



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Propagação da maré em canais interconectados – Estudo de caso Estreito de Breves, PA

Erika Carvalho Nogueira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Marcos Nicolás Gallo

Laíssa Régia Sarmiento Baltazar

Rio de Janeiro

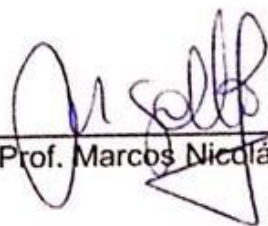
Agosto de 2017

PROPAGAÇÃO DA MARÉ EM CANAIS INTERCONECTADOS – ESTUDO DE CASO
ESTREITO DE BREVES, PA

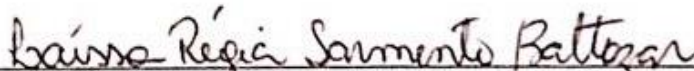
Erika Carvalho Nogueira

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

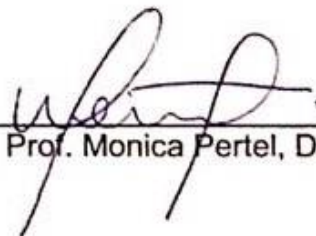
Examinado por:



Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc



Laíssa Régia Sarmiento Baljazar, M.Sc



Prof. Monica Pertel, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
AGOSTO de 2017

Nogueira, Erika Carvalho

Propagação da maré em canais interconectados –
Estudo de caso Estreito de Breves, PA / Erika Carvalho
Nogueira. -- Rio de Janeiro, 2017.

70 f.

Orientador: Marcos Nicolás Gallo.

Coorientadora: Laíssa Régia Sarmiento Baltazar.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade
Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Bacharel em
Engenharia Ambiental, 2017.

Referencias Bibliográficas: p. 61-63.

1. Amazonas. 2. Maré. 3. Canais interconectados.
4. Vazão fluvial. I. Nicolás Gallo, Marcos, orient. II. Régia
Sarmiento Baltazar, Laíssa, coorient. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores, Marcos Gallo e Laíssa Baltazar, por todo apoio, incentivo, paciência e conhecimento passado desde o começo da iniciação científica até a defesa da monografia. A contribuição de vocês foi fundamental.

Agradeço a toda equipe do LDSC, pelas dicas, conselhos e auxílio durante o período da iniciação científica. E também à todos os meus professores por compartilhar conhecimento e experiências essenciais para a minha formação.

Agradeço à minha família por ser minha base, fonte de amor, alegria e minha maior torcida. Em especial aos meus pais, Cláudia e Humberto, pelo amor, paciência, ensinamentos, confiança e força, essenciais para a realização dos meus sonhos. À minha tia Dilva, minha dinda Leila e meu primo Rubem por estarem presentes em todos os momentos da minha vida. Ao meu namorado, Bernardo, pelo carinho e parceria, tornando tudo mais leve, sempre me acalmando e apoiando.

Agradeço aos amigos do Maria Raythe, pela eterna amizade e por tornarem a vida mais divertida. Aos amigos da Ambiental, que cresceram junto comigo ao longo dessa caminhada e marcaram a minha história. Agradeço igualmente aos amigos do intercâmbio, por estarem ao meu lado em momentos incríveis e por se tornarem companheiros de vida.

Agradeço a tantas pessoas de bom coração que cruzaram o meu caminho e se dispuseram a compartilhar informações e conhecimento. Em especial ao Maurício pelo tempo, carinho e paciência de me ensinar as matérias mais difíceis.

Agradeço à Professora Mônica Pertel por ter aceitado participar da banca de avaliação.

Por fim, agradeço à sociedade brasileira, por me permitir uma formação gratuita e de qualidade e ao CNPq pelas bolsas de intercâmbio e de iniciação científica que me fizeram crescer imensamente como ser humano e profissional.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Propagação da maré em canais interconectados – Estudo de caso Estreito de Breves, PA

Erika Carvalho Nogueira

Agosto/2017

Orientadores: Marcos Nicolás Gallo e Laíssa Régia Sarmiento Baltazar.

Curso: Engenharia Ambiental

O Estreito de Breves é um sistema estuarino de multicanais que liga os estuários dos rios Amazonas e Pará. A região é dominada por macro marés e descarga média de 180.000 m³/s do rio Amazonas e 11.000 m³/s do rio Tocantins-Pará. O estudo da hidrodinâmica local é complexo devido à escassez de dados disponíveis ao longo dos canais interconectados. O comportamento da maré e o fluxo de água entre os canais foram estudados através da análise dos dados maregráficos e de resultados disponíveis de um modelo simplificado desenvolvido no Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (módulo 2DH-Delft3D). Foram usados dados obtidos de 9 estações maregráficas ao longo dos 650 km dos canais interconectados (canal sul, Breves e Pará) e o modelo hidrodinâmico com uma geometria simplificada para obter maior compreensão sobre o ponto de encontro da maré. Analisando a propagação da componente M₂ ao longo do canal de Breves, através dos dados disponíveis, observou-se uma descontinuidade do crescimento da fase entre as estações maregráficas de Vila Curumú, próxima ao canal sul, e Breves, próxima ao canal Pará, caracterizando a convergência das ondas provenientes das duas entradas do canal. Cabe resaltar que a distância entre essas estações maregráficas é de aproximadamente 115 km. Através do uso do modelo foi possível refinar o cálculo e identificar a localização do ponto de encontro da maré a 80 km de Breves (40 km de Vila Curumu). Além disso, também foram analisadas as modificações em níveis e velocidades devido ao encontro. A análise da amplitude indica uma possível reflexão da onda nesse ponto, que é verificada pela característica da propagação ao longo dos canais. Nos canais Sul e Pará a propagação da onda de maré é progressiva, já no ponto de encontro apresenta características de uma onda estacionária. A velocidade da propagação da onda da maré durante a vazão média é maior no canal do Sul que no canal Pará devido à diferença de profundidade média dos canais, sendo mais rápida no canal Sul, que é mais profundo. Na época de cheia, o ponto de encontro se aproxima da estação Vila Curumu, seguindo em direção ao canal sul, onde há maior amortecimento da maré causada pela maior descarga fluvial do rio Amazonas. No Estreito de Breves o fluxo residual segue em direção ao canal Pará.

