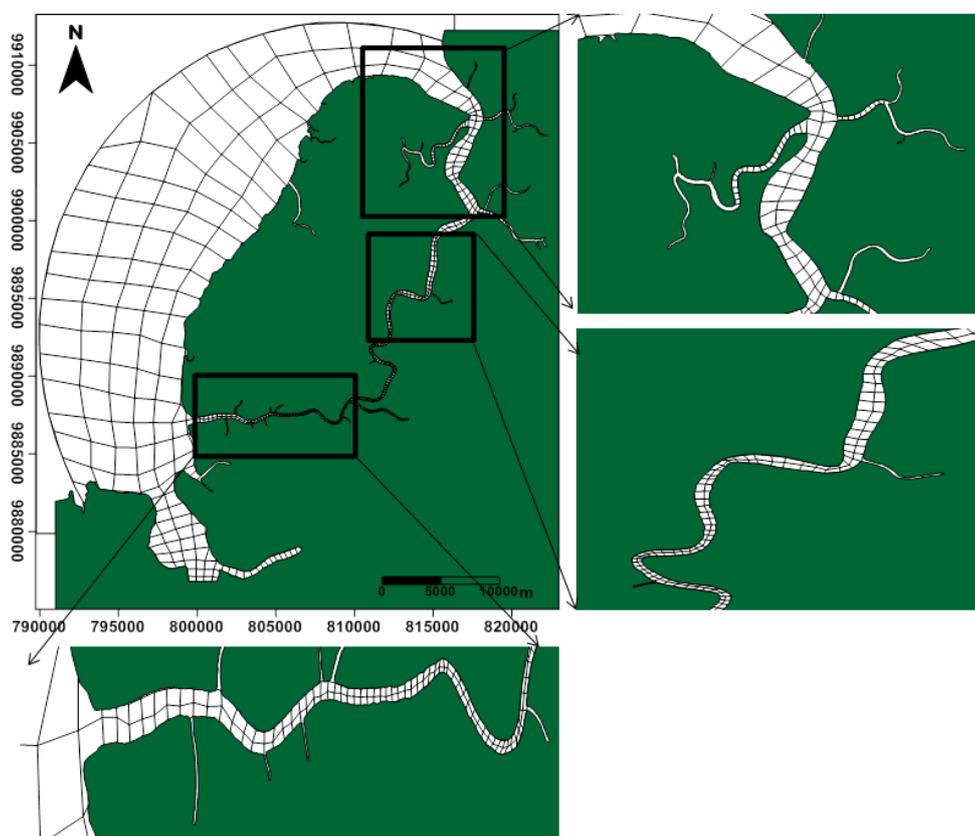
A malha confeccionada é composta por 623 elementos com 3112 nós, sendo 1872 nós internos, 1193 nós de contorno de terra e 49 de contorno aberto e 2 nós híbridos sendo de contorno de terra e aberto, cobrindo uma área de aproximadamente $375,65 \times 10^3 \text{ km}^2$ (tabela 1). O limite do domínio de água modelado é estabelecido através da fronteira aberta, a qual dista em média 8 km da ilha de Colares. O FL é a região de maior interesse dentro do modelo, por isso

foi necessário um refinamento maior da malha nessa região, visando obter maior estabilidade numérica (figura 4).

Tabela 1 – Informações sobre a malha de elementos quadrangulares utilizada na área de estudo.

Número de elementos	623
Número de nós	3112
Área total da malha (km²)	375657,33

Figura 4 – Malha confeccionada para discretização da área.



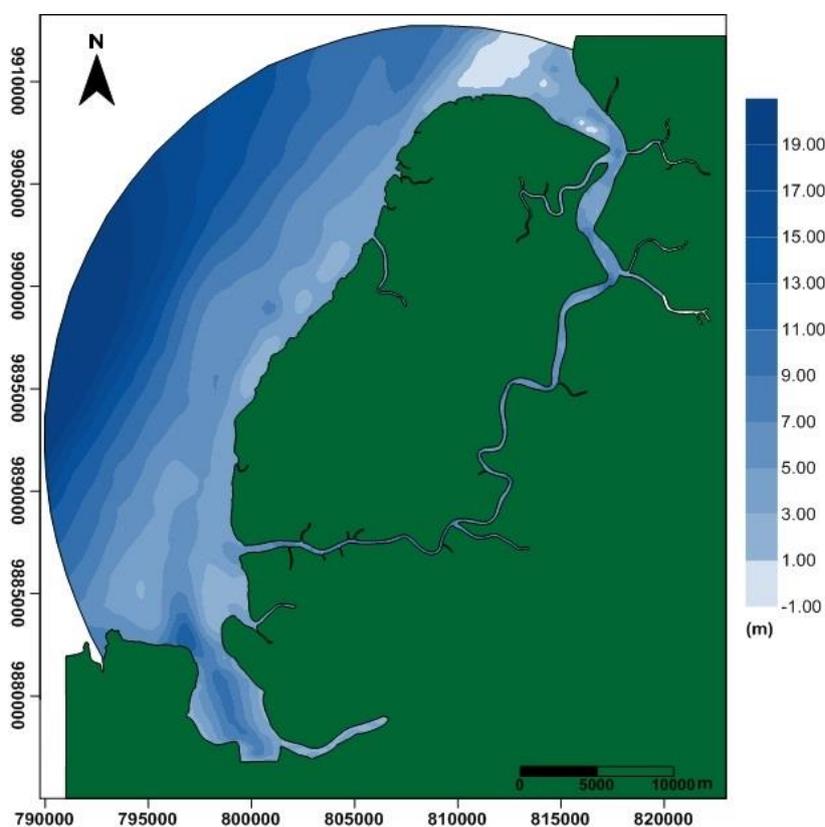
Fonte: Autor.

1.4.2 Batimetria

A batimetria do FL inserida foi obtida do banco de dados do laboratório de Geofísica Marinha da Universidade Federal do Pará (GEOFMAR) coletados em 2014 utilizando uma EcoSSonda Garmin GPSmap 421s 50/200 kHz, onde foram coletadas 152 Km de malha batimétrica, com perfis espaçados de 200 m (FERNANDES, 2014), enquanto que a batimetria da baía do Marajó foi

digitalizada da carta náutica n° 300 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Após a integralização dos dados de batimetria, gerou-se um mapa batimétrico (figura 5) através da interpolação *kriging*, que consiste em uma média ponderada de valores conhecidos em determinadas posições espaciais, para estimar um valor desconhecido em uma determinada posição (BOHLING, 2005). Ajustes na batimetria foram feitos para melhor propagação da onda no FL, esses ajustes serão discutidos no tópico relacionado à calibração do modelo.

Figura 5 – Mapa batimétrico da área de estudo.



Fonte: Autor.

1.4.3 Rugosidade do fundo

A rugosidade do fundo é caracterizada pela variável amplitude da rugosidade (ϵ), que é definida de acordo com o tipo sedimentar de leito. A rugosidade influencia diretamente nos termos de atrito os quais agem de forma a dissipar a energia da onda. Os fundos podem ser classificados como: leito de sedimentos com rugas e similares, fundo de pedra ou rochoso e fundo de concreto, cada um

desses tipos possuem ainda subdivisões, conforme apresentado na tabela 2, extraída de Rosman (2015).

Tabela 2 - Valores de rugosidade para diferentes tipos de leito

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltes e finos	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Predominância de areias médias	$0.0100\text{m} < \varepsilon < 0.0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0.0250\text{m} < \varepsilon < 0.0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.0800\text{m}$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1200\text{m}$
Sedimentos com vegetação	$0.0500\text{m} < \varepsilon < 0.1500\text{m}$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500\text{m} < \varepsilon < 0.4000\text{m}$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003\text{m} < \varepsilon < 0.0010\text{m}$
Fundo de pedra lisa	$0.0010\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de asfalto ou similar	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0070\text{m}$
Fundo com pedregulho ($d_{50} < 3\text{ cm}$)	$0.0070\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Fundo com pedras médias ($d_{50} < 8\text{ cm}$)	$0.0150\text{m} < \varepsilon < 0.0400\text{m}$
Fundo com pedras ($d_{50} < 20\text{ cm}$)	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.1000\text{m}$
Fundo com rochas ($d_{50} < 50\text{ cm}$)	$0.1000\text{m} < \varepsilon < 0.2500\text{m}$
Fundo de Concreto:	
Fundo de concreto liso	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0005\text{m}$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005\text{m} < \varepsilon < 0.0030\text{m}$
Fundo de concreto antigo	$0.0030\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$

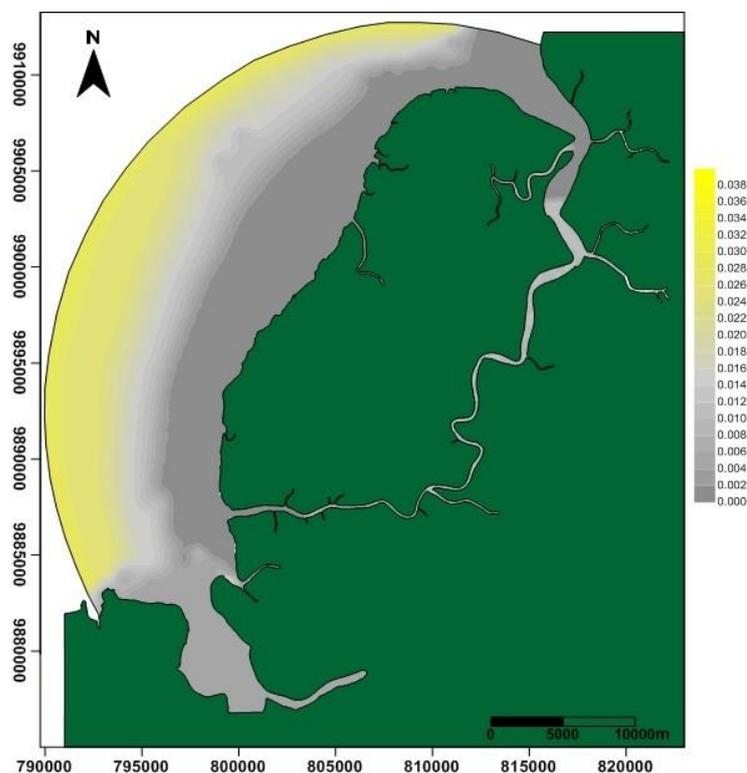
Fonte: Adaptado de Rosman (2015).

Segundo Planave (2005), os sedimentos que ocorrem no fundo do rio Pará são transportados através dos rios Tocantins, Anapu, seus afluentes e pelo próprio rio Pará e são compostos basicamente por silte, argila e matéria orgânica oriunda da decomposição vegetal, o que é um fenômeno bastante conhecido na região. A classe silte e argila predominam por toda margem leste da baía do Marajó preenchendo os canais de maré. Esta classe se distribui em maior área na porção norte do estuário mesmo nas profundidades intermediárias (CORRÊA, 2005). A hidrodinâmica tem uma influência sobre os leitos de quaisquer corpos d'água. Locais onde a hidrodinâmica é intensa tendem a ter leitos de granulometrias maiores e o contrário também é válido. Corrêa (2005) através da análise de amostras de fundo classificou dentro do diagrama de Perjup (1988) a sedimentação na baía do Marajó e inferiu sua hidrodinâmica. Corrêa (2005) mostrou que há uma gradação de sedimentos silto-argilosos na porção leste da

baía do Marajó (próximo à ilha de Colares) para sedimentos na fração de areias médias a grossas, na porção oeste (próximo à ilha do Marajó) e que a fração silte ocupa o fundo de canais principalmente na saída de rios como o rio St. Antônio (que termina na baía do sol) e o próprio rio Guajara-Mirin (Furo da Laura).

Assim, utilizando os valores de rugosidade da tabela 2 e fazendo uma interpolação com o método kriging no software Surfer 11, gerou-se um mapa de distribuição de rugosidade do fundo, sendo que os valores de rugosidade na parte mais central do FL foram assumidos como constantes e igual a 0,001 devido à falta de informação para esta área, enquanto que nas 2 entradas usou-se o valor de 0,0001 (figura 6).

Figura 6 – Mapa de distribuição da rugosidade do fundo



Fonte: Autor.

1.4.4 Condições de maré no contorno

As constantes harmônicas (tabela 3) para a área de estudo foram obtidas através da análise harmônica feita em uma série temporal de elevação no período de 19/09/2014 à 28/10/2014 que faz parte do banco de dados do laboratório de

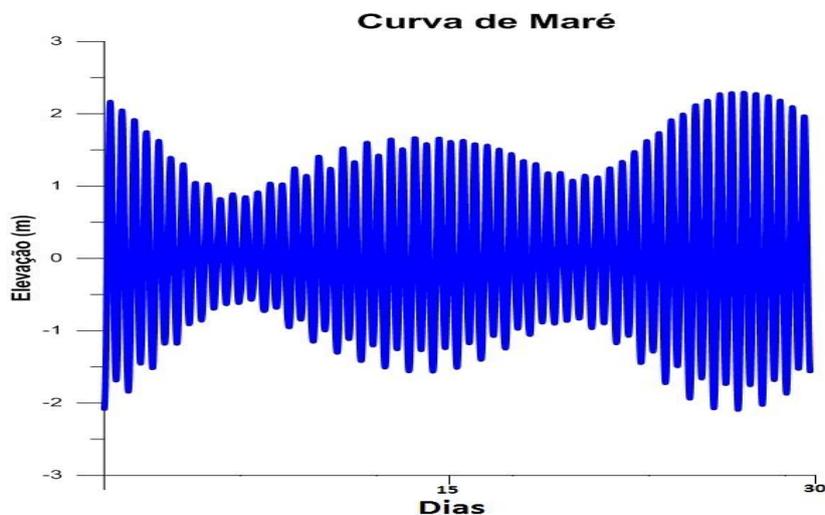
Geofísica Marinha da UFPA (GEOFMAR) sendo a localização da estação de coleta na latitude $00^{\circ}55,0$ S e longitude $48^{\circ} 17,5$ W (em frente à ilha de colares).

Tabela 3 – Constantes harmônicas de maré para estação em frente à ilha de Colares.

Constantes	Período (h)	Amplitude (m)	Fase (rad)
Mm	661,3093	0,0203	0,5934
Msf	354,3671	0,0326	5,5326
Q1	26,8684	0,0170	2,9670
O1	25,8193	0,0932	4,6251
M1	24,8332	0,026	2,9496
P1	24,06	0,0348	5,2010
K1	23,9345	0,1051	5,2010
J1	23,0985	0,0007	4,0666
OO1	22,3061	0,0049	4,0142
2N2	12,9	0,0398	3,8048
MU2	12,8718	0,0621	0,3141
N2	12,6583	0,2539	4,2411
NU2	12,62	0,0428	4,2411
M2	12,4206	1,2946	4,6774
L2	12,1916	0,0763	5,7421
T2	12,01	0,0392	5,4279
S2	12	0,4010	5,4279
K2	11,96	0,1110	5,4279
MO3	8,3863	0,0367	1,6057
M3	8,2804	0,0138	4,2062
MK3	8,1771	0,0365	2,0420
MN4	6,2692	0,0431	1,3962
M4	6,2103	0,0723	2,0594
SN4	6,1602	0,0170	5,0090
MS4	6,1033	0,0567	2,7052
Sa	8765,8	0,0309	1,0144
Msm	763,4	0,0012	3,5733
Mf	7382,9	0,0132	6,2375
M6	4,14	0,0328	5,2578
Ssa	4382	0,0509	6,0732

A curva de maré genérica para um mês gerada a partir das constantes harmônicas pode ser observada na figura 7. A maré tem uma amplitude de aproximadamente 4,5 m, caracterizando uma região de macromarés, sendo semidiurna com duas preamares e duas baixa-mares por dia. Os respectivos valores de amplitude e fase das constantes harmônicas são impostos como condição de fronteira aberta do modelo. Sendo as componentes M2 e S2 as mais relevantes.

Figura 7 – Curva de maré genérica para um mês gerada a partir das constantes harmônicas.



Fonte: Autor.

1.4.5 Variáveis meteorológicas

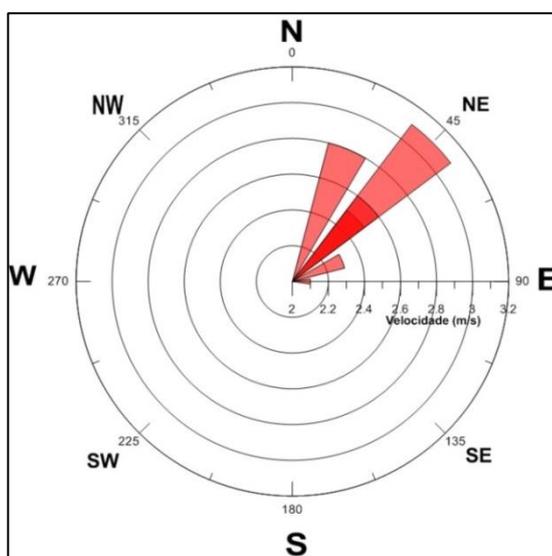
Uma das forçantes responsável pela circulação e mistura nos estuários são os ventos. No caso do FL, onde a descarga fluvial e maré têm níveis elevados, os ventos desempenham um papel secundário nos processos de circulação e mistura, porém é indispensável sua inclusão no modelo, visto que se deseja reproduzir, com precisão, os fenômenos naturais. Por isso, dados de vento e de precipitação nos meses de fevereiro e agosto foram utilizados como dados de entrada do modelo. Este dados foram fornecidos pelo INMET da estação meteorológica de Soure-PA (na margem esquerda do rio Pará, oposta a de ilha de colares).

No mês de fevereiro de 2014, o vento à 10m de altitude, apresentou valores médios de 1,89 m/s e direção preferencial NE (figura 8). No mês de agosto de 2014 o vento teve velocidades médias de 2,9 m/s e direção preferencial ESE (figura 9). Segundo a normal climatológica, a direção predominante na estação em Soure é NE. A dinâmica dos ventos nessa região é influenciada pelos ventos alísios. Os alísios são caracterizados por uma variação sazonal relacionada a migração da Zona de Convergência Inter-tropical (ZCIT) da atmosfera. Quando a ZCIT está localizada próxima ao equador (entre março e abril) a plataforma está submetida à ação dos ventos alísios de nordeste. Quando

a ZCIT migra para o norte ($\sim 5^\circ$ N), durante agosto e setembro, a região está sob a influência predominante dos alísios de sudeste (FONTES, 2000).

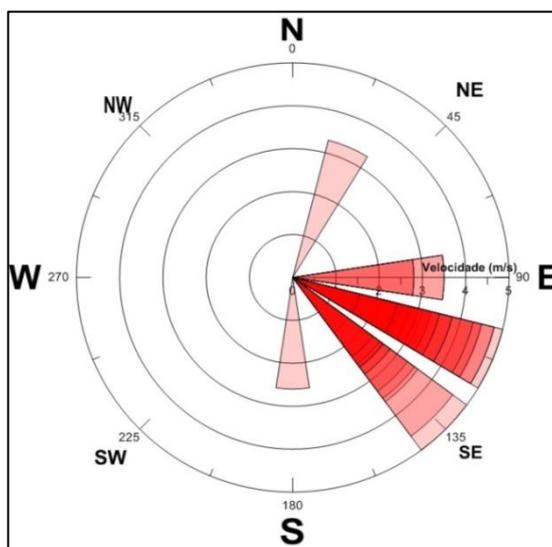
O SisBaHia oferece a opção de modelar o vento e a precipitação de forma variável ou uniforme, tanto no tempo quanto no espaço. Neste trabalho adotaram-se os ventos e a precipitação como sendo variáveis no tempo e uniforme no espaço. Os dados de vento estão em um intervalo de tempo de 12 horas, enquanto a precipitação é diária, sendo inserida no SisBaHia em milímetro/hora.

Figura 8 – Intensidade e direção dos ventos no mês de fevereiro



Fonte: Autor.

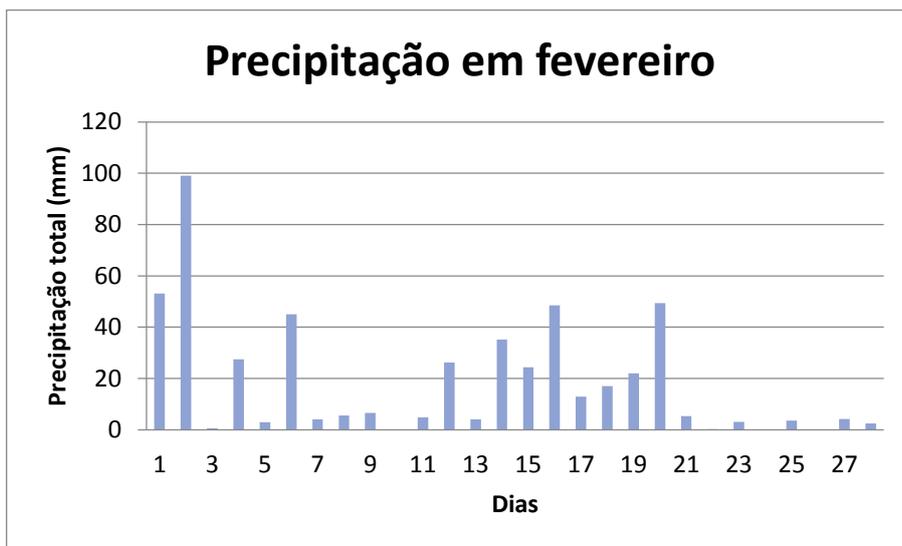
Figura 9 – Intensidade e direção dos ventos nos mês de agosto.



Fonte: Autor.

A precipitação mensal total influencia os níveis de água do modelo que pode alterar o conjunto solução do modelo hidrodinâmico (U , V , ξ). A precipitação total nos meses de fevereiro e agosto foi de 523 mm e 50 mm, respectivamente. A distribuição dessas chuvas durante o mês pode ser observada na figura 10 e 11.

Figura 10 – Precipitação total na estação de Soure do INMET no mês de fevereiro.



Fonte: Autor.

Figura 11 – Precipitação total na estação de Soure do INMET no mês de agosto.



Fonte: Autor.

1.4.6 Transporte de volume na baía do Sol

A baía do Sol, apesar de não ser o foco principal desse trabalho, está inserida no domínio de modelagem, estando na fronteira de terra ao sul do domínio modelado. Para uma compreensão correta dos fenômenos que ocorrem no FL, é fundamental a contribuição (em termos de transporte) da baía do sol. Visto que a fronteira de terra ao sul do modelo está de fato seccionando o rio que deságua na baía do sol (rio St. Antônio), fez-se necessário quantificar esse volume de água trocado entre a baía do Sol e domínio modelado.

Os valores de transporte de volume foram obtidos do banco de dados do laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR) da Universidade Federal do Pará e a metodologia de coleta foi a seguinte: nos meses de abril (período chuvoso) e outubro (período seco) foi feita a coleta de dados de corrente utilizando um Perfilador Acústico por Efeito Doppler (ADCP) da marca Teledyne Workhorse Rio Grande 600 Khz que foi acoplado a embarcação. Todos os dados foram coletados em maré de sizígia. Foram realizados 13 “transects” no período chuvoso, um a cada hora, assim abrangendo um ciclo de maré (MIRANDA, 2002; GENZ, 2010). No período seco, também foram realizados 13 “transects”, iniciando-se sempre na margem direita (M.D) e finalizando na esquerda (M.E) (figura 12). O campo resultante de velocidade e o transporte de volume foi calculado (equação 6 e equação 8), como sugerem (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Figura 12 – Localização do transects (T) e indicação da fronteira do domínio modelado.



Fonte: Modificado de Google Earth (2015).

$$\langle u_{i,j} \rangle = \frac{1}{n} \left[\frac{u_j(Z_i, t_1)}{2} + \frac{u_j(Z_i, t_n)}{2} \right] \quad (6)$$

Onde,

$u_{i,j}$ → velocidade da corrente horizontal (cm/s)

Z_i → Profundidade adimensional

t → Tempo (h)

n → Número de transects

Os valores de transporte de volume foram computados através da integração do campo de velocidade normal a área do transect, equação (7)

$$Q(t) = \iint u \, dA \quad (7)$$

E o transporte de volume resultante $\langle \bar{Q} \rangle$:

$$\langle \bar{Q} \rangle = \frac{1}{n-1} \left[\frac{Q_1}{2} + \sum_2^{n-1} Q_n + \frac{Q_n}{2} \right] \quad (8)$$

Onde,

$\langle \bar{Q} \rangle \rightarrow$ Transporte (média espacial e temporal)

$Q_n \rightarrow$ Transporte amostral instantâneo

$n \rightarrow$ Número de amostras

O transporte de volume resultante para o período chuvoso (abril) foi de 2952,4 m³/s, sentido baía do Sol – baía do Marajó, enquanto que no período seco (outubro) foi de -2102 m³/s, sentido baía do Marajó – baía do Sol. No período chuvoso, o volume de água está entrando no domínio de modelagem via rio St. Antônio, portanto este volume de água foi inserido na modelagem, na forma de vazão nodal, nos nós da fronteira de terra que seccionam este rio, dividindo-se $\langle \bar{Q} \rangle$ pela largura do transect (T), conferindo um valor de 0,8 m²/s, na tentativa de simular com maior precisão os níveis de água do modelo.

1.4.7 Configurações gerais utilizadas no modelo hidrodinâmico

O FL é um corpo d'água relativamente raso com pouca estratificação salina (FERNANDES, 2014), o que foi decisivo para opção de modelagem 2DH. Neste módulo, optou-se por desconsiderar o termo de gradiente de densidade (termo baroclínico do gradiente de pressão na equação de movimento) e o efeito de Coriolis (termo da equação de movimento proporcional à latitude). Esses termos foram desconsiderados por: 1) Devido a grande vazão fluvial do rio Pará, a cunha salina, os gradientes horizontais de salinidade e a circulação baroclinica ocorrem sobre a plataforma (GABIOUX, 2002), sendo a variação temporal de salinidade no FL no mês de setembro/outubro de 1 a 3,5 PSU (FERNANDES, 2014). 2) o FL localiza-se próximo ao equador, assim o efeito de coriolis é também desprezível.

Escolheu-se como instante inicial da modelagem o tempo 21600s que equivale à primeira preamar da curva de maré genérica. O passo de tempo (Δt) utilizado foi de 24s no período chuvoso e 25s no período seco para maior estabilidade numérica. Para o intervalo de tempo dos resultados, escolheu-se 1 hora, ou seja, foram programados para uma saída a cada uma hora modelada os resultados de (U,V, ξ) onde U é a velocidade longitudinal média na vertical e V a

velocidade transversal média na vertical, conforme a equações dadas em (4) e (5), respectivamente, e ξ a altura da superfície livre. O instante final de modelagem para o mês de fevereiro foi de 2419200s equivalente à 28 dias e para o mês de agosto foi 2592000s equivalente a 30 dias. Como condição de contorno, atribuiu-se para todos os nós da fronteira aberta o valor de elevação de superfície livre igual a 2,21 m, o qual equivale ao pico da preamar, retirada da curva de maré. Os parâmetros podem ser visto na tabela 4.

Tabela 4 – Configurações referentes ao modelo hidrodinâmico

Dados	Período Chuvoso	Período Seco
Instante Inicial (s)	21600	21600
Instante final (s)	2419200	2592000
Passo de tempo (s)	24	25
Vazão nodal (m ² /s)	0,8	0
Velocidade inicial (m/s)	0	0
Elevação inicial (m)	2,21	2,21
Nº de Courant médio	3,8	3,5

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} u(x, y, z, t) dz \quad (4)$$

$$V(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\xi} v(x, y, z, t) dz \quad (5)$$

É necessário também fornecer aos nós de fronteira aberta os valores de ângulo de entrada da água (estimado utilizando uma ferramenta do SisBaHiA® que mede distâncias e também fornece o ângulo dos nós com o eixo x do modelo) e as diferenças de fases para cada nó. A diferença de fase foi calculada, como indica o Manual do usuário do SisBaHiA® (2012), através da distância entre duas estações maregráficas e a diferença entre a fases das componentes M2 nas respectivas estações. Utilizaram-se as de Salinópolis e Cabo Maguari (cujas localização e fase da M2 estão disponíveis no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar), pois estas se encontram mais distantes da entrada do estuário evitando assim defasagens.

A distância entre as estações foi de 134,4 km e a diferença entre as fases da M2 igual a 43° , assim faz-se uma regra de três simples, partindo do período de revolução da M2 que é igual 44714 s tem-se:

$$360^\circ \rightarrow 44714s$$

$$43^\circ \rightarrow \Delta t$$

$$\Delta t = 5340,83 s = 1,48 h$$

Assim a maré demora, aproximadamente, 1h e 29 min para passar do Cabo Maguari até Salinópolis. Para calcular a diferença de fase entre os nós da fronteira aberta, relaciona-se a distância entre as estações com o tempo de atraso da maré.

Distancia entre as estações (134,4 km) → tempo de atraso da maré(5340,83s)

Distancia entre os nós da fronteira aberta → diferença de fase em segundos

1.4.8 Método de alagamento e secamento no SisBaHia.

Os ambientes dominados por mesomarés e macromarés são por vezes muito complexos em termos de troca de água, seja com os corpos d'água adjacente ou com as próprias fronteiras de terra que o circundam, este último ocorre devido às enchentes que causam ou alagamento de áreas ou secamento, muito frequente em locais de mague. Para simular tais fenômenos, o SisBaHia oferece três métodos distintos: Método Poroso–Rugoso (MRP), Método de Meio Poroso (MMP) e Método de Filme Superficial (MFS). Os métodos MPR e MMP são semelhantes devido ao fato de ambos considerarem uma camada de pequena espessura abaixo do fundo onde há escoamento restrito de água. A diferença entre eles está no momento em que cada um dos métodos é ativado no modelo. O escoamento subsuperficial no MRP só ocorre durante o secamento da área (momento em que a espessura da coluna d'água for menor que a espessura da camada de escoamento em meio poroso), enquanto que no MMP o escoamento subsuperficial está sempre ativo. O MFS considera o fundo impermeável, ou seja, sem meio poroso.

O método utilizado neste trabalho foi o MPR, devido sua vantagem em não interferir na celeridade de propagação da onda (ROSMAN, 2015). Na situação de escoamento no meio poroso-rugoso no modelo hidrodinâmico, definem-se o termos E_{PR} (Espessura da camada porosa) e r' (Fator de rugosidade) que neste trabalho foram iguais a 0,5 e 1 respectivamente, além de que o MPR define para cada ponto a cota superior da zona de transição Z_{TS} (ROSMAN, 2015). Estes termos se relacionam conforme a equação (9).

$$Z_{TS} = -h(x, y) + E_{PR} \quad (9)$$

À medida que o modelo entra em meio poroso-rugoso, define-se então uma batimetria com porosidade $h_p(x, y)$ e a amplitude da rugosidade equivalente com porosidade ε_p , assumindo valores diferentes em 3 casos, expostos a seguir:

- 1° Caso: Escoamento em meio fluido: $\xi > Z_{TS}$

$$h_p(x, y) = h(x, y) \quad (10)$$

$$\varepsilon_p(x, y) = \varepsilon(x, y) \quad (11)$$

Neste caso, os valores de batimetria e amplitude da rugosidade não são alterados pela camada equivalente de escoamento em meio poroso.

- 2° Caso: Escoamento em transição: $-h \leq \xi \leq Z_{TS}$

$$h_p(x, y) = -\xi + E_{PR} \quad (12)$$

$$\varepsilon_p(x, y) = \frac{\varepsilon(x, y) - r'E_{PR}}{E_{PR}} (\xi + h) + r'E_{PR} \quad (13)$$

- 3° Caso: Escoamento em meio poroso-rugoso: $\xi < -h$

$$h_p(x, y) = -\xi + E_{PR} \quad (14)$$

$$\varepsilon_p(x, y) = r'E_{PR} \quad (15)$$

1.4.8 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo consiste em encontrar valores, parâmetros e condições de contorno que aproxime os resultados dos valores observados (para maiores detalhes sobre o passo-a-passo da calibração vide Rosman, 2015). Quando o modelo consegue reproduzir as condições naturais observadas em campo, com uma margem de erro tolerável, então este modelo está validado. Segundo Rosman (2015), os passos para a calibração devem passar pela checagem da discretização espacial e temporal utilizada na malha sendo condizentes com a variação temporal e espacial do fenômeno que se deseja estudar. Um modelo tem escalas de discretização compatíveis com um fenômeno de interesse quando pode efetivamente resolver o fenômeno.

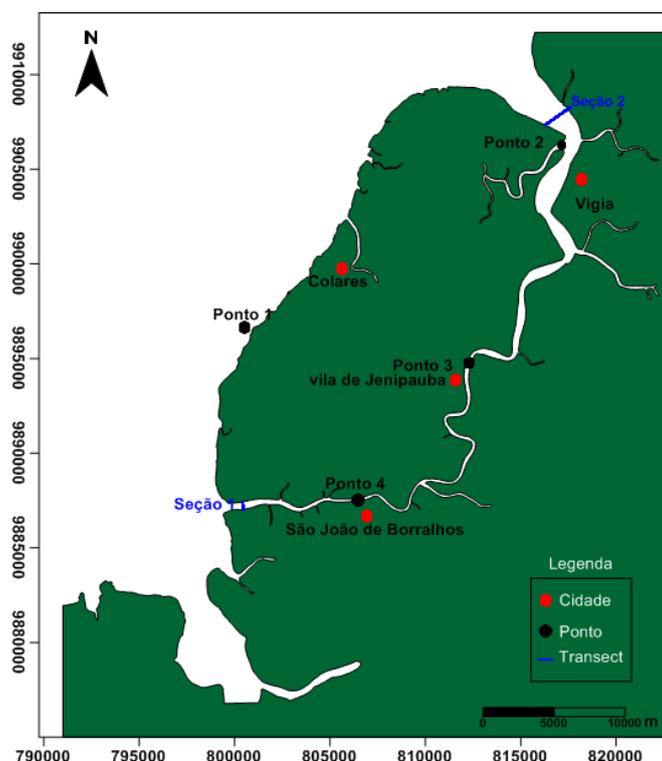
Nesse sentido, deve-se lembrar de que, se um determinado fenômeno de interesse tem escalas espaciais e temporais características dadas por Δs e Δt , para se resolver tal fenômeno, as escalas de discretização do modelo devem ser pelo menos quatro vezes menores ($\Delta s/4$ e $\Delta t/4$) (ROSMAN, 2015). Mais a frente, Rosman (2015) sugere que para resolver bem os fenômenos de interesse, os intervalos de discretização deveriam ser até oito vezes menores que a variação dos fenômenos ($\Delta s/8$ e $\Delta t/8$). Dentro do FL, a distância média dos elementos, ao longo do canal, é de 150m. Um refinamento maior da malha não pode ser feito devido à limitação do software Argus One student que impõe um valor máximo de 2000 nós. O próximo passo é checar a geometria do modelo, isso se refere à forma dos elementos quadrangulares, que no caso devem ser feitos de forma sutil e não grosseira, principalmente em canais sinuosos como o FL e a batimetria utilizada, deve ser de preferência, recente.

A batimetria utilizada neste trabalho data do ano de 2014. Em seguida, os níveis de água devem ser analisados e comparados com os dados reais. No SisBaHiA, caso os passos anteriores forem cuidadosamente obedecidos, respeitando as limitações impostas pelo próprio ambiente natural e operacionais, os erros nos níveis de água ficam em valores de até 5%.

Os dados utilizados para calibrar o modelo, cedidos pelo laboratório GEOFMAR, constam de uma série temporal de altura da superfície livre no período de 19/09/2013 à 28/10/2013 coletados em 4 pontos (3 dentro do FL e 1

fora) e dados de corrente levantados em 2 seções, uma em cada boca do FL (figura 13). Estes foram coletados no mês de fevereiro de 2014 (período chuvoso) e no mês de agosto de 2014 (período seco). Os dados de velocidade longitudinal, velocidade transversal e altura da superfície livre foram comparados estatisticamente com os dados reais. A metodologia mais utilizada para calibrar um modelo computacional é a metodologia de teste e erro (PALACIO, 2002).

Figura 13 – Localização dos pontos de calibração.