Palavras-chave: Maré; Vazão fluvial; Canais interconectados; Amazonas.

Abstract of the Undergraduate Project presented to the POLI / UFRJ as part fulfillment of requirements for the degree of Engineer.

Tidal propagation in interconnected channels – A case study of Strait of Breves, PA

Erika Carvalho Nogueira

August/2017

Advisors: Marcos Nicolás Gallo and Laíssa Régia Sarmiento Baltazar.

Course: Environmental Engineering

The Strait of Breves is an estuarine multichannel system that connects the Amazon and Pará estuaries. The region is dominated by macro tides and average discharge of 180,000 m³/s of the Amazon River and 11,000 m³/s of the Tocantins- Pará River. Local hydrodynamics study is complex due to the scarcity of data available along the interconnected channels. The tide behavior and the water flow between channels were studied by analyzing data tide and available results of a simplified model developed in the LDSC (module 2DH-Delft3D). Data were obtained from 9 tide gauges along the 650 km of the interconnected channels (south channel, Breves and Pará) and a hydrodynamic model with a simplified geometry was used to obtain a better understanding of the tidal meeting point. Analyzing the propagation of M₂ component along the Breves channel, it was observed a discontinuity of its rising phase between the tide gauges of Curumú Village, near the south channel, and Breves, near the Pará channel, indicating the convergence of waves coming from the two channel entrances. However, the distance between these gauges stations is approximately 115 km. Through the use of the model it was possible to refine the calculation and identify the tide meeting point location, which is 80 km far from Breves (40 km from Curumú Village). In addition, the modifications in water levels and velocities due to the encounter were also analyzed. The amplitude analysis indicates a wave reflection at that point, which is proved by the characteristic of the tide propagation along the channels. In the South and Pará channels the tidal wave propagation is progressive and at the meeting point has characteristics of a standing wave. The tide wave velocity during the average flow is higher in the South channel than in the Pará channel due to the average channel depth difference, being faster in the South channel, which is deeper. The meeting point approaches Vila Curumú station in the rainy season, following the South channel, which suffers from greater tidal cushion caused by the greater river discharge of the Amazon River. In the Strait of Breves the residual flow follows in the direction of the Pará channel.

Keywords: Tide; Fluvial flow; Interconnected channels; Amazonas.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 2. Caracterização a área de estudo | 2 |
| 2.1. Localização..... | 2 |
| 2.2. Características físicas do sistema..... | 4 |
| 2.3. Estudo de caso - Estreito de Breves..... | 4 |
| 3. Uso de dados e modelo simplificado para o estudo de caso..... | 6 |
| 4. Objetivo | 7 |
| 4.1. Objetivo Geral..... | 7 |
| 4.2. Objetivos específicos..... | 7 |
| 5. Fundamentos Teóricos | 7 |
| 5.1. Estuários | 7 |
| 5.2. Principais forçantes da circulação nos estuários..... | 8 |
| 5.3. Escoamento fluvial..... | 8 |
| 5.4. Comportamento da maré..... | 9 |
| 5.5. Maré em canais | 12 |
| 5.6. Propagação da onda | 12 |
| 5.7. Hidrodinâmica de canais interconectados..... | 15 |
| 5.8. Importância do estudo da propagação da maré em canais interconectados. | 17 |
| 6. Metodologia | 18 |
| 6.1. Dados de maré e vazão..... | 19 |
| 6.2. Análise Harmônica (Série de Fourier) | 21 |
| 6.3. Análise das Vazões | 23 |
| 6.4. Celeridade | 26 |
| 6.5. Modelo simplificado | 27 |
| 7. Resultados e Discussões..... | 31 |
| 7.1. Fluxos Residuais | 32 |
| 7.2. Amplitude | 33 |
| 7.3. Estudo das Fases..... | 36 |
| 7.4. Celeridade | 41 |
| 7.1. Nível e Velocidade..... | 45 |
| 8. Considerações finais | 53 |
| 8.1. Conclusões..... | 53 |
| 8.2. Sugestões para trabalhos futuros | 55 |
| 9. Referências | 56 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Imagem noturna de satélites ressaltando as áreas costeiras com maior densidade demográfica (NASA, 2012)..... | 1 |
| Figura 2. Área de Estudo: Estreito de Breves, Pará, Brasil (Fonte: Elaboração Própria a partir de GOOGLE MAPS, 2017). | 3 |
| Figura 3. Fluxo de Transporte em Hidrovias 2015 (ANTAQ, 2016) | 6 |
| Figura 4. Altura da maré na estação maregráfica de Vila Nazaré e as fases da lua: 13/05/06- Lua Cheia; 20/05/06- Lua Minguante; 27/05/06- Lua Nova; 03/06/06- Lua Crescente. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 10 |
| Figura 5. Exemplo idealizado de uma onda de maré estacionária. Fonte: Elaboração própria a partir de Dalbone, 2014..... | 13 |
| Figura 6. Exemplo idealizado de uma onda de maré progressiva. Fonte: Elaboração própria a partir de Dalbone, 2014..... | 14 |
| Figura 7. Exemplo idealizado de diagrama h-v de uma maré estacionária, uma maré progressiva e a combinação entre os dois tipos (adaptado de DALBONE,2014). | 14 |
| Figura 8. Baía de San Pablo (Califórnia, EUA)(WARNER et al., 2003). | 15 |
| Figura 9. Estuário do Yangtze, China (WANG e DING, 2012)..... | 16 |
| Figura 10. Delta de Berau na Indonésia (BUSCHMAN et al., 2010). | 17 |
| Figura 11. Elementos de Transporte Aquaviário (ANTAQ, 2016). | 18 |
| Figura 12. Mapa com a localização das estações maregráficas utilizadas. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 19 |
| Figura 13. Descarga fluvial de 1999 até 2008 na cidade de Óbidos. Fonte: Elaboração Própria a partir de ANA, 2017..... | 21 |
| Figura 14. Descarga fluvial de 1999 até 2008 na cidade de Óbidos. Fonte: Elaboração Própria a partir de ANA, 2017. | 25 |
| Figura 15. Grade computacional do modelo. Os pontos indicam as estações de observação no modelo. Fonte: BALTAZAR, 2017..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Figura 16. Batimetria média ao longo do canal entre as estações maregráficas. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 30 |
| Figura 17. Trecho entre as estações maregráficas para o cálculo da batimetria média de cada canal. Fonte: BALTAZAR, 2017. | 30 |
| Figura 18. Velocidade Residual Canal Sul. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 32 |
| Figura 19. Velocidade Residual Foz Pará. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 32 |
| Figura 20. Vazão em Baía das Bocas. No gráfico estão especificados os valores das áreas, que são as vazões dos períodos de enchente (A1 e A3) e vazante (A2). Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 33 |
| Figura 21. Gráfico comparativo da amplitude da componente M_2 da maré a partir da análise harmônica dos dados (azul) e do modelo C2a (preto). Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 34 |
| Figura 22. Diagrama Hovmöller (tempo pela distância): Amplitude no cenário C2a. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 35 |
| Figura 23. Gráfico comparativo da amplitude da componente M_2 da maré a partir da análise harmônica dos cenários C1b, C1a e C2b com mesma batimetria nos três canais (15 m) e vazões diferentes. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 36 |
| Figura 24. Fase da componente M_2 (dados). Dados de vazão média com dispersão em função da vazão (seca e cheia) nas estações onde há essa informação. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 37 |
| Figura 25. Gráfico comparativo da fase da componente M_2 a partir da análise harmônica dos dados (azul) e do modelo C2a (preto). Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 39 |
| Figura 26. Gráficos comparativos da fase da componente de maré M_2 a partir da análise harmônica dos cenários C1b, C1a e C2b com mesma batimetria nos três canais (15 m) e vazões diferentes. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 40 |
| Figura 27. Celeridade de entrada da maré (Dados). A inclinação da reta entre duas estações é o inverso da celeridade. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 28. Celeridade de entrada da maré (Modelo). A inclinação da reta entre duas estações é o inverso da celeridade. Fonte: Elaboração Própria, 2017..... | 43 |
| Figura 29. Celeridade de entrada da maré - Comparação do cenário C1a e C2a do Modelo. Fonte: Elaboração Própria, 2017..... | 44 |
| Figura 30. Gráficos de nível e velocidade em um ponto de cada canal sem vazão. Foram destacados os dias de maior sizígia e de menor quadratura. Fonte: Elaboração Própria, 2017..... | 46 |
| Figura 31. Gráficos de nível e velocidade em um ponto de cada canal com vazão média. Foram destacados os dias de maior sizígia e de menor quadratura. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 47 |
| Figura 32. Gráficos de nível e velocidade em um ponto de cada canal com vazão máxima. Foram destacados os dias de maior sizígia e de menor quadratura. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 48 |
| Figura 33. Diagramas h-v nos períodos de sizígia e quadratura em cada canal com diferentes vazões. Fonte: Elaboração Própria, 2017..... | 50 |
| Figura 34. Diagramas h-v nos pontos iniciais do canal de Breves (B2 e B9) nos períodos de sizígia e quadratura em cada canal com vazão zero, média e máxima. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 51 |
| Figura 35. Propagação da maré através de diagramas de elevação da superfície e velocidade ao longo dos canais Sul, Breves e Pará, durante a maré de sizígia. Indicação do sentido de vazante (positivo) e enchente (negativo) no canal de Breves. Fonte: Elaboração Própria, 2017. | 52 |