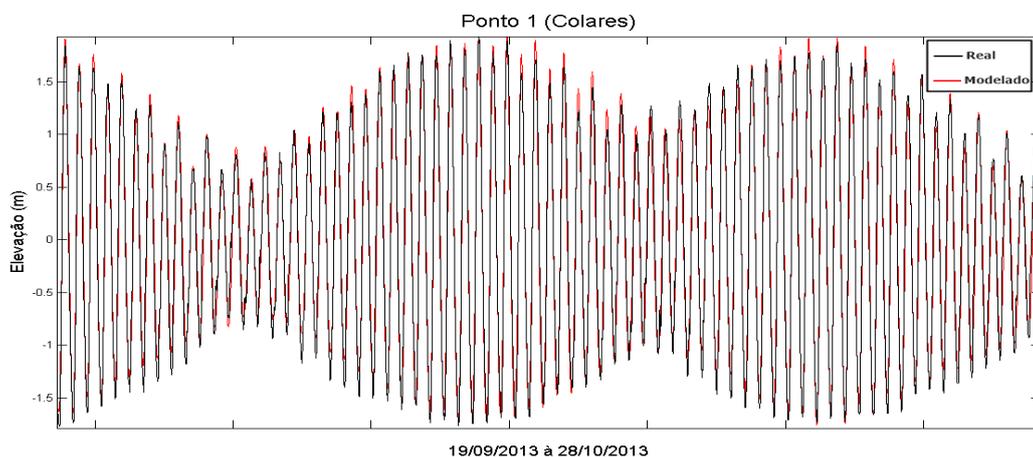


Fonte: Autor.

Na análise dos resultados do modelo deve-se desconsiderar a informação gerada no período de iniciação da rodada, que deve ser suficientemente longo para que o efeito sobre o padrão de fluxo das condições iniciais impostas no domínio do modelo desapareça por completo (SOTO, 2004). Neste trabalho, desconsideraram-se as primeiras 64 horas dos resultados do modelo. Para comparação entre o modelo e os dados reais, valores de média, mínimo e máximo foram analisados. Foi calculado o coeficiente de correlação e o erro quadrático médio (RMS) entre os dados reais e modelados para quantificar a similaridade (tabela 5). Graficamente percebe-se que o modelo representou de

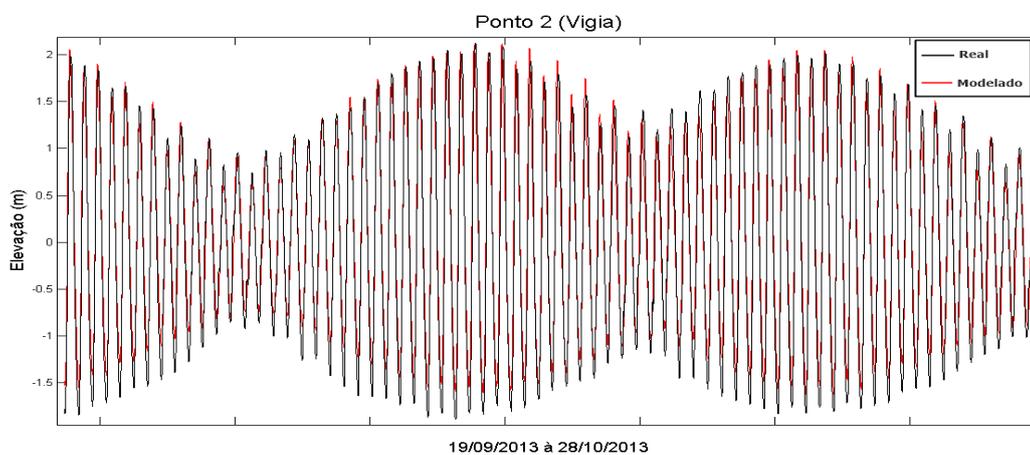
forma eficiente os níveis de água, com uma pequena diferença para os instantes de vazante, onde se secam menos que os dados reais (figuras 14, 15, 16 e 17).

Figura 14 – Comparação no ponto 1 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).



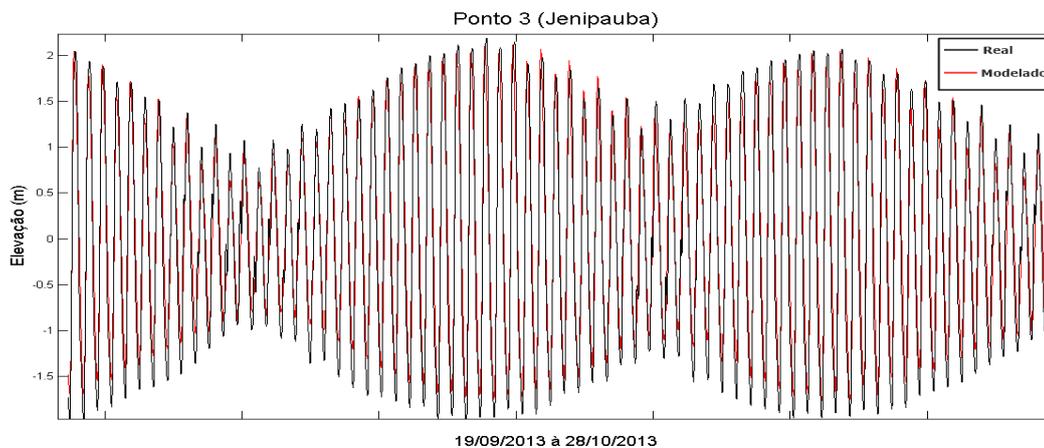
Fonte: Autor.

Figura 65 – Comparação no ponto 2 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).



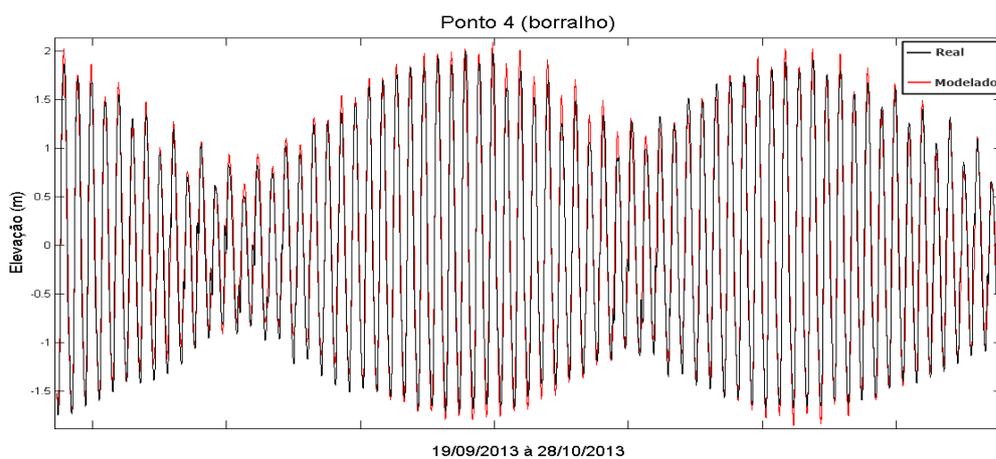
Fonte: Autor.

Figura 16 – Comparação no ponto 3 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).



Fonte: Autor.

Figura 17 – Comparação no ponto 4 entre os dados modelados (vermelho) e reais (preto).



Fonte: Autor.

Tabela 5 – Comparação entre os dados reais e modelados da elevação da superfície.

Pontos	Dado	Elev_Min	Elev_Max	R _o	EQM(%)
Ponto 1	Real	-1,7	1,9	0,9892	4,18
	Modelo	-1,7	1,9		
Ponto 2	Real	-1,8	2,1	0,9809	6,16
	Modelo	-1,6	2,1		
Ponto 3	Real	-1,9	2,1	0,9767	6,82
	Modelo	-1,7	2,1		
Ponto 4	Real	-1,7	2,0	0,9843	5,1
	Modelo	-1,8	2,0		

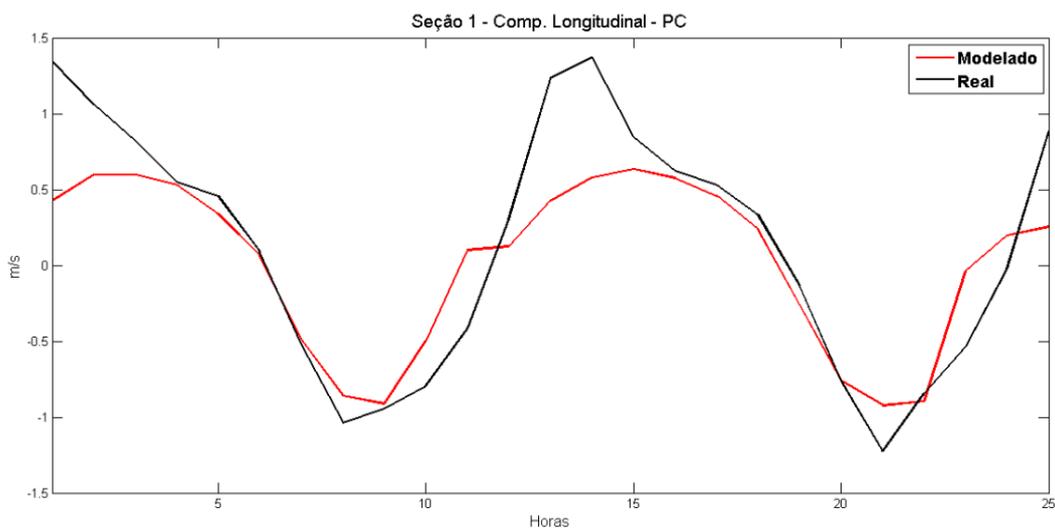
Os pontos 1 e 4 obtiveram os melhores resultados de calibração com valores de 4,18% e 5,1% de erro. Enquanto os pontos 2 e 3, obtiveram percentuais de erro de 6,16% e 6,82%, respectivamente. Calculou-se também a diferença de fase da componente M2 da maré entre os pontos 2 e 4 chegando a uma diferença de 33 min, sendo que Fernandes, 2014, constatou uma diferença de fase de 30 min. Para conseguir tais porcentagens de erro, ajustes na batimetria foram necessários. Afundou-se 2 metros o canal todo do FL e os dois riachos próximos à cidade de vigia, que estavam sem batimetria, foram afundados para a cota de 4 metros. Os nós de contorno de terra da ilha de colares que ficam de frente para a baía do Marajó, também foram postos em cotas de 4 m, pois devido a interpolação, tinham ficado com valores entre 0 e 2 metros de profundidade. A presença de uma pequena ilha, chamada Ilha do Papagaio próximo à desembocadura norte do FL, foi simulada através de valores negativos de batimetria (pois o eixo z cresce da superfície d'água para baixo). De maneira geral, os níveis d'água estão bem representados no modelo, dentro de uma margem de erro tolerável para o SisBaHia. Era esperado que os pontos 2 e 3 tivessem um erro maior, devido o afunilamento do canal e aumento da sinuosidade, representando uma complexa geometria para a propagação da onda.

Os valores de intensidade de corrente foram calibrados a partir de dados coletados no dia 14/02/2014 (período chuvoso) e depois comparados com valores coletados no dia 09/08/2014 (período seco) nas bocas norte e sul do FL (seção 1 e seção 2). Para efetuar esta calibração foi necessária a reorientação do vetor velocidade para coincidir com a orientação longitudinal do canal. Os dados de corrente foram coletados a cada um hora durante 25 horas, em maré de sizígia, com exceção da seção 1 do período seco onde se tem apenas 12 horas de medição, devido a falhas no equipamento no dia da campanha. Valores positivos de velocidade representam valores de vazante (saindo do FL) enquanto que negativos, enchente.

Os valores de velocidade, tanto longitudinal como transversal, mostraram-se seguir a tendência principal das velocidades coletadas, apesar de o modelo não simular com precisão todas as velocidades. Obtendo-se valores melhores no

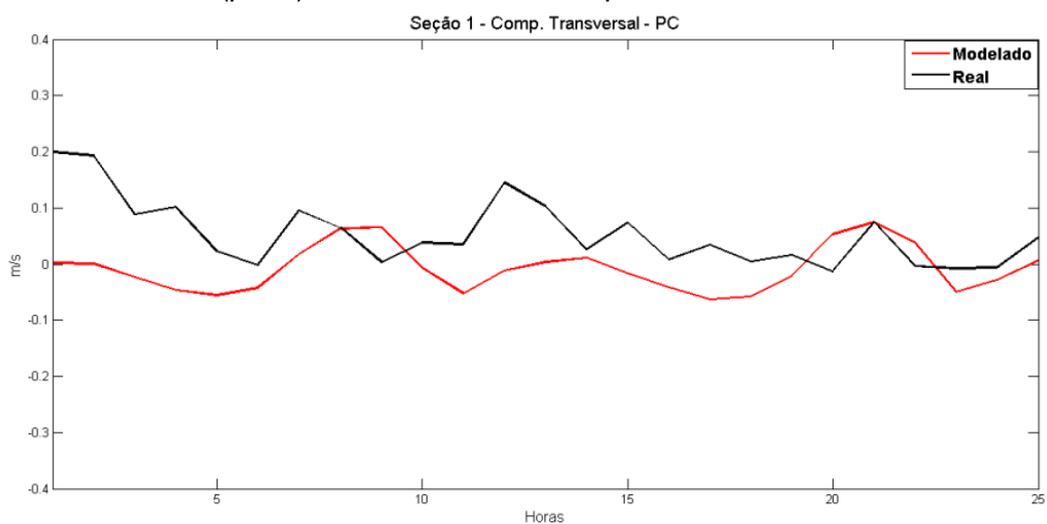
período chuvoso, sendo a componente longitudinal da velocidade mais bem representada do que a componente transversal (tabela 6 e 7). Pode-se observar graficamente que o modelo representou melhor o período chuvoso (figuras 18 a 21) do que o período seco (figuras 22 a 25).

Figura 18 – Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca norte do FL - período chuvoso.



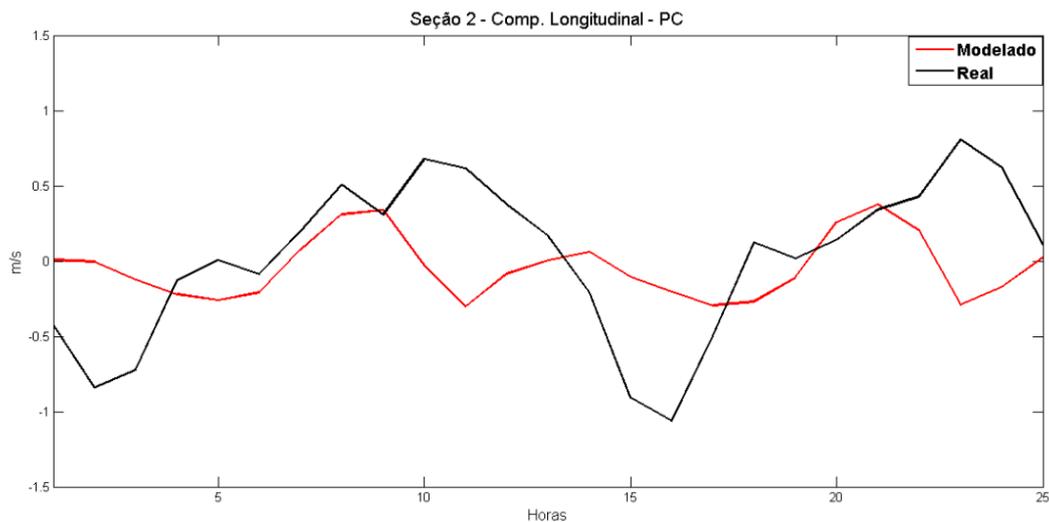
Fonte: Autor.

Figura 19 – Comparação das velocidades transversais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca norte do FL - período chuvoso.



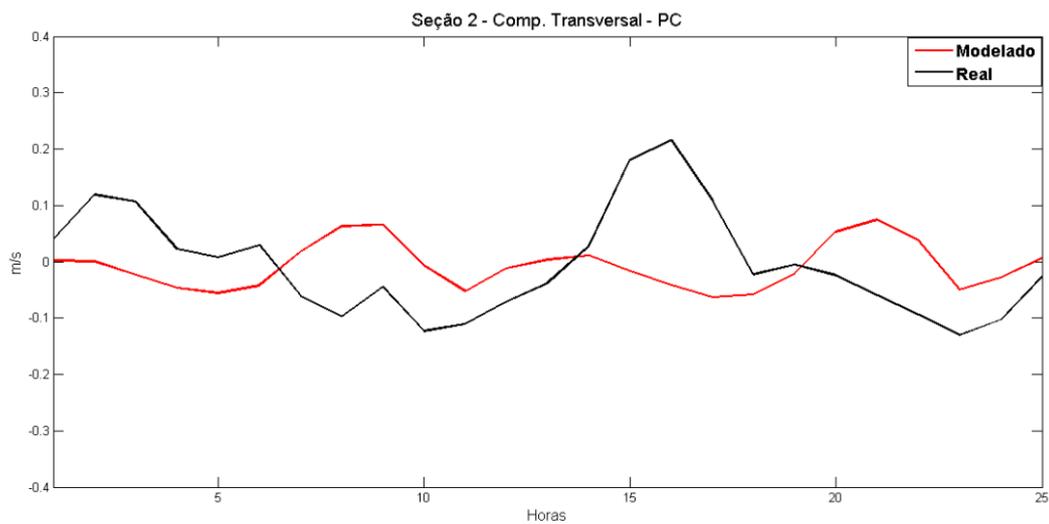
Fonte: Autor.

Figura 20 – Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período chuvoso.



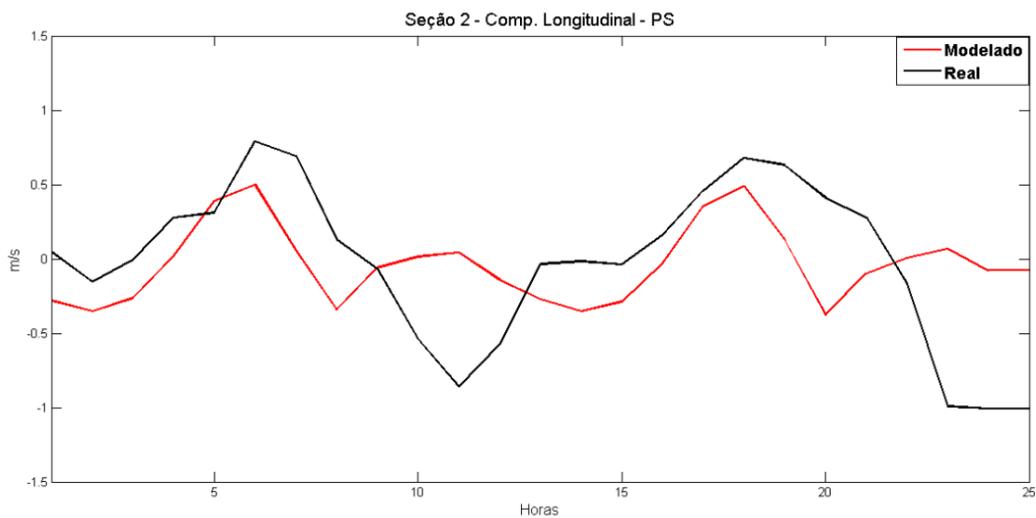
Fonte: Autor.

Figura 21 – Comparação das velocidades transversais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período chuvoso



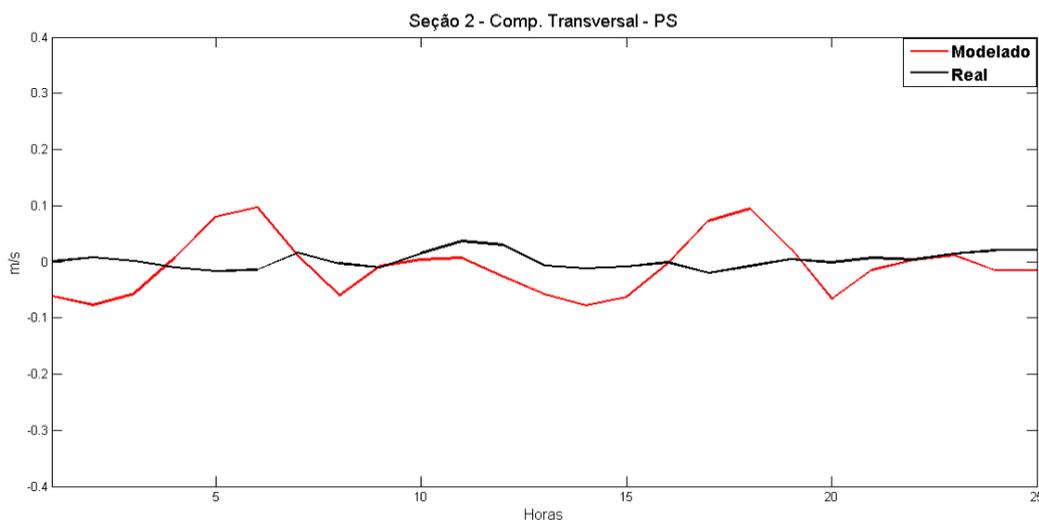
Fonte: Autor.

Figura 22 – Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período seco.



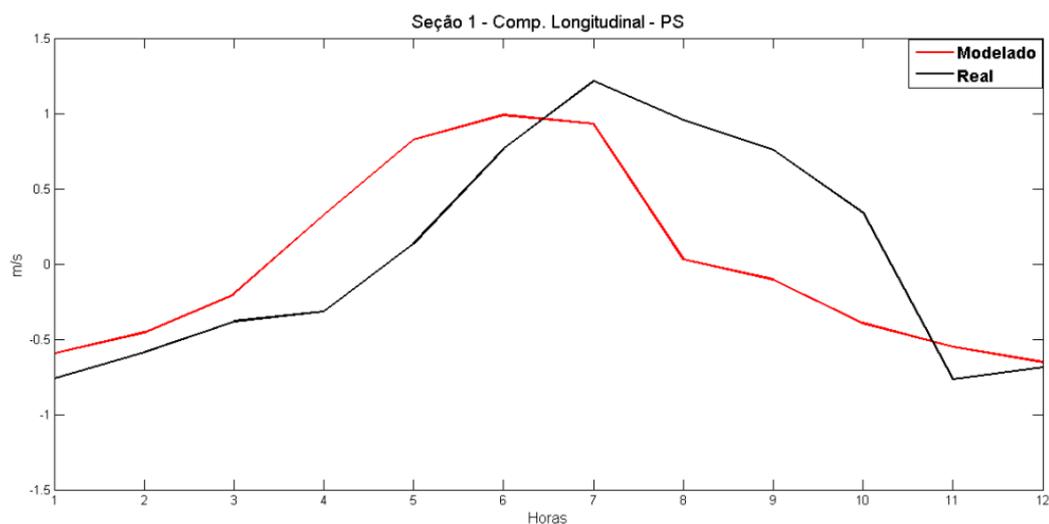
Fonte: Autor.

Figura 23 – Comparação das velocidades transversais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca sul do FL - período seco.



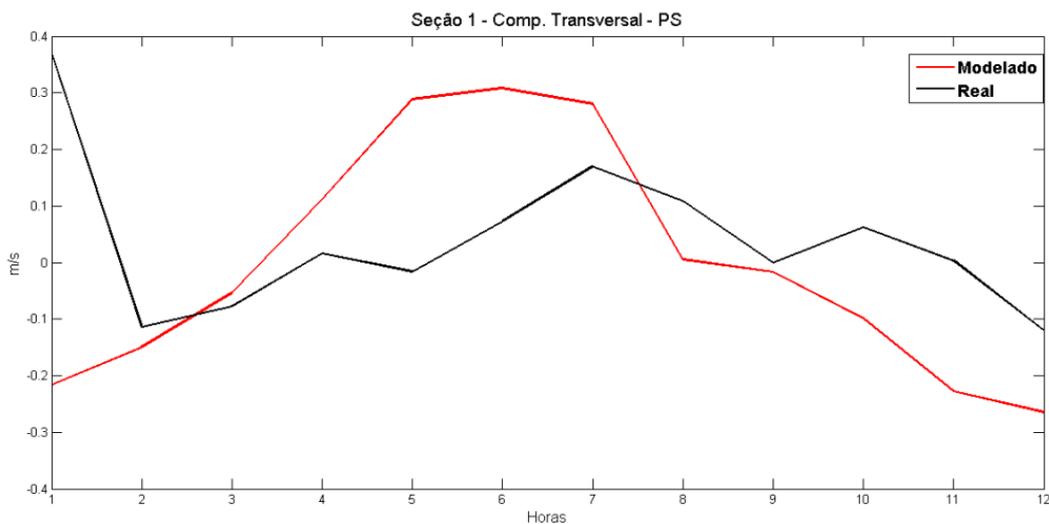
Fonte: Autor.

Figura 24 – Comparação das velocidades longitudinais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca norte do FL - período seco.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Comparação das velocidades transversais modeladas (vermelha) e reais (preto) na boca norte do FL - período seco.



Fonte: Autor.

Tabela 6 – Comparação entre os dados reais e modelados das velocidades nas seções 1 e 2 - Período seco.

Seção	Horário	Dado	U_max (m/s)	U_min (m/s)	EQM (%)	V_max (m/s)	V_min (m/s)	EQM (%)
Seção 1	12h de medição	Real	1,2	-0,76	26	0,37	-0,12	44
		Modelo	0,9	-0,68		0,30	-0,26	
Seção 2	25h de medição	Real	0,78	-1,0	27	0,03	-0,02	100
		Modelo	0,50	-0,37		0,09	-0,07	

Tabela 7 – Comparação entre os dados reais e modelados das velocidades nas seções 1 e 2 - Período chuvoso.

Seção	Horário	Dado	U_max (m/s)	U_min (m/s)	EQM (%)	V_max (m/s)	V_min (m/s)	EQM (%)
Seção 1	25h de medição	Real	1,27	-1,37	14,5	0,19	-0,01	49
		Modelo	0,63	-0,9		0,29	-0,24	
Seção 2	25h de medição	Real	0,8	-1,0	28	0,21	-0,13	29
		Modelo	0,4	-0,3		0,07	-0,06	

Segundo Rosman (2015), se os passos de calibração anteriores forem cuidadosamente executados, os erros no campo de velocidade no SisBaHia seriam de no máximo 20%. Devido às limitações da versão *student do* software Argus One, o qual limita a malha a um valor de 2000 nós, foram colocados apenas 2 elementos por seção do canal no FL. Isto dificultou a representação correta das velocidades transversais. A falta de informação sobre a rugosidade no FL e a presença de bancos de areia são outros fatores que influenciaram negativamente a etapa de calibração. Tendo em vista a complexidade geométrica da área de estudo, visto que há duas conexões com a baía do Marajó, o estreitamento e sinuosidade do canal, o erro obtido nesta modelagem se

aproximou do estimado por Rosman (2015), principalmente nas componentes longitudinais que não ultrapassaram 28%, sendo esta componente a principal para o transporte dentro do FL.

1.4.9 Modelo de transporte lagrangeano

A descrição lagrangeana consiste em identificar certas partículas do fluido e a partir daí observar variações de propriedades tais como temperatura, pressão, velocidade, etc. ao longo do tempo, ou seja, necessita-se conhecer as propriedades das partículas à medida que estas se deslocam no espaço com o passar do tempo (BASTOS, 2010). Esse tipo de modelo tem a vantagem de utilizar o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico, sem estar restrito às eventuais limitações de escala impostas pela grade de discretização do mesmo. Portanto, pode ser eficientemente aplicado a problemas com fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico, ou com fortes gradientes, como se apresenta em muitos casos práticos (ROSMAN, 2015).

Grande parte dos sedimentos transportados pelo rio St. Antônio que adentra a baía do Marajó através da baía do Sol é composto por sedimentos finos, como areia fina e siltes (CORRÊA, 2005), sendo transportados, em grande parte, por suspensão devido à hidrodinâmica da região. Este modelo permite a determinação de tendências de deriva de sedimentos, substâncias dissolvidas ou partículas flutuantes e a determinação de correntes residuais lagrangeanas (CUNHA et al. 2015).

Alguns parâmetros precisam ser estabelecidos antes de rodar o modelo, como instante inicial e final de simulação, passo de tempo, concentração e número de fontes. Foram produzidos cenários onde se lança as partículas na baía do Sol em 4 momentos distintos: Preamar (PM), Vazante (VZ), Baixa-mar (BM) e Enchente (EN), em sizígia (S) e quadratura (Q), alterando assim os instantes iniciais de lançamento para culminar nos diferentes instantes da maré citados acima.

Os parâmetros utilizados nesta simulação são mostrados na tabela 8. Para ter bons resultados no modelo de transporte, é necessária uma boa modelagem da hidrodinâmica (elevação e velocidades), portanto optou-se por gerar cenários

de transporte lagrangeano no período chuvoso, pois obteve melhores resultados de calibração.

Tabela 8– Dados de simulação do modelo transporte lagrangeano.

Dados	PM		VZ		BM		EN	
	S	Q	S	Q	S	Q	S	Q
Inst. inicial (s)	302400	615300	313200	626400	324000	637200	334800	655200
Inst. final (s)	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200
Interv. tempo (s)	24	24	24	24	24	24	24	24
Nº de fontes	1	1	1	1	1	1	1	1
Conc.	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

A partir do modelo calibrado, foram extraídos resultados referentes à localização das zonas de convergência barotrópica, sazonalidade do campo de velocidade e transporte sedimentar na baía do Sol. Estes resultados serão apresentados e discutidos no próximo capítulo, em formato de artigo intitulado “Convergência barotrópica em um canal de maré no estuário Amazônico”.

2 CONVERGÊNCIA BAROTRÓPICA EM UM CANAL DE MARÉ NO ESTUÁRIO AMAZÔNICO

Matheus Lopes¹ e Marcelo Rollnic²

**1Programa de Pós-graduação em Geofísica
Universidade Federal do Pará
mgeofisico@gmail.com**

**2Programa de Pós-graduação em Geofísica
Universidade Federal do Pará
rollnic@ufpa.com.br**

LRL: Lopes e Rollnic

**RRH: Convergência Barotrópica em um canal de maré no estuário
amazônico**

RESUMO

A modelagem hidrodinâmica tem se tornado uma ferramenta cada vez mais utilizada para compreensão da circulação estuarina em diversos lugares no mundo. A utilização de modelos na região norte do Brasil está em caráter experimental. O Furo da Laura (Rio Guajara-mirin) é um ambiente estuarino transicional, localizado no nordeste do estado do Pará, que faz ligação com o oceano adjacente através da Baía do Marajó. Essa região tem grande importância no cenário econômico e social de comunidades ribeirinhas, das cidades vizinhas e da própria capital Belém, por se tratar de uma rota para entrada de insumos pesqueiros. Localiza-se especificamente nas coordenadas UTM 22M, 796169-830035 W e 9880864-9916228 S. Um modelo hidrodinâmico 2DH foi implementado e calibrado através de dados hidrodinâmicos pretéritos. Foi gerado resultados para os períodos chuvoso e seco, correspondendo aos meses de fevereiro e agosto, respectivamente. Os valores gerados pelo modelo 2DH é o conjunto solução das equações de movimento para águas rasas (U , V , ξ). Há ocorrência de convergência barotrópica e sua sazonalidade foi identificada no

interior do furo. Através de uma análise qualitativa feita utilizando o modelo lagrangeano nota-se a tendência de deriva das partículas que foram lançadas na baía do Sol, evidenciando que estas não adentram o furo da Laura, mas são transportadas preferencialmente para a região litorânea da ilha de Colares.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem. Hidrodinâmica. Geofísica marinha. SisBaHia.

INTRODUÇÃO

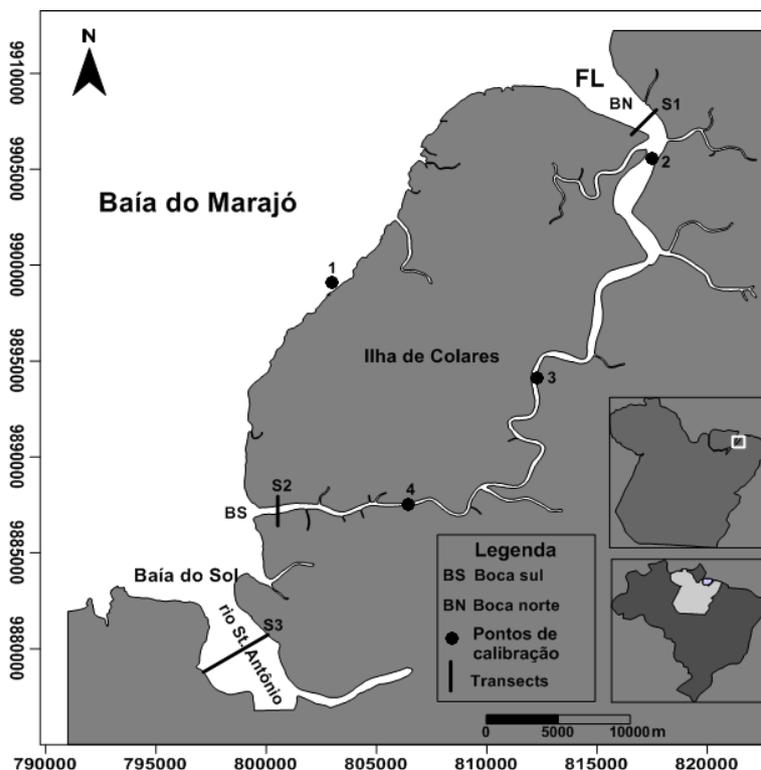
A modelagem numérica hidrodinâmica é uma ferramenta que está sendo cada vez mais utilizada no estudo dos ambientes estuarinos, devido sua potencialidade para corroborar na tomada de decisões em projetos de cunho ambiental, de infraestrutura e engenharia. Na região norte do Brasil, o uso de modelos é recente e está em caráter experimental, todavia mostra resultados satisfatórios como vistos em Gabioux (2002), Galo (2004), Santos (2016), Borba (2014) e Nascimento (2013). Grande parte dos trabalhos de modelagem na região norte é voltada à investigação da hidrodinâmica na plataforma continental amazônica, porém neste trabalho foi gerado um modelo hidrodinâmico barotrópico com o software SisBaHia para o corpo d'água chamado Furo da Laura (rio Guajara-mirin) que localiza-se na zona costeira do estado do Pará, fronteira a ilha de Colares (nordeste do Pará) afim de determinar o local de convergência barotrópica, pois estudos pretéritos sugerem a ocorrência deste fenômeno. Os furos, comportam-se como canais fluviais sob influência das marés, e estas influenciam na sedimentação em virtude da oscilação diária do nível das águas (enchentes e vazantes) (LIMA, TOURINHO, COSTA, 2000). Não constituem rios propriamente ditos, mas porções superiores e internas do estuário, o que é confirmado pelo predomínio de processos fluviais. Além disso, estes canais recebem a descarga de pequenos rios que provêm do continente ou das ilhas (BARBOSA, 2007). Embora a evidente relevância desse estuário no contexto amazônico, há uma carência em termos de pesquisa, fato que reforçou o interesse neste trabalho como também a importância econômica e social do FL para os ribeirinhos, cidades circunvizinhas e para a capital do estado, Belém, visto que é rota para entrada de insumos pesqueiros. A modelagem hidrodinâmica ampliará a compreensão do estuário do rio Pará, cuja importância para

navegação é inquestionável visto ser o acesso aos diversos portos do nordeste Paraense.

ÁREA DE ESTUDO

O Furo da Laura (FL), figura 26, está inserido no estuário do rio Pará de onde provém a maior contribuição fluvial para a baía do Marajó. As coordenadas UTM da área de estudo são: UTM 22M, 796169-830035 W e 9880864-9916228 S. Formado por planícies de maré lamosas e sua típica vegetação de mangue que se estende por cerca de 11 km ao longo do canal do FL, entre os pontos 2 e 4, onde a partir de então, o mangue ocorre de forma isolada pela vegetação aluvial (BARBOSA, 2007). Os rios Pará e Tocantins deságuam nessa região e segundo Latrubes e Stevaux (2002), a área de drenagem do rio Tocantins é de aproximadamente 757.000 Km² e tem uma descarga média anual de 12.000 m³/s.

Figura 26 – Mapa de localização da área de estudo e localização dos pontos amostrais



Fonte: Autor.