Lista de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 1. Principais Componentes astronômicas, períodos (msd: dia solar) e origem astronômica..... | 11 |
| Quadro 2. Informações dos dados maregráficos analisados..... | 20 |
| Quadro 3. Intervalos de vazão e respectivos meses..... | 24 |
| Quadro 4. Relação dos pontos do modelo simplificado com as estações maregráficas espacialmente correspondentes, quando existentes..... | 28 |
| Quadro 5. Dados de Vazão do modelo simplificado..... | 29 |
| Quadro 6. Características dos cenários simulados no modelo simplificado..... | 30 |
| Quadro 7. Fases da componente M_2 determinadas na análise harmônica com vazões nas estações onde há disponibilidade de dados em diferentes vazões..... | 38 |
| Quadro 8. Resumo das velocidades e celeridades em cada cenário no Canal Sul e no Pará..... | 42 |
| Quadro 9. Resumo das velocidades e celeridades em cada cenário no Canal Sul e no Pará com vazões diferentes..... | 44 |

1. Introdução

Estuários são ambientes costeiros, de transição entre o rio e o mar, que sofrem a influência das marés e apresentam fortes gradientes ambientais, como por exemplo, água doce próximos da sua cabeceira e águas salobras e marinhas próximo da sua desembocadura.

Esse ambiente sofre inúmeros impactos ambientais devido à ação humana, pois grande parte da população mundial se concentra na costa. No século XIX, houve a expansão das atividades de complexos industriais, agricultura, construção de barragens de usinas hidrelétricas e indústria pesqueira instalados nas proximidades dos estuários (MIRANDA *et al.* 2002). Com a consequente expansão populacional nas cidades próximas aos estuários, aumentaram os impactos ambientais causados pela ação antrópica, colocando em risco o desenvolvimento sustentável desses ambientes.

As regiões costeiras englobam menos de 20% da superfície do planeta. Entretanto, contêm mais de 45% da população humana e hospedam 75% das megalópoles com mais de 10 milhões de habitantes e produz em cerca de 90% da pesca global (Milênio 2009¹, *apud* (GREGÓRIO, 2009)). A presença humana no litoral pode ser percebida a partir de imagens noturnas de satélites da NASA (Figura 1 (NASA, 2012)).