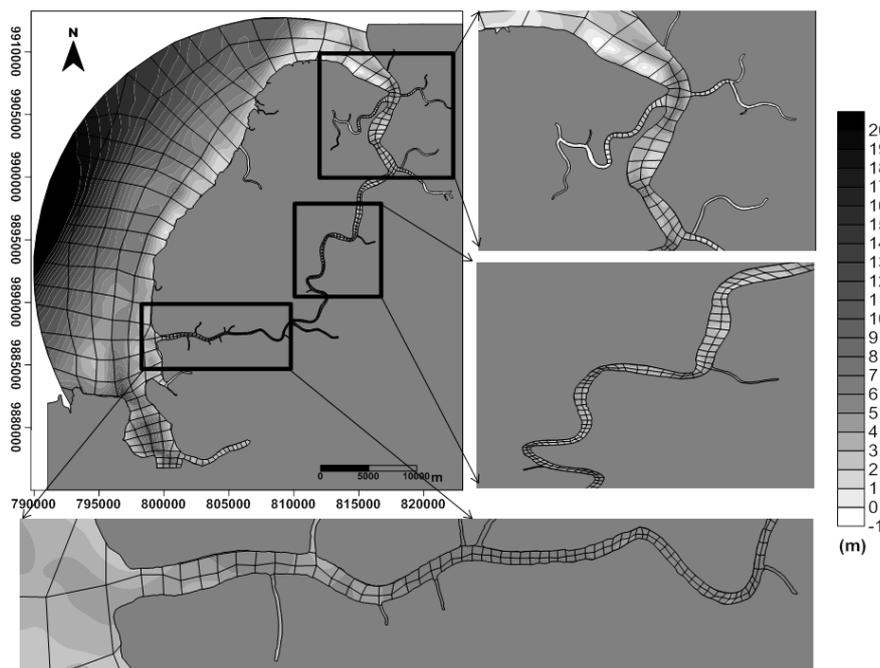
O regime pluviométrico da região de estudo é definido por um período chuvoso (janeiro a junho) e seco (julho a dezembro). O FL está sujeito a macromarés e tem duas conexões com a baía do Marajó, sendo a boca norte cerca de cinco vezes maior em extensão do que a boca sul, fato que contribui para as diferentes velocidades de corrente encontradas nesses trechos por Fernandes (2014), sendo a direção de fluxo igual nas duas bocas, ou seja, as águas entram e saem no FL de maneira simultânea em ambas as bocas. Este fato evidencia que no interior do FL ocorre o fenômeno chamado convergência barotrópica ou “tombo da maré”. De acordo com Warner et al. (2003), essas zonas de convergência (ZC) são importantes pois acumulam substâncias dissolvidas e sedimentos no local da convergência.

MATERIAS E MÉTODOS

Malha e domínio de modelagem

As equações diferenciais parciais (EDP) que regem o escoamento de fluidos não possuem uma solução analítica, devido sua complexidade geométrica, portanto é necessária a utilização de soluções numéricas. A discretização da área de estudo foi feita utilizando o software Argus ONE Student, onde foi gerada uma malha com elementos quadrangulares. Cada elemento é formado por nós (pontos onde o modelo gera a solução das EDP. A malha confeccionada ficou com 623 elementos com 3112 nós, sendo 1872 nós internos, 1193 nós de contorno de terra e 49 de contorno aberto e 2 nós híbridos sendo de contorno de terra e aberto, cobrindo uma área de aproximadamente 375.657 km². O limite do domínio de água modelado é estabelecido através da fronteira aberta, que neste trabalho dista em média 8 km da ilha de colares englobando parte da baía do Marajó. Um refinamento na malha foi dado na região do FL por ser a área de maior interesse. A batimetria do FL foi fornecida ao modelo através do banco de dados do laboratório de Geofísica Marinha da Universidade Federal do Pará (GEOFMAR) e a batimetria da baía do Marajó da carta náutica n°300 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). O mapa batimétrico foi gerado com a interpolação *Kriging*. O mapa com a malha de elementos finitos e a batimetria foi subdividido em três setores para análise das correntes de maré (figura 27).

Figura 77 – Batimetria e malha de elementos finitos



Os valores de rugosidade (ε) utilizados no SisBaHia são tabelados de acordo com Rosman (2015). Para região de estudo o valor de amplitude da rugosidade do fundo foi distribuído de forma a criar uma gradação de argila ($\varepsilon = 0,0003$) a areia média ($\varepsilon = 0,03$) para a região da baía do Marajó, enquanto que dentro do FL e na baía do Sol (onde deságua o rio Santo Antônio) são encontrados sedimentos na faixa de silte ($\varepsilon = 0.01$) como constatou Corrêa (2005).

O software SisBaHia

O modelo utilizado no estudo foi o FIST3D (Filtered in Space and Time) com o software SisBaHia que é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ. A linhagem FIST representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*) (ROSMAN, 2015). São utilizados elementos finitos para discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. Os esquemas numéricos implícitos utilizados permitem o emprego de

passos de tempo relativamente grandes, se as equações fossem lineares o esquema seria estável para qualquer passo de tempo, porém devido a não linearidade isso não é garantido (ROSMAN, 2015). Neste trabalho optou-se pelo módulo 2DH devido à profundidade média do canal ser da ordem de 20 vezes menor que suas proporções horizontais e ter uma estratificação salina pouco expressiva (FERNANDES, 2014). No módulo 2DH são resolvidas as equações de conservação de momento e massa para águas rasas integradas na vertical, com pressão hidrostática para o campo de pressão, tendo como solução os valores U , V e ξ que representam a velocidade longitudinal média na coluna d'água, a velocidade transversal média na coluna d'água e a elevação da superfície livre, respectivamente.

Condições iniciais e de contorno

Como condição de contorno aos nós de fronteira aberta foram inseridas as constantes harmônicas de maré obtidas através da análise harmônica de uma série temporal de elevação coletada no período de 19/09/2014 à 28/10/2015 a localização da estação de coleta se encontra na costa litorânea da ilha de Colares, nas coordenadas UTM 22M 801498.121028 W e 9898570.63492 S. Foram 30 constantes harmônicas ao total sendo as principais M2 e S2. As velocidades U e V no instante inicial foram consideradas para todo o domínio de modelagem igual a zero e o valor da altura da superfície livre igual a 2,21 m, que é a amplitude da maré na preamar, retirada da curva de maré genérica gerada pelo modelo. Através dos dados de corrente levantados na baía do Sol (S3), o transporte de volume resultante foi calculados como sugere Miranda, Castro, Kjerfve (2002).

O transporte de volume resultante para o período chuvoso foi de 2952,4 m³/s e para o período seco, -2102 m³/s. O valor positivo do período chuvoso significa que este volume de água está entrando no domínio modelado (sentido baía do sol – baía do Marajó). Assim, esse volume de água foi inserido no modelo na forma de vazão nodal nos nós de fronteira de terra que seccionam o rio St. Antônio que deságua na baía do sol. O valor de $\langle \bar{Q} \rangle$ foi dividido pela largura da seção 3, chegando ao valor de vazão nodal de 0,8 m²/s. O instante inicial da modelagem foi o valor de 21600 s (valor de pico de preamar) e o instante final foi

de 2419200 s para o mês de fevereiro e de 2592000 s para agosto, ambos simulando um mês. O passo de tempo utilizado foi de 24s no período chuvoso e 25s no período seco, pois foram os que melhor se adequaram, conferindo estabilidade e eficiência ao modelo com o número de courant médio em torno de 3,5, que segundo Rosman (2015), é considerado dentro do padrão ideal. Utilizou-se o método poroso-rugoso (MPR) para simulação de regiões alagadas, o qual cria uma camada subsuperficial onde há um escoamento restrito ativado apenas nos instantes de secamento do modelo. As configurações são apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Configurações referentes ao modelo hidrodinâmico

Dados	Período Chuvoso	Período Seco
Instante Inicial (s)	21600	21600
Instante final (s)	2419200	2592000
Passo de tempo (s)	24	25
Vazão nodal (m ³ /s.m)	0,8	0
Velocidade inicial (m/s)	0	0
Elevação inicial (m)	2,21	2,21
Nº de Courant médio	3,8	3,5
Método de Alagamento	MPR	MPR

Variáveis Meteorológicas

Os valores de velocidade do vento, direção do vento e precipitação para os meses de fevereiro e agosto foram fornecidos pelo INMET (Instituto de Meteorologia) da estação de Soure-PA localizada na margem esquerda do rio Pará simétrica a ilha de colares nas coordenadas UTM 22M 776075.065092W e 9910390.07089 S. Em fevereiro o vento apresentou valor médio de 1,89 e valor máximo de 3,6 m/s com direção preferencial NE. No mês de agosto o vento apresentou média de 2,9 com máximo de 5 m/s e direção preferencial ESE. A dinâmica dos ventos nessa região é influenciada pelos ventos alísios, caracterizados por uma variação sazonal relacionada à migração da Zona de Convergência Inter-tropical (ZCIT) da atmosfera. A precipitação no mês de fevereiro foi alta, com taxa média de 40 mm/dia. Em agosto as chuvas foram escassas com taxa média de 1,67 mm/dia.

Calibração do modelo

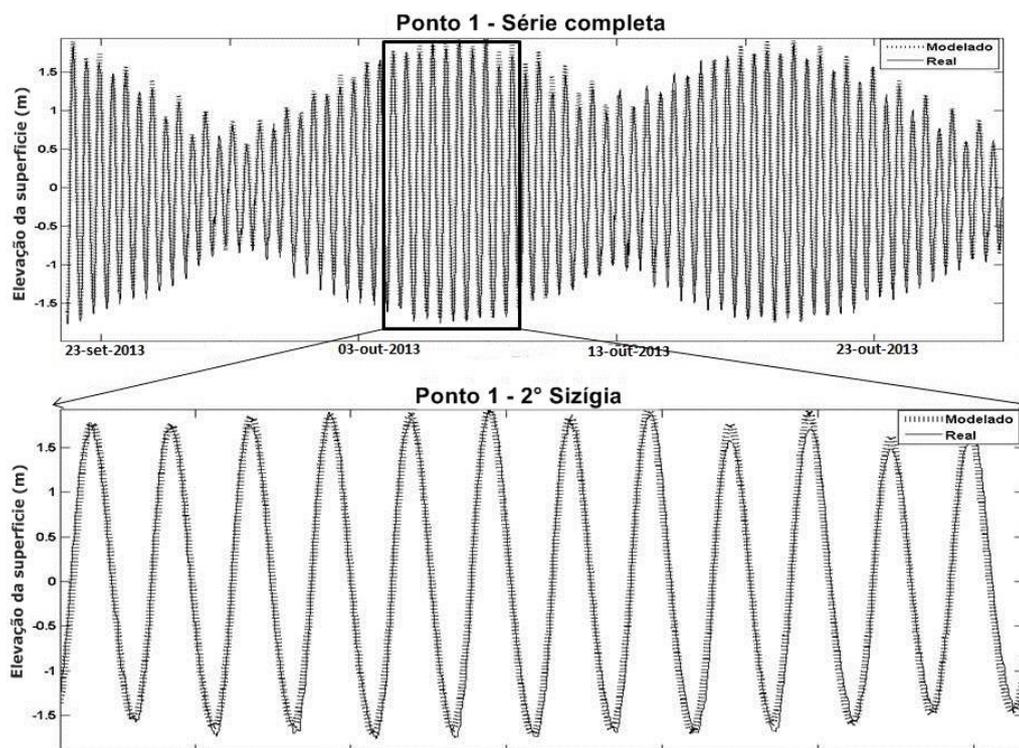
Os dados utilizados para calibrar o modelo consta de uma série de altura da superfície livre no período de 19/09/2013 à 28/10/2013 coletados em 4 estações (pontos 1 a 4) no entorno do FL e de dados de corrente que foram coletados nas seções 1 e 2 nos meses de fevereiro e agosto de 2014, período chuvoso e seco, respectivamente. Os dados de corrente foram obtidos na forma de 25 transects, um a cada hora, utilizando um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) Rio Grande 600 KHz. Devido a falhas no equipamento, no período seco, na seção 1, se tem apenas doze transects de dados. A calibração se deu, através de uma discretização suave dos contornos do canal, fator geométrico relevante para obter bons resultados, seguido da análise dos níveis de água do modelo e após ajustes batimétricos comparou-se graficamente e estatisticamente os erros quadráticos médios e coeficiente de correlação para os 4 pontos de calibração. Após os níveis de água estar compatíveis, passou-se para a calibração das velocidades, ajustando-se o coeficiente de amplitude de rugosidade do fundo. Calibrados os dados do período chuvoso, comparou-se estatisticamente com o período seco. A presença de bancos de areia no FL e falta de informação sobre a rugosidade do fundo dentro do FL dificultou a calibração destas velocidades.

RESULTADOS E DISCUSSOES

Validação do modelo hidrodinâmico

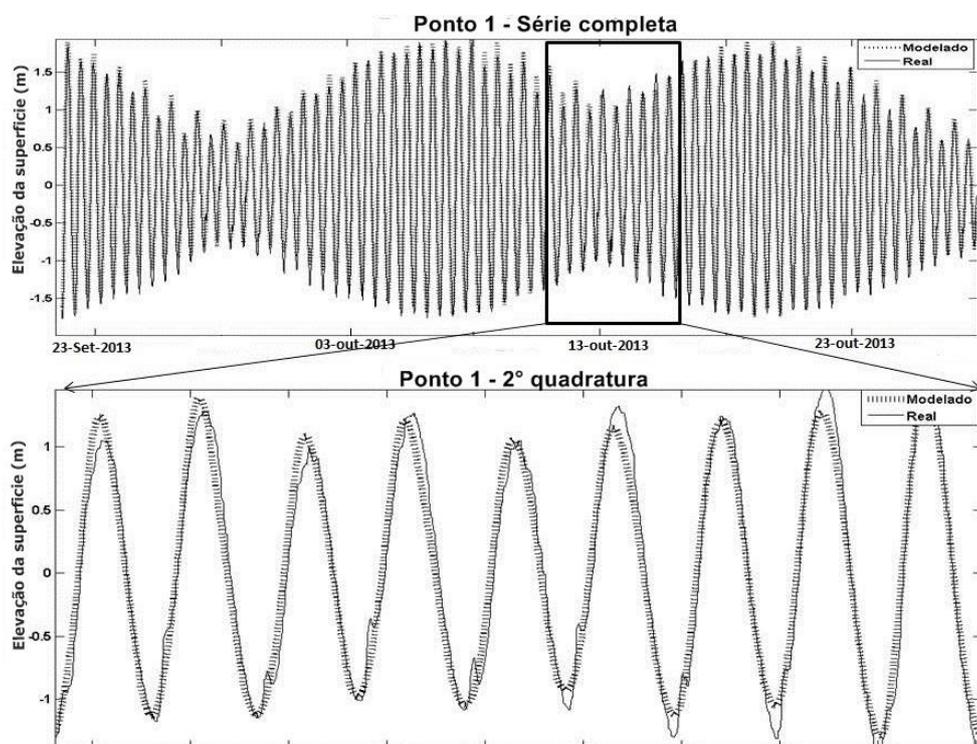
Como resultado da calibração nos pontos 1 e 4 as figuras 28, 29, 30 e 31 mostram em detalhe a comparação da elevação da superfície entre a segunda sizígia modelada e os valores observados em campo; segunda quadratura modelada e observada em campo. Os resultados estatísticos para os quatro pontos mostram que o maior erro quadrático médio foi para o ponto 3 (tabela 10) alcançando o valor de 6,82%.

Figura 28 – Comparação entre dados reais e modelados (Ponto 1). Segunda sizígia



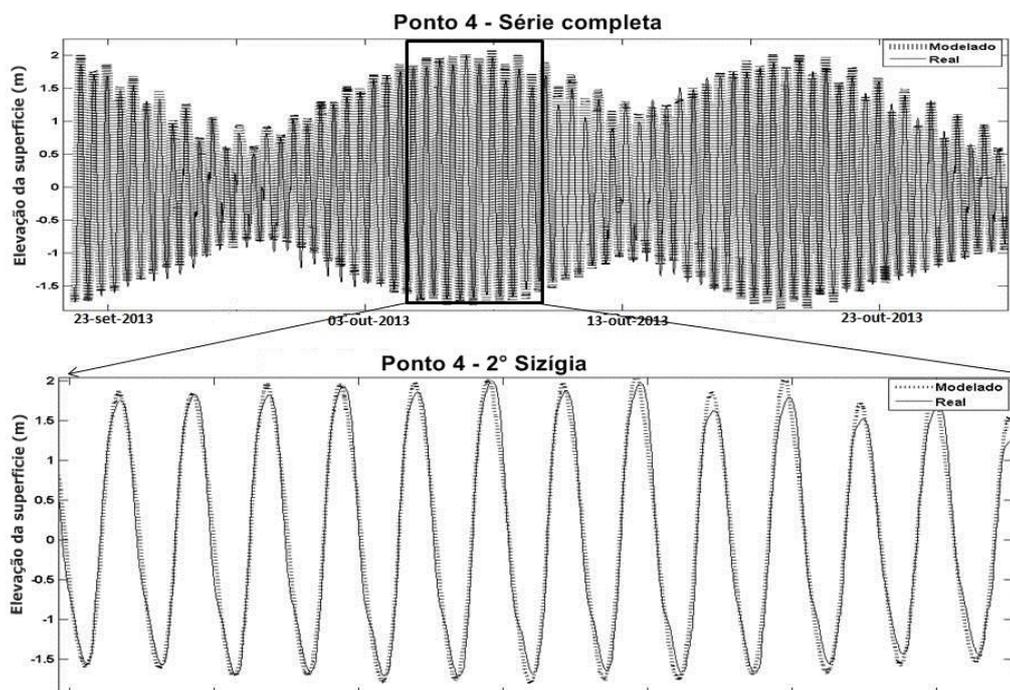
Fonte: Autor.

Figura 29 – Comparação entre dados reais e modelados (Ponto 1). Segunda quadratura.



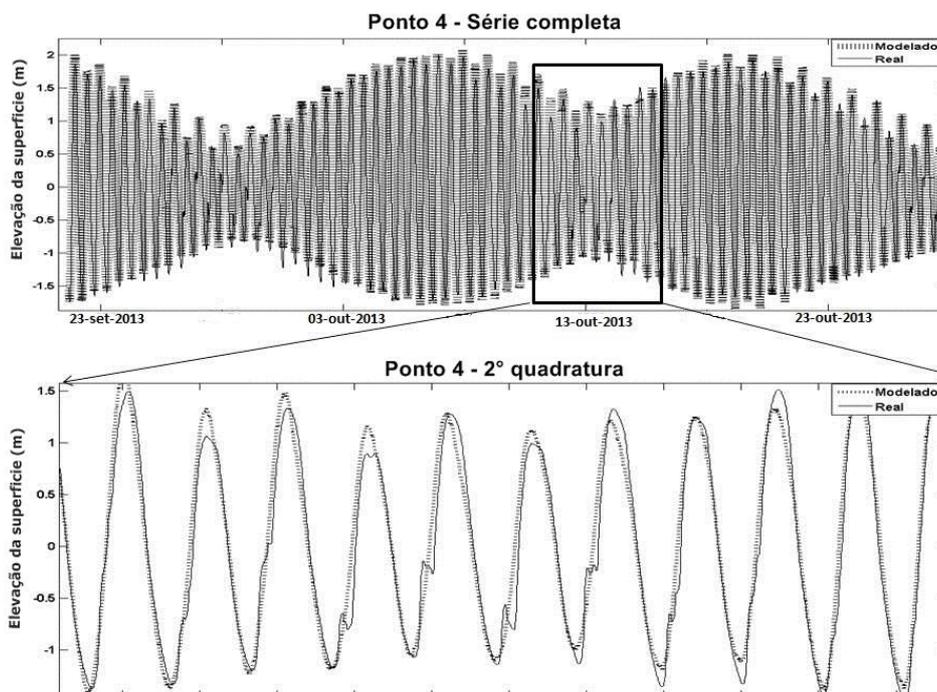
Fonte: Autor.

Figura 30 – Comparação entre dados reais e modelados (Ponto 4). Segunda sizígia



Fonte: Autor.

Figura 31 – Comparação entre dados reais e modelados (Ponto 4). Segunda quadratura.



Fonte: Autor.

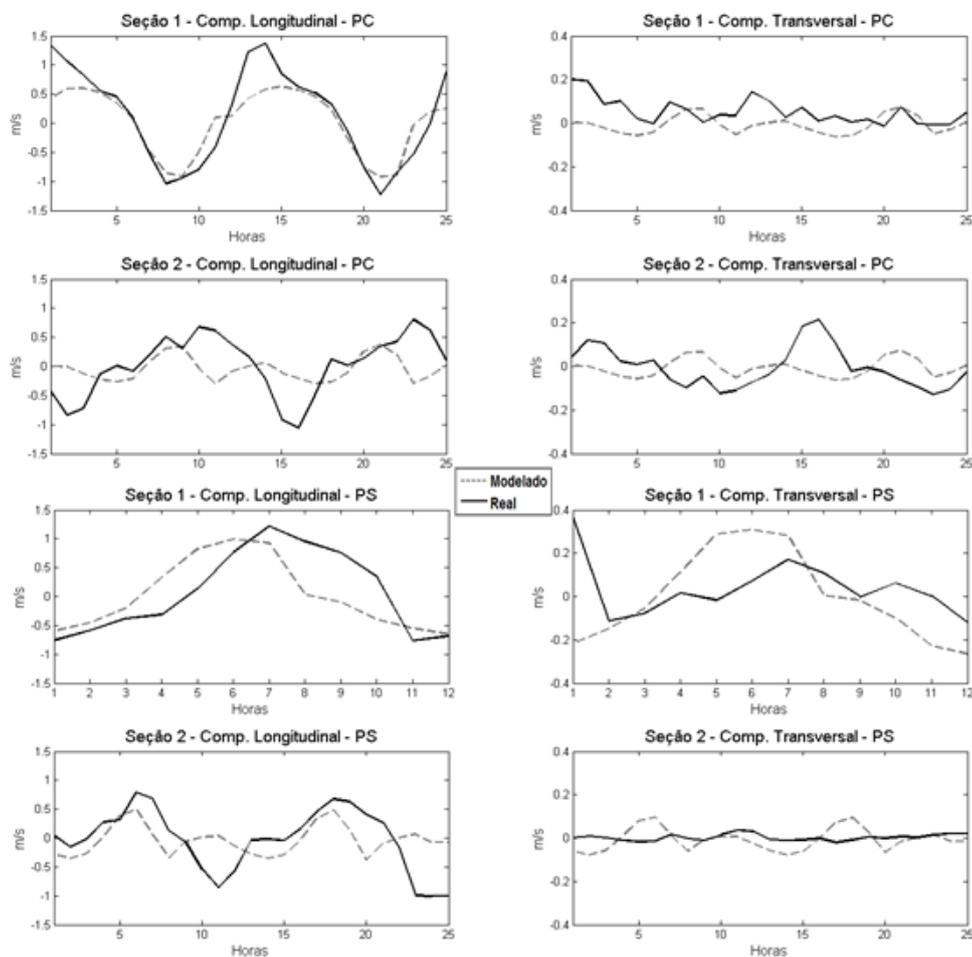
Tabela 10 – Comparação entre os dados reais e modelados nos 4 pontos. Elevação máxima, mínima, coeficiente de correlação e erro quadrático médio.

Pontos	Dado	Elev_Min	Elev_Max	R _o	EQM (%)
Ponto1	Real	-1,7	1,9	0,9892	4,18
	Modelo	-1,7	1,9		
Ponto2	Real	-1,8	2,1	0,9809	6,16
	Modelo	-1,6	2,1		
Ponto3	Real	-1,9	2,1	0,9767	6,82
	Modelo	-1,7	2,1		
Ponto4	Real	-1,7	2,0	0,9843	5,1
	Modelo	-1,8	2,0		

Nos ponto 1 e 4, ainda que haja instantes no qual o nível de água do modelo foi maior que o dado real, no período de sizígia o modelo representou de forma eficaz os níveis de água, entretanto em quadratura, o modelo falha em representar assimetrias evidenciadas por um segundo instante de baixa-mar que é observado. Essa assimetria na onda de co-oscilação da maré pode ocorrer por diversos fatores como: atrito com o fundo, compressão das margens e profundidade do canal estuarino que desenvolve processos não lineares relacionados ao aumento da fricção mais evidentes nos momentos de queda dos níveis da água (NICHOLS; BIGGS, 1985). Há também efeitos não lineares relacionados com a descarga fluvial em sentido contrário ao da propagação da maré (GODIN, 1991).

O ponto 3, sendo o ponto mais interno, sofre maior interferência do estreitamento, compressão das margens e também da vegetação de mangue. Como constatado por Mazda et al. (1995), a vegetação de mangue em planícies de maré acentua a distorção da onda de maré, pois aumenta a resistência ao escoamento, exercendo importante influência sobre esse. A diferença de fase da maré relacionada à componente M2 entre os pontos 2 e 4 foi de 33 minutos, valor semelhante encontrado por Fernandes (2014), o qual calculou uma diferença de fase de 30 minutos para a mesma componente harmônica. As velocidades de corrente foram melhores representadas pelo modelo no período chuvoso (PC) do que no período seco (PS) (figura 32), sendo que os valores positivos de velocidade representam velocidades de vazante, enquanto que os negativos representam enchentes.

Figura 32 – Resultado da calibração e validação das componentes longitudinais e transversais da velocidade no período chuvoso (PC) e seco (PS).



Fonte: Autor.

Na tabela 11, observa-se a comparação estatística. Na seção 2, houve dificuldade para representação das velocidades. A largura do canal, o qual é aproximadamente cinco vezes menor que o canal na seção 1, pode ter sido um fator decisivo para o aumento do erro, assim como a falta de elementos transversais ao canal para prever o escoamento.

Tabela 11 – Comparação entre os dados reais e modelados nas seções 1 e 2 (período chuvoso). Velocidade longitudinal (U) e transversal (V) máxima, mínima e erro quadrático médio.

Seção	Dado	U_max (m/s)	U_min (m/s)	EQM (%)	V_max (m/s)	V_min (m/s)	EQM (%)
Seção 1	Real	1,37	-1,27	14,5	0,19	-0,01	49
	Modelo	0,65	-0,9		0,29	-0,24	
Seção 2	Real	1,0	-0,8	27,69	0,21	-0,13	29
	Modelo	0,4	-0,3		0,07	-0,06	

A comparação estatística para o mês de agosto simulado pelo modelo pode ser vista na tabela 12. Nos dois períodos sazonais simulados, os maiores erros estão relacionados à componente transversal da velocidade. No período seco, o aparecimento de porções secas, dificulta a modelagem hidrodinâmica, porém os erros nas componentes longitudinais não ultrapassaram 28%, sendo esta a componente principal relacionada ao transporte.

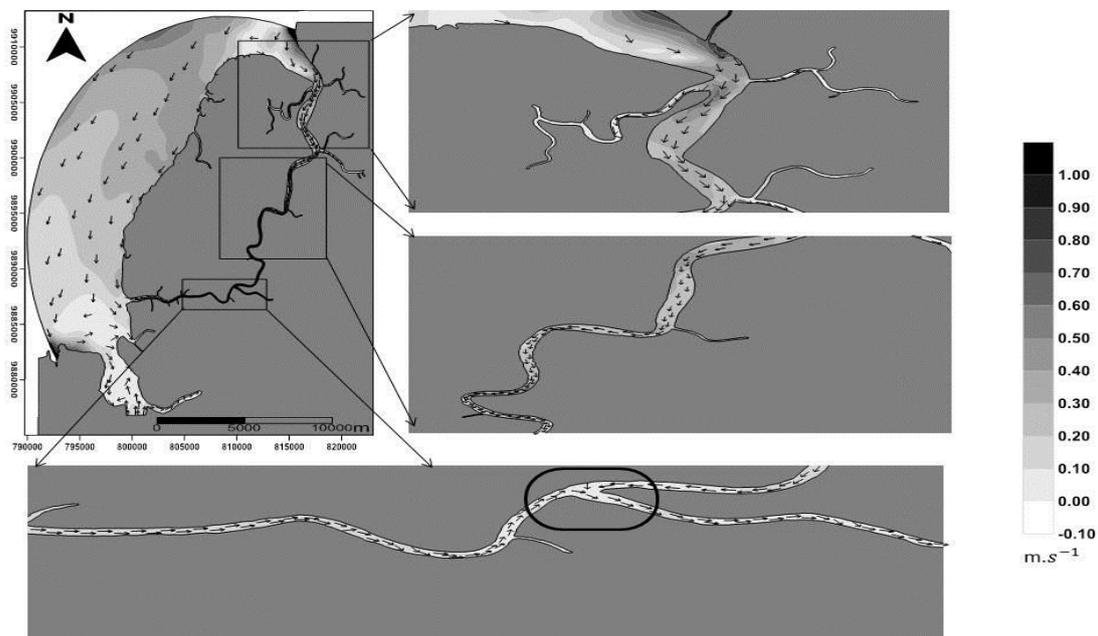
Tabela 12 – Comparação entre os dados reais e modelados nas seções 1 e 2 (período seco). Velocidade longitudinal (U) e transversal (V) máxima, mínima e erro quadrático médio.

Seção	Dado	U_max (m/s)	U_min (m/s)	EQM (%)	V_max (m/s)	V_min (m/s)	EQM (%)
Seção 1	Real	1,2	-0,76	26	0,37	-0,12	44
	Modelo	0,9	-0,68		0,3	-0,26	
Seção 2	Real	0,78	-1,0	27,4	0,03	-0,02	100
	Modelo	0,5	-0,37		0,09	-0,07	

Campo de velocidade no período chuvoso

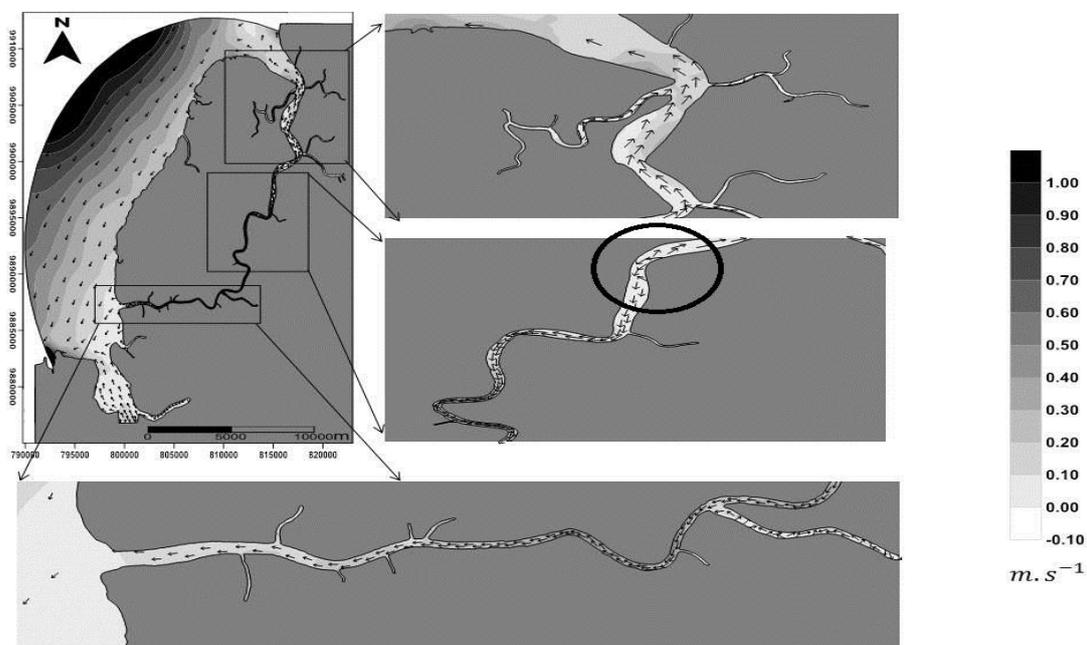
O modelo simulou a entrada e saída concomitantes nas bocas norte (BN) e sul (BS) do FL, como constatado por Fernandes (2014). A ZC foi encontrada no momento de enchente, na sizígia e na quadratura (figura 33) próximo ao ponto 4 de calibração. Constatou-se também varias regiões onde há uma divergência da corrente, ou seja, fluem em sentido oposto ao da convergência. Essa divergência ocorre nos momentos de preamar (figura 34), vazante (figura 35) e baixa-mar (figura 36).

Figura 33 – Campo de velocidade no instante de enchente na quadratura - Período chuvoso. Zona de convergência.



Fonte: Autor.

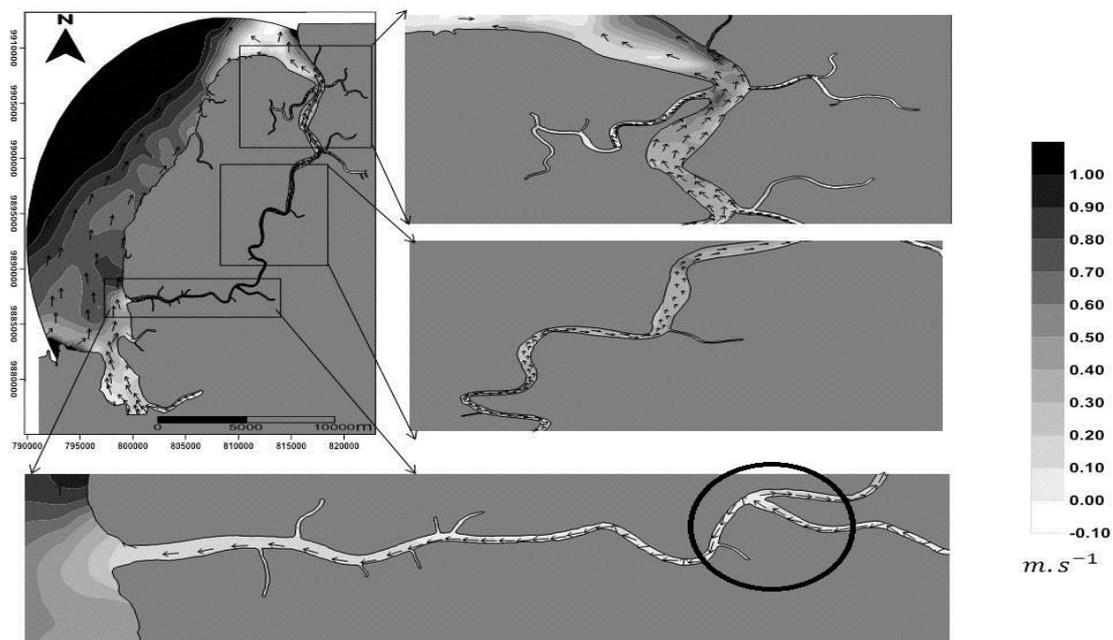
Figura 34 – Campo de velocidade no instante de preamar na sizígia - Período chuvoso. Zona de divergência.



Fonte: Autor.

Figura 35 – Campo de velocidade no instante de vazante na sizígia – Período chuvoso.

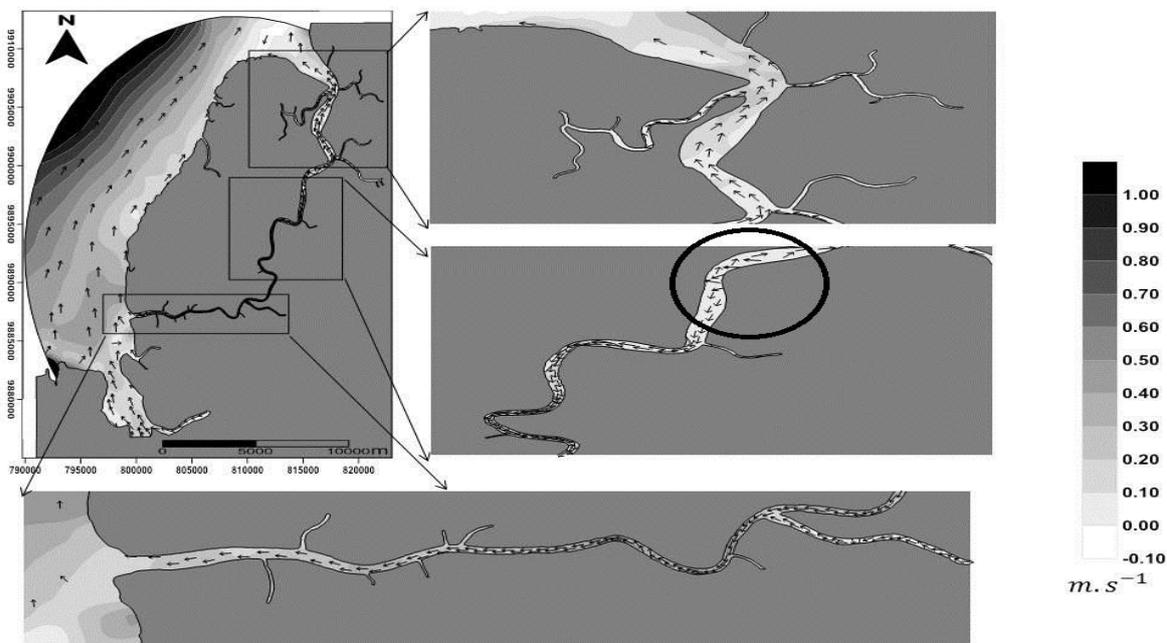
Zona de divergência.