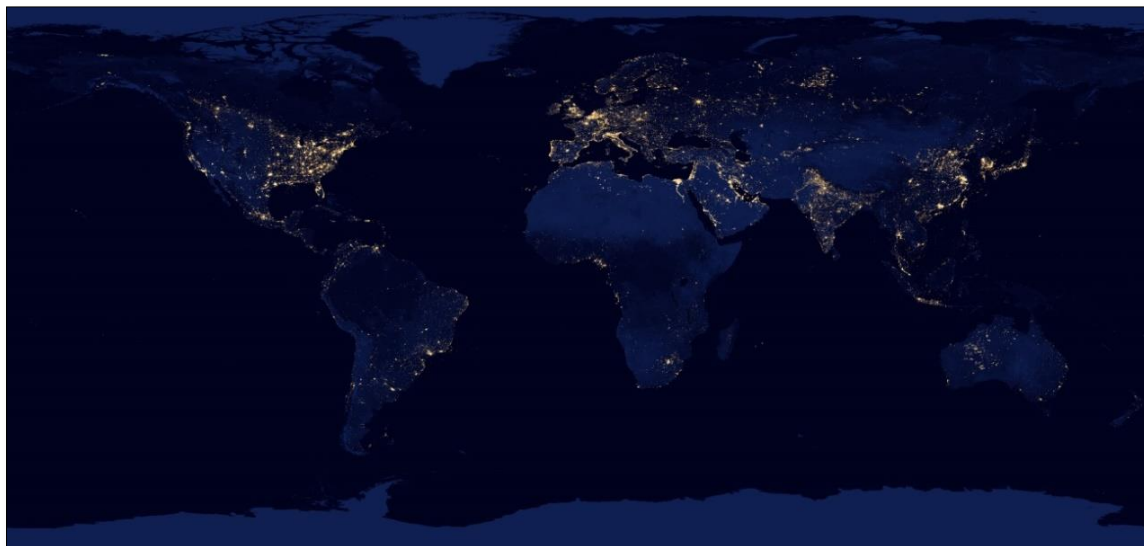


Figura 1. Imagem noturna de satélites ressaltando as áreas costeiras com maior densidade demográfica (NASA, 2012).

¹ MILÊNIO, 2009. “ Projeto instituto do milênio”. Online. Acesso em Janeiro 2009.URL: <http://www.institutomilenioestuarios.com.br/zonacosteira.html>

No Brasil, metade da população reside a não mais de 200 km do mar, impactando diretamente os ambientes litorâneos. Neste contexto, 5 das 9 principais regiões metropolitanas brasileiras encontram-se à beira-mar: Fortaleza, Recife, Salvador, Rio de Janeiro e ainda Belém, em região estuarina. As atividades econômicas costeiras são responsáveis por cerca de 70% do PIB nacional (IBAMA, 2002).

Segundo Miranda *et al.*, (2002), existem diversos motivos para o crescimento da atividade econômica estar intimamente ligado aos estuários: são locais adequados para instalação de portos; são férteis e podem produzir grandes quantidades de matéria orgânica; constituem uma via de acesso importante para o interior do continente; suas águas são renovados periodicamente sob a influência da maré.

Estuários têm grande importância social, econômica e biológica. Sendo fundamental a aplicação de ferramentas de gestão ambiental para alcançar a qualidade dos sistemas estuarinos, conhecendo suas características de transporte de sedimento, nutrientes, poluentes e interação entre fauna e flora. Esse conhecimento só é possível depois do entendimento dos padrões de circulação hidrodinâmica do estuário. Sabe-se que a complexidade da hidrodinâmica dos estuários e conseqüentemente do transporte de sedimentos e contaminantes, se dá devido à interação de condicionantes distintas como vazão fluvial, maré, batimetria e geometria do canal.

Rios que sofrem influência de maré são pouco estudados, apenas nas últimas décadas é que pesquisas importantes têm focado nas interações da descarga fluvial com a propagação da maré em regiões além do limite de intrusão salina, uma região que pode se estender centenas de quilômetros para o interior. A exploração da redistribuição e atenuação da energia das marés nos rios levou a uma nova avaliação de uma variedade de conseqüências para a sedimentologia fluvial e costeira, a evolução do delta, a conservação das zonas estuarinas e a intrusão salina sob influência da subida do nível do mar e a subsidência do delta (HOITINK e JAY, 2016).

2. Caracterização a área de estudo

2.1. Localização

A região de interesse do presente estudo está localizada na região norte do Brasil. O Estreito de Breves localiza-se na região de confluência das águas do Amazonas

com o rio Pará (Figura 2). É um dos canais do Arquipélago de Marajó e uma via fluvial necessária à navegação entre o estado do Pará e seus vizinhos.

O sistema estuarino estudado é formado por diversos canais, os quais circundam a ilha de Marajó. No entanto, o foco desse trabalho é entender a hidrodinâmica do canal principal do Estreito de Breves, que apresenta duas ligações substanciais com o oceano; é constituído na parte sul-leste de um único canal (rio Pará) e na sua parte norte pelo canal sul da embocadura do rio Amazonas.

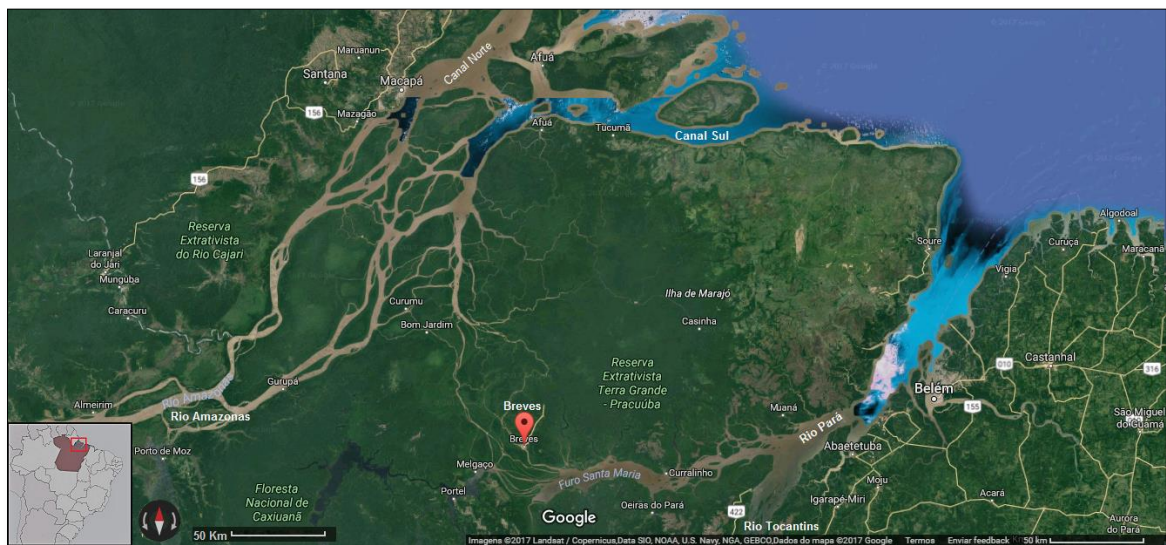


Figura 2. Área de Estudo: Estreito de Breves, Pará, Brasil (Fonte: Elaboração Própria a partir de GOOGLE MAPS, 2017).