Fonte: Autor.

Figura 36 – Campo de velocidade no instante de baixa-mar na sizígia – Período chuvoso.

Zona de divergência.

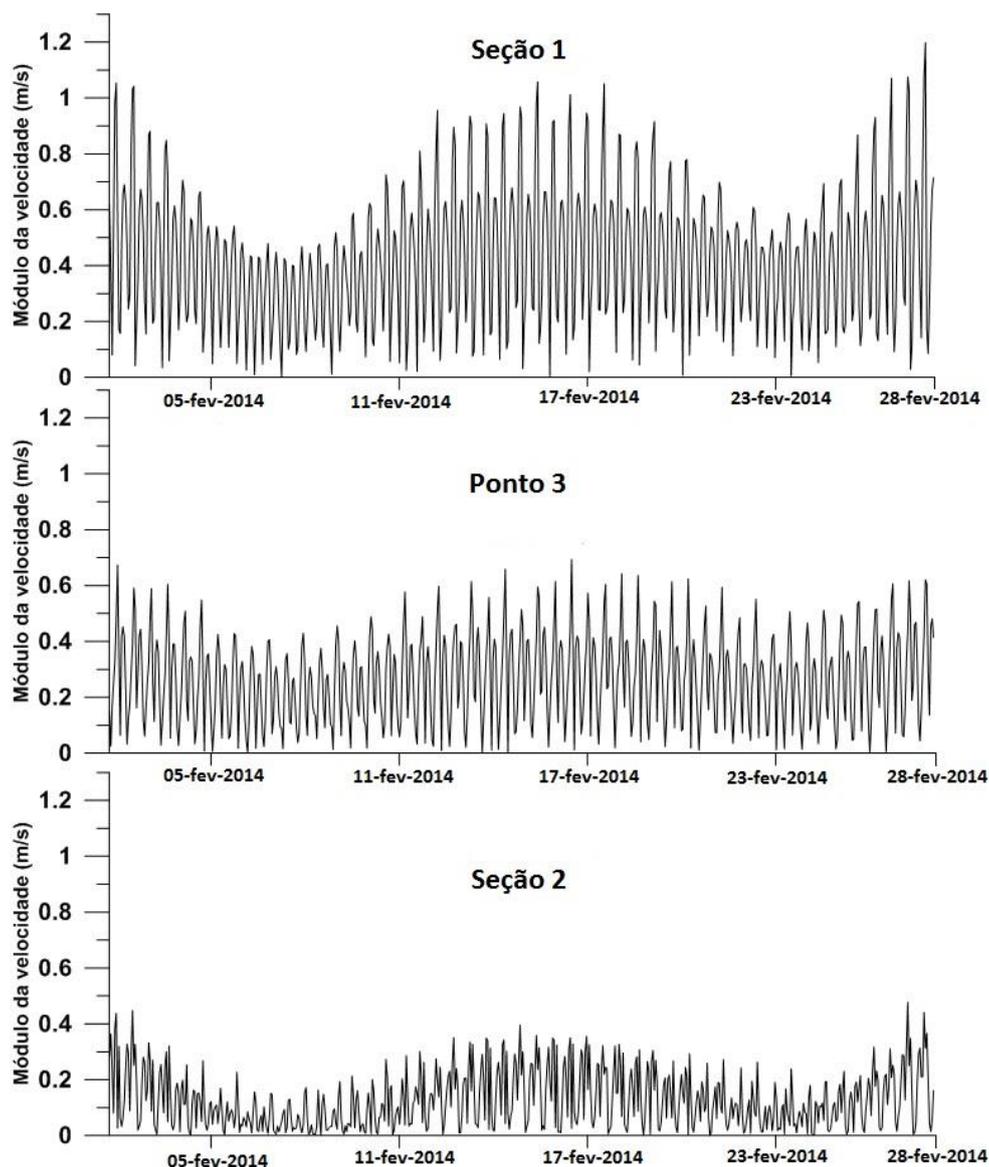


Fonte: Autor.

O módulo da velocidade de corrente decai da BN em direção à BS, quando vista de maneira geral ao longo do mês de simulação. De fato, Fernandes (2014)

constatou que a BN era dinamicamente mais intensa, porém o modelo mostra que no ponto 3, a velocidade de corrente além de ter um módulo com intensidades intermediárias entre as duas bocas, sofre menor influência da variação da maré, mostrando uma tendência menos oscilante (figura 37).

Figura 37 – Variação temporal do módulo da velocidade na seção 1, ponto 3 e seção 2 - Período chuvoso.



Fonte: Autor.

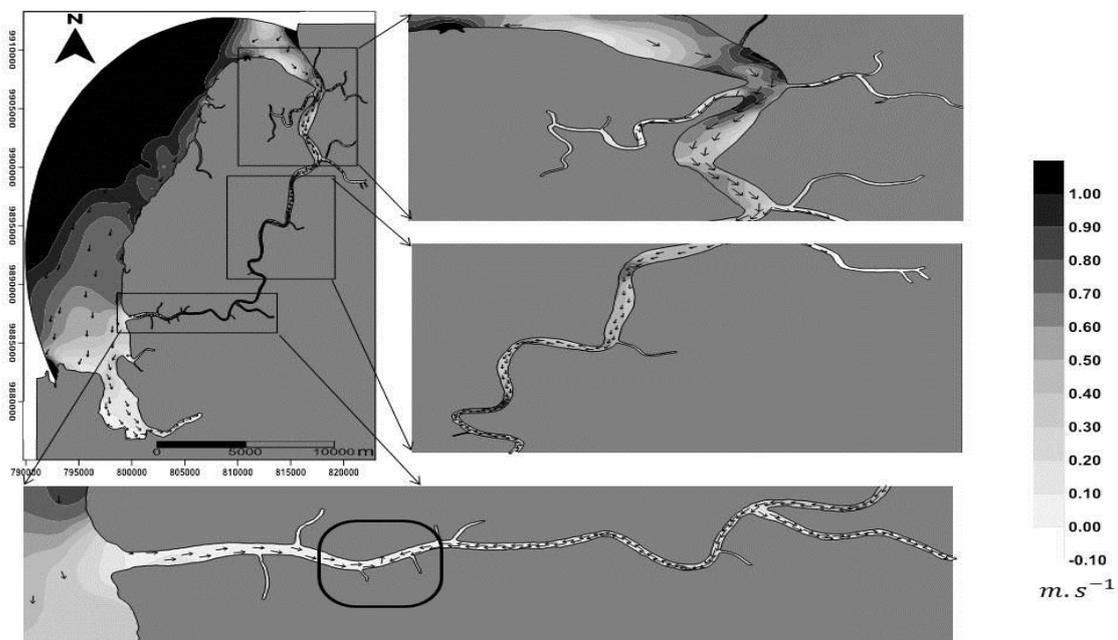
Campo de velocidade no período seco.

As regiões de convergência e divergência foram encontradas no mesmo local que no período chuvoso em mare de sizígia, porém em quadratura, tanto a

convergência como a divergência ocorreram mais próximas da boca sul do FL (figura 38 e 39).

Figura 38 – Campo de velocidade no instante de enchente na quadratura – Período seco.

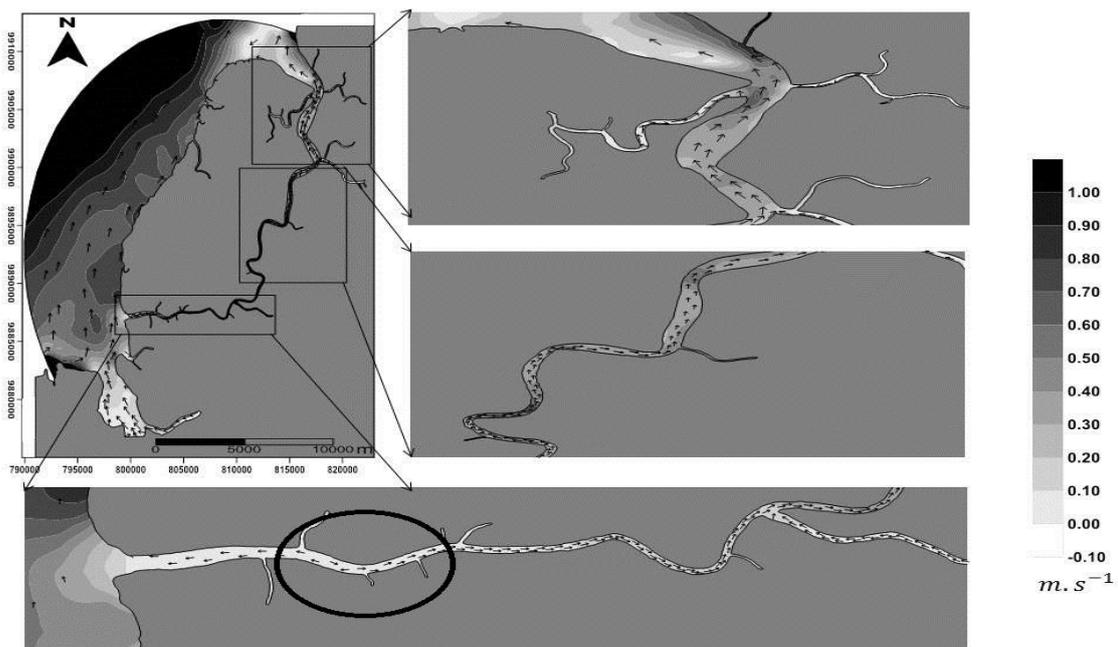
Zona de convergência.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Campo de velocidade no instante de vazante na quadratura – Período seco.

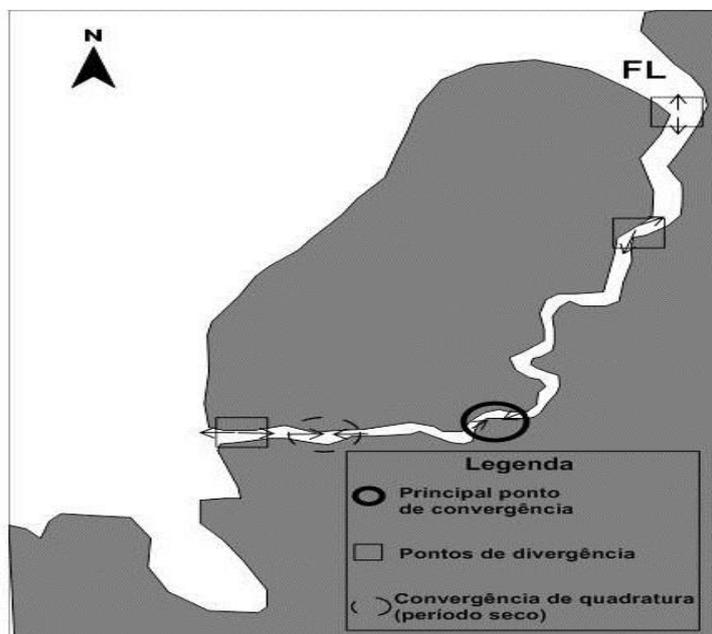
Zona de divergência.



Fonte: Autor.

A migração da zona de convergência e divergência para a boca sul do FL no período seco e maré de quadratura pode estar ligada ao aparecimento de porções secas que por compressão aumentam a velocidade das correntes que entram pela BN. Para perder esse acréscimo de energia e ocorrer à anulação das correntes, percorrem o FL até próximo da BS. No período seco, não foi inserido uma vazão nodal, o que pode também diminuir as velocidades das correntes que entram pela BS, corroborando para a aproximação da ZC à boca sul. As intensidades das correntes aumentam, como esperado, quando se aproximam dos vértices dos meandros. Esse aumento provoca erosão nestes locais, porém o transporte e deposição desses sedimentos não são facilmente identificados, como no caso dos rios onde há meandros abandonados, mas podem estar sendo depositados nos locais onde há anulação das correntes de maré. As velocidades dentro do FL no período seco também decaem da BN em direção à BS. A partir dos resultados descritos um mapa conceitual foi elaborado (figura 40).

Figura 40 – Mapa conceitual da região do FL e suas áreas de convergência e divergência



Fonte: Autor.

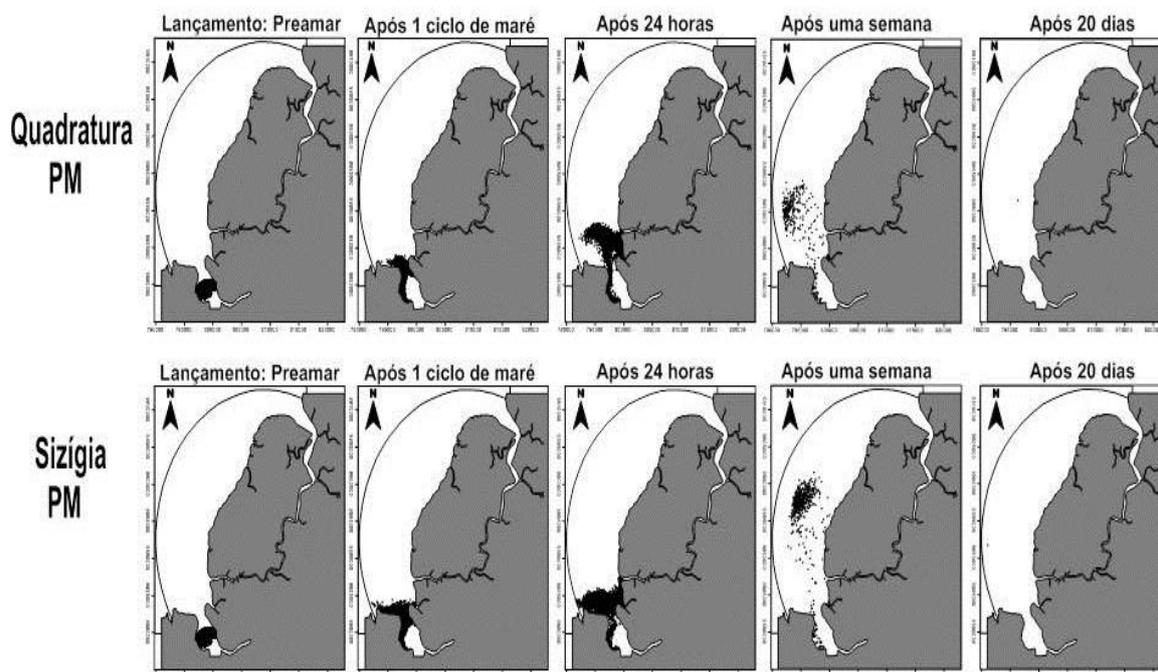
Segundo Warner et al. (2003), sedimentos são depositados nas regiões de convergência. O mesmo provavelmente acontece nas áreas de divergência, visto

que o campo de velocidade sofre uma anulação favorecendo a deposição de sedimentos mais finos e aumentando o tempo de residência de substâncias dissolvidas.

Modelo de Transporte Lagrangeano

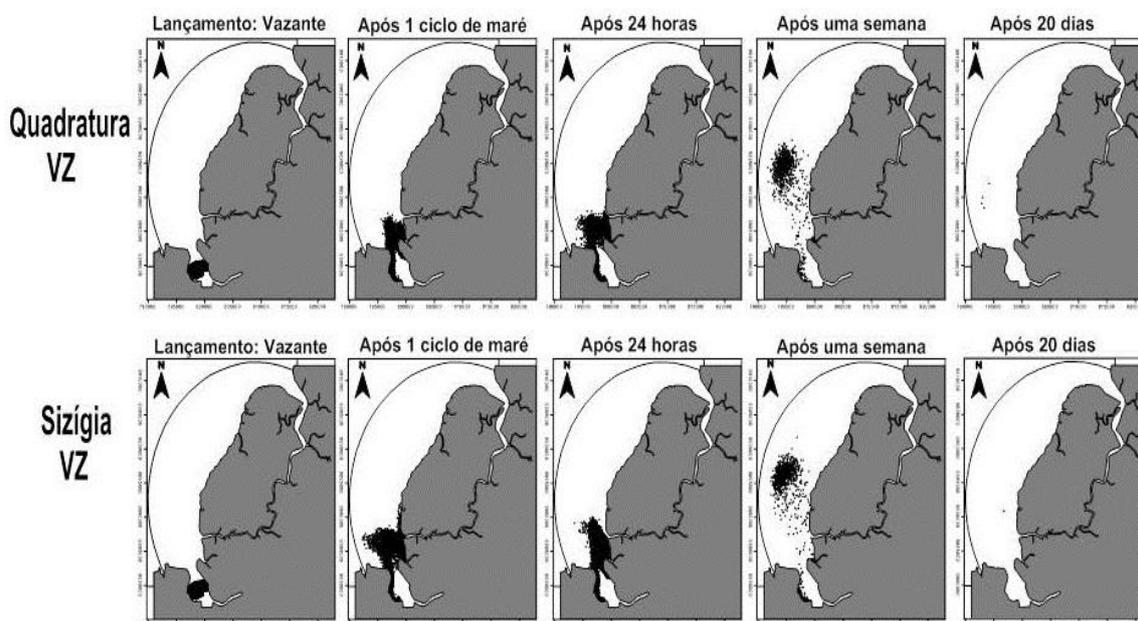
Para uma análise inicial da tendência de transporte de sedimentos advindos do rio St. Antônio foi simulado um despejo de partículas na área da baía do Sol com concentração igual a 1000, totalizando 3800 partículas lançadas. Esta simulação foi feita no período chuvoso. O despejo foi realizado nos instantes de preamar (PM), vazante (VZ), baixa-mar (BM) e enchente (EM), em marés de sizígia e quadratura, sendo observado o comportamento da nuvem de partículas com o passar do tempo como visto nas figuras 41, 42, 43 e 44.

Figura 41 – Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na preamar de sizígia e quadratura.



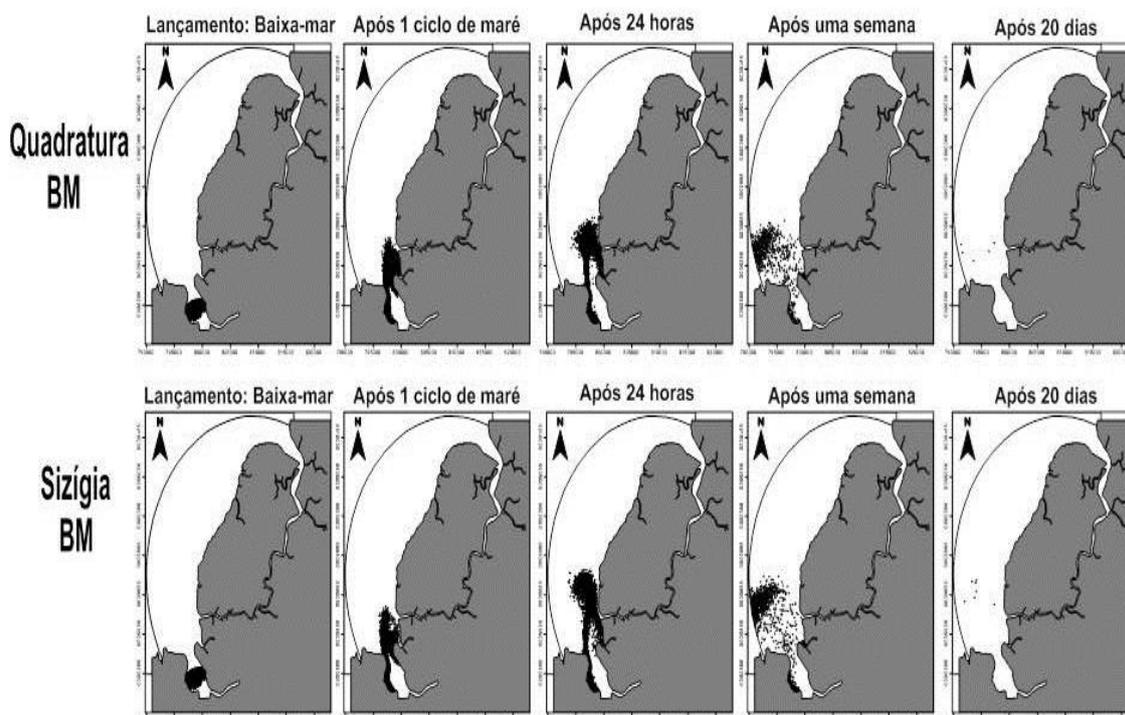
Fonte: Autor.

Figura 42 – Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na vazante de sizígia e quadratura.



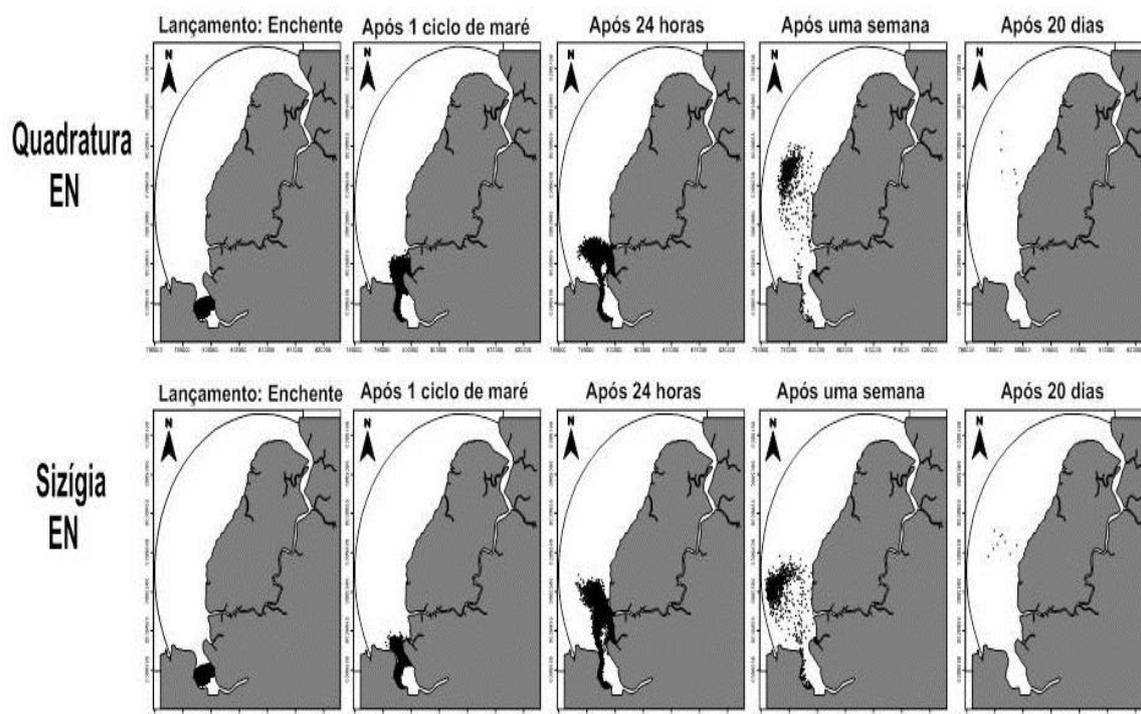
Fonte: Autor.

Figura 43 – Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na baixa-mar de sizígia e quadratura



Fonte: Autor.

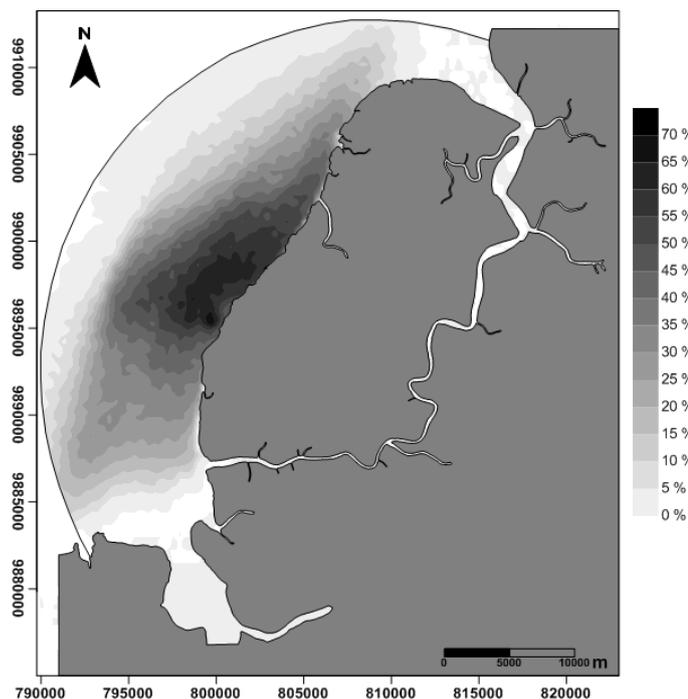
Figura 44 – Transporte lagrangeano de sedimentos finos lançados na enchente de sizígia e quadratura.



Fonte: Autor.

Pode-se observar que as partículas vão em direção à baía do Marajó, passando tangente a entrada do furo da Laura, porém não o adentrando. Os sedimentos lançados em período de baixa-mar, após uma semana, fluem para oeste da baía do Marajó, saindo do domínio modelado, tanto na sizígia como na quadratura. Sendo também o período onde a pluma de partículas tem o menor alcance após 20 dias, permanecendo poucas partículas ainda próximas à baía do sol. As partículas lançadas em preamar percorrem, paralelamente, até metade da ilha de colares na sizígia e se dissipam rapidamente para fora do domínio após 20 dias. A probabilidade da passagem da nuvem de partículas pelos pontos do domínio pode ser vista na figura 45.

Figura 45 – Mapa probabilístico de passagem da nuvem de partículas.



Fonte: Autor.

Observa-se que a probabilidade da nuvem de partículas adentrarem o FL é praticamente zero, enquanto que 40% a 70% das partículas que compõem a nuvem passam na região mais central da baía do Marajó, bem próximo à ilha de Colares. A região mais escura do gráfico, a qual indica 70 % de probabilidade de passagem da nuvem, se enquadra no relevo de erosão mapeado em Barbosa (2007). Isto ratifica o processo de erosão que vem ocorrendo em parte da margem da ilha evidenciado pela presença de falésias. As maiores probabilidades de forma geral estão todas próximas a ilha de colares, onde também foi mapeado um relevo de acumulação de sedimentos relacionado aos processos locais de erosão e sedimentação nas falésias.

Conclusão

Canais com dupla ligação com a região de influência da maré como o Furo da Laura estão sujeitos ao fenômeno chamado convergência barotrópica, visível nos momentos de enchente, localizado predominantemente próximo à boca sul do furo. Encontraram-se locais de divergência que migram de acordo com a oscilação da maré. Não há uma variação sazonal distinta do local de

convergência, porém no período seco em maré de quadratura o local de convergência migra para próximo da boca sul do furo. Isto pode ter se dado tanto por fatores naturais como de modelagem. Na região central do furo, a oscilação do campo de velocidade sofre menor influência da oscilação da maré. Isto provavelmente acontece devido ao amortecimento da maré causado pelo estreitamento e atrito. Pela tendência do transporte lagrangeano, as partículas despejadas, que no caso podem ser vistas como sedimentos vindos do rio St. Antônio não adentra o Furo da Laura, enquanto que grande parte destas partículas transita próximo à costa litorânea da ilha de Colares, locais já mapeados como zonas de erosão e sedimentação. Para maior acurácia do campo de velocidade no modelo é fundamental o conhecimento da distribuição de rugosidade dentro do canal do FL assim como um refinamento maior da batimetria. Uma investigação in situ deve ser feita nos locais de convergência e divergência para avaliar a deposição sedimentar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Geofísica (CPGF/UFPA) e ao Laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR) pelo apoio instrumental e acadêmico.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. M. *Um sistema computacional para o escoamento e transporte fluido e turbulento em corpos d'água rasos usando técnicas de filtragem*. 1993. 143f. Tese (Doutorado Ciências em Engenharia Civil) - Universidade do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 1993.

ARENTZ, M. F. R. *A modelagem hidrodinâmica como auxílio à navegação no canal norte do estuário do Amazonas*. 2009. 182f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS, A. S. *Modelagem matemática do sistema estuarino dos rios Mojuim e Mocajuba (Pará-Br)*. 2016. 61f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Marinha) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2016.

BALTAZAR, L. R. S; MENEZES, M. O. B; ROLLNIC, M. Contributions to the Understanding of Physical Oceanographic Processes of the Marajó Bay - PA, North Brazil. *Journal of Coastal Research*, Szczecin, Poland. SI 64, p. 1443–1447, 2011. (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium)

BARBOSA, E. J. S. *Unidades de relevo em zona costeira estuarina: municípios de Colares e Santo Antônio do Tauá (PA)*. 2007. 112f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Belém, 2007.

BARROS, M.B. *Uma contribuição para a elaboração de planos de contingência para derramamentos de Petróleo das atividades de exploração OFFSHORE do Espírito Santo*. 2002. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental, Vitória, 2002.

BASTOS, A.M. *Modelagem de escoamento ambiental como subsídio à gestão de ecossistemas aquáticos no baixo igarapé da Fortaleza*. 2010. 118f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, Macapá, 2010.

BERRÊDO, J.F.; MENDES, A.C.; SALES, M.E.C.; SARMENTO, J.P. Nível de contaminação por óleo nos sedimentos de fundo e na água do rio Pará, decorrente do acidente com balsa Miss Rondônia. In: PROST, M.T. *Ecossistemas costeiros: impactos e gestão ambiental*, Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 153-165.

BOHLING, G. *Kriging: C & PE 940*. [Kansas]: Kansas Geological Survey, 2005.

BORBA, T. A. C. *Modelagem hidrodinâmica aplicada ao estuário Amazônico: uma abordagem em malha flexível*. 2014. 46f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Marinha) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2014.

HIDROLOGIA E CLIMATOLOGIA NA REGIÃO AMAZÔNICA BRASILEIRA (COBRAPHI). Informação disponível e atividade em desenvolvimento. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE HIDROLOGIA E CLIMATOLOGIA DA AMAZÔNIA, Manaus-AM, 1984. 326p.

CORRÊA, P.R.S.; PERES, R.N; VIEIRA, L.S. Levantamento de exploratório de solos da Folha SA. 22 Belém. In: BRASIL. Fundação Instituto Brasileiros de Geografia e Estatística. *Folha AS. 22 Belém*. IBGE, Rio de Janeiro, 1974. p. 1-153 (Projeto RADAMBRASIL-Levantamento de Recursos Naturais, v.5)

CORRÊA I. C. S. Aplicação do diagrama de pejrup na interpretação da sedimentação e da dinâmica do estuário da Baía do Marajó. *Pesquisas em Geociências*, v. 32-2, p. 109-188, 2005.

COELHO, M. C. N; MONTEIRO, M. A; SANTOS, I.C. Políticas públicas, corredores de exportação, modernização portuária, industrialização e impactos territoriais e ambientais no município de Barcarena, Pará. *Novos Cardenos-NAEA*, v.11, n.1, p.141-178. 2004.

CUNHA, C. L. N.; SCUDELARI, A.C.; ROSMAN, P.C.C. Uso de técnicas de modelagem para avaliar o transporte de sedimentos no complexo estuarino de Paranaguá. In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DE ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 8., 2015, Aveiro. *Uso de técnicas de modelagem para avaliar o transporte de sedimentos no complexo estuarino de Paranaguá*. Aveiro: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2015. p. 1-12.

CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. Blucher; São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1999. 236p.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *Cartas Náuticas*. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br/>>. Acesso em 24/02/2015.

FERNANDES, A. R. P., *Caracterização hidrodinâmica do furo da Laura (rio Guajara-mirin), Amazônia oriental*. 2014. 46f Dissertação (Mestrado em geofísica). Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2014.

FONTES, C.R.F. *Estudo numérico da circulação na Plataforma Continental Amazônica (PCA)*. 2000. Tese (D.Sc.) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2000.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR (FEMAR). *Catálogo de estações maregráficas*. 2015. Disponível em: <<http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/indice.html#amapaepara>>. Acesso: 10/04/2015.

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.

GENZ, F.; CIRANO, M.; LESSA, G.C. ProcED: a MATLAB package for processing ADCP estuarine data. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 28, n. 2, Jun. 2010.

GODIN, G. Frictional effects in river tides. In: PARKER BB (Ed.). *Tidal hydrodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1991. p.379–401.

GOOGLE EARTH. Baía do Sol. 2015. Disponível em: <<http://www.>>. Acesso em 19/02/015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). Mapa do estado do Pará. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php>>. Acessado em: março 2015

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Dados históricos*. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acessado em: 20 de setembro, 2015.

LATRUBESSE, E.M; STEVAUX, J.C. Geomorphology and environmental aspects of the Araguaia fluvial basin, Brazil. *Z.Geomorph.N.F. Berlin*, Suppl.- Bd.129, p.109-127, 2002.

LIMA, R. R.; TOURINHO, M. M.; COSTA, J. P. C. *Várzeas flúvio-marinhas da Amazônia Brasileira: características e possibilidades agrícolas*. Belém: FCAP, 2000.

MAZDA, Y., KANAZAWA, N.; WOLANSKI, E. Tidal asymmetry in mangrove creeks. *Hydrobiology*. v. 295, p. 51-58, 1995.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípio de oceanografia física em estuários*. São Paulo : Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. *Acta Amazônica*, v. 35, p.207-214, 2005.

NASCIMENTO, I. B. A. *Aplicação de modelo hidrodinâmico 2DH em canais de maré da costa Leste da ilha do Marajó*. 2013. 127f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Marinha) Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Bragança, 2013.

NICHOLS, M.M.; BIGGS R.B. Estuaries. In: DAVIS, R.A. (Ed.). *Coastal sedimentary environments*. Berlin: Springer-Verlag, 1985. p.77–186.

PALACIO, C. A. P. T. *Metodologia para la validacion de modelos hidrodinamicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la bahia Melford en la Costa del mar del Norte Alemán*. 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado em Aproveitamento de Recursos Hídricos) – Universidad Nacional de Colombia, Setor Tecnologia, Medellin, Colombia, 2002.

PLANAVE, S.A *Estudo de impacto ambiental para a implantação do terminal Portuário Graneleiro de Barcarena – Pará*. Rio de Janeiro, 2005.

RIGO, D. *Análise do escoamento em regiões estuarinas com manguezais – medições e modelagem na Baía de Vitória, ES*. 2004. 156f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Oceânica, COPPE, Programa de Pós-Graduação, Rio de Janeiro, 2004.

RIGO, D. ; SARMENTO, R. *Determinação do tombo da maré no canal da passagem* - Relatório Final. Vitória, Brasil: UFES. Laboratório de Hidráulica, 1993.

ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SisBaHiA*. COPPE – Engenharia Costeira e Oceanográfica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

SISBAHIA® *Manual do usuário*. 2012. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/Arquivos_Gerais/Modelo%20Hidrodinamico.htm_ Contornos: Acesso em: 05/01/2015

SOTO, Y. J. M. *A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR*. 2004. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Curitiba, 2004.

SILVA, I. O. *Distribuição da vazão fluvial no estuário do rio Amazonas*. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em engenharia oceânica, COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação, Rio de Janeiro, 2009.

SMITH, J.; SMITH P. *How to develop a model*. Oxford University Press. 2007, 125.

TUMA, L. S. R. *Análise geomorfológica da ilha de Colares, baía de Marajó*. 1997. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 1997.

WARNER, J. C., SCHOELLHAMER, D.; SCHLADOW, G. Tidal truncation and barotropic convergence in a channel network tidally driven from opposing entrances. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 56, p.629-639, 2003.