De acordo com Ab'Sáber (2010), a região onde a área de estudo está inserida é conhecida popularmente como Golfão Marajoara, que inclui a larga embocadura do rio Amazonas entre o Amapá e a Ilha de Marajó; o Estreito de Breves a oeste dessa ilha, terminando pelos longos trechos da Baía das Bocas; e a leste-nordeste, o Rio Pará, o Baixo Tocantins e a Baía de Marajó.

O estuário é dividido pelo arquipélago do Marajó, que se constitui da Ilha de Marajó (maior ilha) cercada por diversas ilhas menores, aumentando a porção litorânea e os habitats costeiros influenciados pelas marés. A mistura de água doce e salgada ocorre nos trechos mais a jusante do rio, no entanto, a propagação da energia de maré pode se estender a algumas centenas de quilômetros à montante da foz.

É uma região com muitos corpos de água e alta diversidade de espécies animais e vegetais. Além disso, é responsável por abrigar algumas reservas naturais protegidas. Portanto, faz-se necessário compreender detalhadamente as

características da hidrodinâmica local para que haja uma ocupação e uso sustentável da região.

2.2. Características físicas do sistema

Segundo Gabioux (2002), o rio Amazonas aporta ao Oceano Atlântico a maior vazão de água doce do mundo, uma vazão média de aproximadamente $170 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ na cidade de Óbidos. O rio Amazonas descarrega suas águas principalmente ao norte da Ilha de Marajó, mas uma porção menor de sua vazão escoar pelo Estreito de Breves, adentrando os canais a sudoeste da ilha. Além dele, há o rio Pará, que se localiza na costa sul-sudeste da ilha de Marajó, se iniciando na baía das Bocas com contribuições do rio Amazonas e das sub-regiões do Marajó Ocidental e de Portel, passando pela área em que as águas do rio Tocantins deságuam na baía de Marapatá e seguindo até a sua foz, na baía do Marajó. O rio Pará é uma feição geomorfológica que interliga as regiões hidrográficas de Portel-Marajó e Tocantins-Araguaia (COSTA, 2013). O rio Tocantins tem uma vazão média é de $11 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (GABIOUX, 2002).

A circulação na desembocadura do rio Amazonas e na sua plataforma continental é muito complexa devido à variedade de fatores interatuantes, dos quais a maré e a vazão fluvial são as suas principais forçantes seguidas do campo de ventos alísios e a Corrente Norte do Brasil (GABIOUX, 2002).

Os estuários dos rios Amazonas e Pará podem ser classificados como de macromaré, com marés tipicamente semidiurnas, cujas componentes astronômicas mais importantes são a M_2 e a S_2 (GALLO, 2004).

O fator de forma (F) expressa a importância em amplitude, relativa das componentes diurnas às semidiurnas (PUGH, 1987). Segundo Gallo (2004), o fator de forma nas estações maregráfica da região analisada é aproximadamente 0,1, mostrando ser um estuário de maré tipicamente semidiurna, pois F está entre 0 e 0,25.

2.3. Estudo de caso - Estreito de Breves

As descargas dos rios Amazonas e Tocantins criam uma zona mista de água doce e salgada com extensão de aproximadamente 2.740 km, o qual abriga espécies endêmicas. Um maior conhecimento sobre esse complexo sistema poderá, por exemplo, explicar a migração do camarão de água doce e diversas espécies de

peixes, especialmente o *cattfish Brachyplatystoma*, de grande importância para economia pesqueira regional (BARTHEM e SCHWASSMANN, 1994).

O contato das águas do rio Amazonas com o Tocantins ocorre em canais profundos ao longo da ilha Marajó (Estreito de Breves), em torno de 200 km da boca do estuário. Segundo Barthem e Schwassmann (1994), a morfologia complexa do Estreito de Breves foi ponto focal de debates sobre a inclusão do rio Tocantins na Bacia do rio Amazonas. No entanto, essa ideia não se concretizou e em 1972 as bacias do rio Tocantins e Amazonas foram consideradas separadas.

Barthem e Schwassmann (1994), também destacam que no verão de 1983, a descarga do rio Amazonas estava anormalmente baixa e permitiu uma extensiva intrusão da cunha salina, a qual contaminou o reservatório de água potável da cidade de Belém. A importante contribuição da descarga do Amazonas para fluxo de água na baía de Marajó foi sinalizada durante o verão de 1984, quando o fluxo de água do rio Tocantins foi completamente obstruído (devido à construção da hidrelétrica de Tucuruí) e nenhuma intrusão salina foi notada.

Os canais do Estreito de Breves, além de possibilitar a troca de águas e sedimentos entre os dois sistemas, também são uma importante passagem para transporte de cargas e passageiros entre os portos e cidades da região. Os comboios que atravessam o Estreito de Breves podem ter dimensões de até 290 m de comprimento e 55 m de boca, tendo capacidade para transportar 50.000 tons de carga (16 barcaças de 3.125 tons) (PAES CARVALHO NAVEGAÇÃO & LOGÍSTICA LTDA, 2015). Os principais produtos transportados entre essas hidrovias são grãos, bauxita, minério de ferro, combustíveis, alumina, caulim e semirreboque baú. Na Figura 3 nota-se que o Estreito de Breves tem um fluxo de transporte aquaviário grande comparado com outras importantes hidrovias do Brasil.

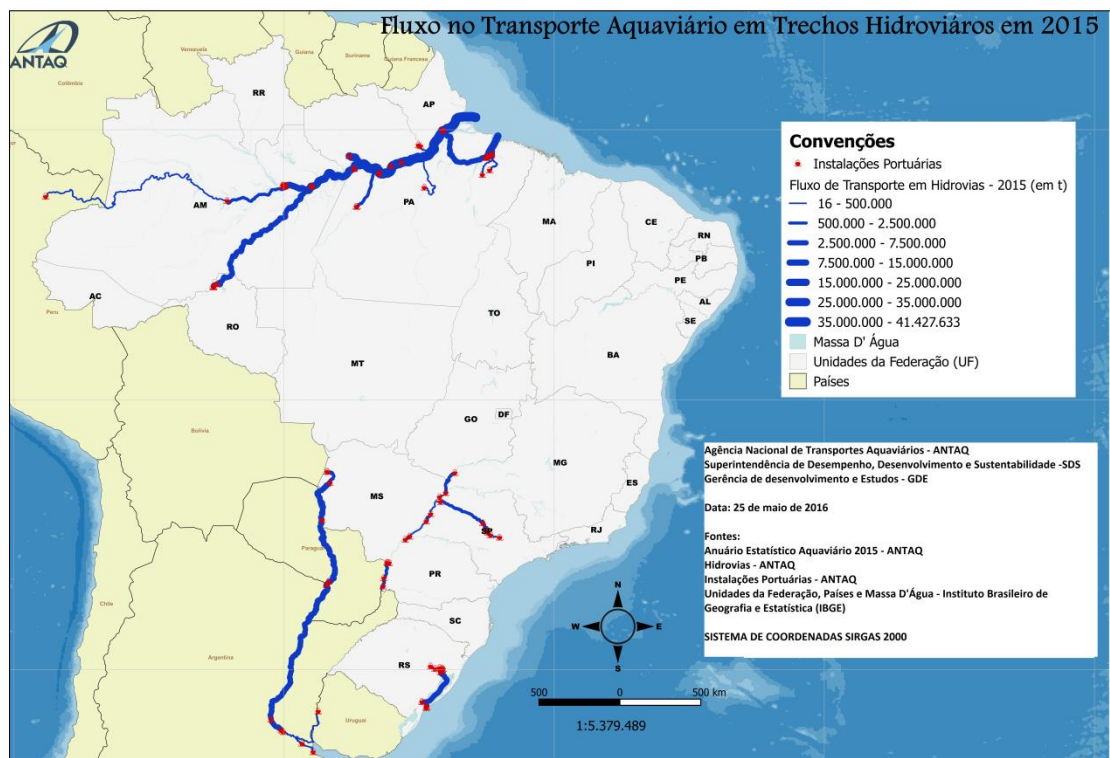


Figura 3. Fluxo de Transporte em Hidrovias 2015 (ANTAQ, 2016)

3. Uso de dados e modelo simplificado para o estudo de caso

Considerando a complexidade da propagação da maré em estuários, a utilização de modelos numéricos como ferramenta mostra-se cada vez mais necessária para entender a hidrodinâmica desses locais. Como por exemplo, o Estreito de Breves, onde estudo da hidrodinâmica local é complexo devido à escassez de dados disponíveis ao longo dos canais interconectados.

Neste trabalho, o comportamento da maré e o fluxo de água entre os canais são estudados através da análise dos dados disponíveis e de resultados de um modelo simplificado desenvolvido no laboratório de dinâmica de sedimentos coesivos (LDSC; (BALTAZAR, 2017)) utilizando-se o módulo 2DH do programa Delft3D (DELTARES, 2014). Foram usados dados obtidos de nove estações maregráficas ao longo dos 650 km dos canais interconectados (canal sul, Breves e Pará) e um modelo hidrodinâmico com uma geometria simplificada.

Para este estudo fez-se a análise harmônica de séries desses dados maregráficos e dos resultados numéricos do modelo, para entender a influência da vazão fluvial e da batimetria do canal nas constantes harmônicas de fase e amplitude de maré.

4. Objetivo

4.1. Objetivo Geral

Compreender a propagação da maré na conexão dos estuários dos rios Amazonas e Pará, especificamente no Estreito de Breves, que são submetidos a uma forte influência fluvial. Contribuindo para o melhor conhecimento a respeito do encontro de maré em canais interconectados influenciados pela vazão e morfologia fluvial.

4.2. Objetivos específicos

Analisar a hidrodinâmica do estuário do rio Amazonas, com ênfase no Estreito de Breves, através da análise dos dados hidrológicos e hidrodinâmicos para definição das características predominantes do sistema. Os parâmetros investigados foram as fases, amplitudes, celeridade e a variação da onda maré de acordo com a vazão fluvial e a batimetria dos canais.

Analisar a propagação da fase e amplitude da onda de maré ao longo do sistema estuarino através de canais interconectados, com o uso do modelo simplificado, e indicar a zona de convergência das marés.

5. Fundamentos Teóricos

5.1. Estuários

Dependendo da área e objetivo do estudo, há inúmeras definições para o conceito de estuário, por exemplo, sua caracterização em termos geológicos é diferente da oceanográfica. Mesmo dentro da oceanografia há diferentes definições para o termo.

A mais clássica é a definição de Pritchard (1955², *apud* MIRANDA, *et al.*, 2002), na qual estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. Nesse caso, é um ecossistema de transição entre o oceano e o continente. No entanto, esta definição clássica não leva em consideração a região onde ainda ocorre a influência da onda de maré e não há mistura com água salgada. Segundo Gallo (2004), há uma definição de estuário mais abrangente, incluindo o

² PRITCHARD, D. W., 1955. Estuarine circulation patterns. Proceedings 841 of the American Society of Civil Engineers, 81(Separate. 842 No. 717), 1–11.

trecho inferior do rio onde o escoamento é afetado tanto pela vazão fluvial como também pela propagação da maré. Na qual a fronteira rio-estuário não permanece fixa no tempo, mas apresenta variações de posição em função da variação dos parâmetros que caracterizam a maré (período e amplitude) e o escoamento fluvial (vazão, declividade e rugosidade do fundo). Por exemplo, no rio Amazonas a mistura de água doce e salgada ocorre apenas na plataforma continental, mas a perturbação do escoamento fluvial pela maré pode ser percebida até a cidade de Óbidos, à aproximadamente 800 km da foz.

Estuários são classificados como estuários multicanais quando têm pelo menos duas ramificações. Cada ramificação, ou seja, cada canal funciona hidraulicamente como um estuário de braço único, mas interage intensamente com os canais vizinhos (NGUYEN, 2008).

5.2. Principais forçantes da circulação nos estuários

As principais forças constituintes no processo da penetração da maré em estuários são as de gravidade (principal agente no escoamento fluvial), as de pressão (provenientes de desníveis na linha d'água gerados pela maré), as de atrito (geradas pela resistência no fundo), as inerciais (devido à geometria) e finalmente, as provenientes da estratificação da água (pelo encontro de água doce e salgada) (GALLO, 2004).

5.3. Escoamento fluvial

A descarga fluvial é uma variável importante para que ocorram os processos físicos, químicos, biológicos e geológicos nos sistemas estuarinos. As variações no escoamento fluvial (água doce) influenciam os padrões de circulação e mistura, a diluição e a intrusão do sal, o transporte de sedimentos, nutrientes, poluentes, bem como a distribuição das comunidades biológicas (LIMA, 2007).

O escoamento fluvial se dá pela ação direta da gravidade através da componente do peso da água na direção do declive. Dessa forma o escoamento em um canal fluvial ao contrário do que ocorre em um canal de maré, caracteriza-se por um único sentido de movimento; de montante para jusante (GOMES e MELO FILHO, 2004).

Segundo Gallo (2004), o efeito da vazão fluvial é semelhante ao termo do atrito no amortecimento da onda de maré, ou seja, com uma progressiva diminuição das amplitudes dentro do canal com o aumento da vazão.

5.4. Comportamento da maré

A maré é uma onda longa caracterizada por oscilações verticais da superfície, causada pela atração gravitacional da Lua e, em menor extensão, do Sol sobre a Terra (GALLO, 2004). Isto se deve à lei da atração gravitacional, que define que entre dois pontos materiais, separados pela distância D , e com massas M e m , ocorre uma força de atração dada pela fórmula $F = G \frac{Mm}{D^2}$, onde G é a constante gravitacional.

No entanto, não é somente a magnitude da força de atração gravitacional responsável pelo mecanismo da maré, mas sim uma diferença sutil dessa atração em diversas partes do planeta. Essa força diferencial, conhecida como força geradora da maré, é que deforma a terra e os grandes volumes de líquido sobre ela. Tal força é a resultante da ação da força gravitacional e da força centrífuga devido à rotação do sistema Terra-lua. A força geradora de maré é derivada da força gravitacional e é definida pela equação abaixo, na qual r a distância de M à partícula m (ALFREDINI, 2005):

$$\Delta F \propto \frac{GMm}{r^3} = \frac{\text{Constante}}{r^3}.$$

A influência da Lua é superior, pois apesar da sua massa ser 27 milhões de vezes menor que a do Sol, esse fato é compensado pela menor distância à Terra. Como a força geradora de maré é inversamente proporcional ao cubo da distância entre os corpos, e o Sol é 390 vezes mais longe da Terra que a Lua, esta exerce maior influência no regime de marés (ALFREDINI, 2005).

Matematicamente, a maré é uma soma de senoides cuja periodicidade é conhecida. Cada período completo da maré é denominado ciclo. O período de subida da água é chamado de enchente e o de descida vazante. Além disso, o nível máximo do ciclo é denominado preamar e o mínimo baixamar. A altura de maré é a diferença de nível entre uma preamar e a baixamar subsequente, e varia periodicamente com as fases da Lua.

A Figura 4, apresenta a evolução da maré em Vila Nazaré ao longo de um mês, mostrando a diferença de altura entre marés sizígias (em torno dos dias 13 e 27 de maio) e marés quadraturas (em torno dos dias 20 de maio e 3 junho). Nas situações de lua nova e lua cheia os três corpos (sol, lua e terra) estão alinhados e os efeitos gerados pela lua somam-se àqueles gerados pelo sol, portanto as preamares são mais altas e as baixa-mares são mais baixas. Nesses casos diz-se que a maré é de sizígia. Nas situações lua crescente e lua minguante, as influências da Lua e do Sol estão defasados em um ângulo de aproximadamente 90°. Nessas situações, as marés são chamadas de maré de quadratura, apresentando preamares e baixamares menos pronunciadas que nos casos de sizígia (NEVES FILHO, 1992). Em um mês lunar têm-se duas sizígias e duas quadraturas, no qual as alturas da maré aumentam e diminuem a cada 7 dias, aproximadamente.

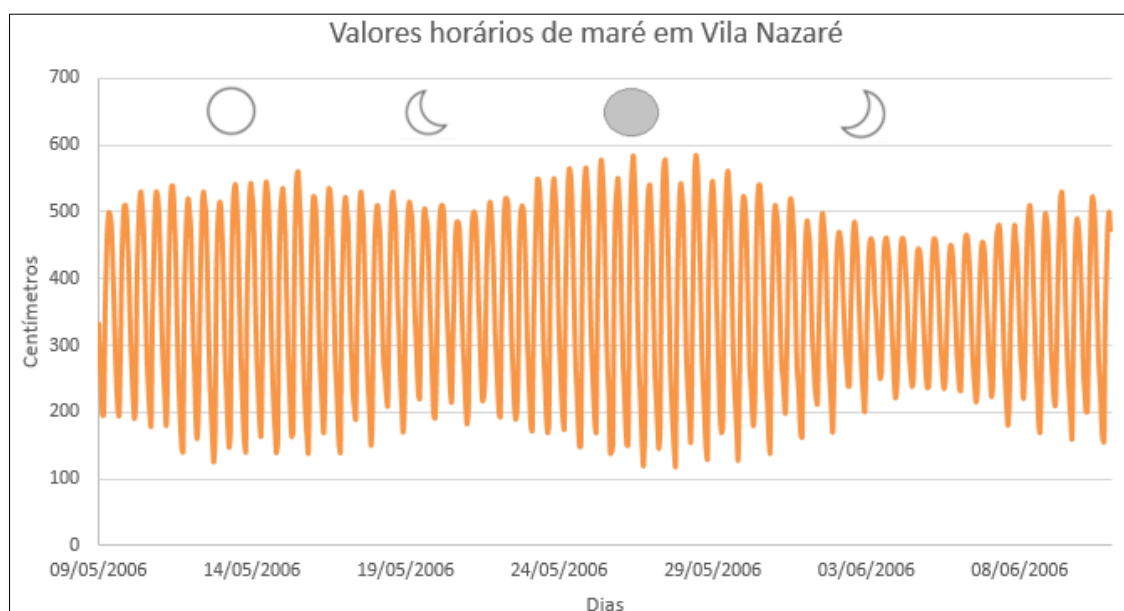


Figura 4. Altura da maré na estação maregráfica de Vila Nazaré e as fases da lua: 13/05/06- Lua Cheia; 20/05/06- Lua Minguante; 27/05/06- Lua Nova; 03/06/06- Lua Crescente. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Os períodos dominantes de maré podem ser classificados em: semidiurno, diurno e de longo período (14, 28 e 180 dias). Os períodos mais importantes estão listados no Quadro 1, com o subscrito 2 significando período semidiurno (aproximadamente 12 horas) e 1, diurno (cerca de 24 horas).

Quadro 1. Principais Componentes astronômicas, períodos (msd: dia solar) e origem astronômica.

| Espécie | Nome da Componente | Período | | Origem |
|----------------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------------------|
| | | (msd) | (h) | |
| 0 Maré de longo período | Sa | 364.96 | 8759.04 | Solar anual |
| | Ssa | 182.7 | 4384.8 | Solar semianual |
| | Mm | 27.55 | 661.2 | Lunar mensal |
| | Mf | 13.66 | 327.84 | Lunar quinzenal |
| 1 Maré diurna | Q ₁ | 1.12 | 26.88 | Elíptica lunar maior |
| | O ₁ | 1.08 | 25.82 | Lunar Principal |
| | | 1.04 | 24.84 | Elíptica lunar menor |
| | M ₁ | 1.04 | 24.84 | Parallax lunar |
| | | 1.04 | 24.84 | Elíptica lunar menor |
| | P ₁ | 1 | 24.07 | Solar Principal |
| | S ₁ | 1 | 24 | Radiação |
| | K ₁ | 1 | 23.93 | Lunar Principal |
| 1 | | 23.93 | Solar Principal | |
| J ₁ | 0.96 | 23.09 | Elíptica lunar | |
| 2 Maré semidiurna | N ₂ | 0.53 | 12.65 | Elíptica lunar menor |
| | M₂ | 0.52 | 12.43 | Lunar Principal |
| | L ₂ | 0.51 | 12.19 | Elíptica lunar menor |
| | | 0.51 | 12.19 | Elíptica lunar menor |
| | T ₂ | 0.5 | 12.02 | Elíptica solar maior |
| | S₂ | 0.5 | 12 | Solar Principal |
| | R ₂ | 0.5 | 11.98 | Elíptica solar menor |
| | K ₂ | 0.5 | 11.98 | Declinação da lua |
| 0.5 | | 11.98 | Declinação do sol | |
| 3 | M ₃ | 0.35 | 8.28 | Parallax lunar |

Fonte: PUGH, 1987 ; GALLO, 2004

No entanto, a maré não se resume apenas aos agentes astronômicos. O registro de maré em um determinado ponto da costa geralmente é diferente daquele previsto pela maré astronômica devido ao fato de que as oscilações de nível do mar sofrem efeitos meteorológicos, os quais são chamados de maré meteorológica (NEVES FILHO, 1992). Esses efeitos são causados por variações de pressão atmosférica, empilhamentos ou afastamentos da massa d'água junto à costa devido à ação de ventos, e efeitos de acumulação de água por ação de ondas. Essas oscilações de nível causadas por agentes meteorológicos são imprevisíveis, pois constituem fenômeno aleatório.

5.5. Maré em canais

A força produzida pela maré astronômica é dominante para gerar movimentos e misturas nos estuários, mas há uma distinção entre a maré propriamente dita e a cooscilação da maré. Como dito anteriormente, o fenômeno da maré é gerado pelas forças de atração gravitacional da lua e do sol, associados à aceleração centrípeta, agindo diretamente sobre as grandes massas de água das bacias oceânicas. No entanto, devido à dimensão de um estuário sua ação sobre esse sistema é praticamente desprezível. Ainda assim, sua influência propaga-se ao longo do estuário na forma de ondas longas de gravidade. A ação da maré no estuário, com o mesmo período da maré oceânica, é denominada de cooscilação da maré (MIRANDA *et al*, 2002).

A propagação da maré em estuários (águas rasas) é um escoamento à superfície livre complexo, pois as equações que governam o escoamento (conservação de massa e quantidade de movimento) são não lineares (GALLO, 2004). A evolução da maré em um estuário é retardada, amplificada e ou distorcida devido à interação com a topografia, geometria do estuário, descarga do rio e o atrito do fundo do canal, gerando amortecimento, assimetria na onda de maré e mudanças no nível médio (GALLO e VINZON, 2005, NGUYEN, 2008).

A geometria do corpo estuarino controla a propagação da maré e os campos de velocidade. A convergência das margens nos canais do estuário faz com que a onda de maré seja comprimida lateralmente e quanto maior o atrito relativo à convergência lateral, maior é o decréscimo da altura de maré. A deformação da onda pode ser associada à amplificação ou amortecimento da onda de maré, gerando tempos de enchente e vazante desiguais (LIMA, 2007, GALLO, 2004). Fatores meteorológicos e ou hidrológicos (descarga fluvial, as variações da pressão atmosférica e no campo de ventos) podem causar interferência no comportamento da maré, causando elevação ou rebaixamento do nível médio do estuário (LIMA, 2007).

5.6. Propagação da onda

Na propagação da onda em águas rasas (estuários), a onda de maré pode mudar suas características de progressiva à estacionária, ou mesmo um tipo misto de onda estacionária e progressiva, dependendo dos aspectos morfológicos da região. A maioria dos estuários apresenta alguma dissipação da energia das marés antes e

após a reflexão, e a resposta das marés é uma onda estacionária com contribuição progressiva de magnitude variável (DALBONE, 2014)

As ondas estacionárias são compostas por duas ondas da mesma amplitude e comprimento de onda viajando com a mesma velocidade em direções opostas. Segundo Dalbone (2014), em um estuário, não havendo atrito, a onda de maré (onda de água rasa) percorre o caminho a montante onde ela será refletida e voltará a jusante (se o estuário não for infinitamente longo). Um sistema de onda estacionária se configura no estuário se o tempo necessário para percorrer esse caminho for igual ao período da onda de maré. Neste caso, a onda refletida irá interferir com a onda que acabara de entrar, então os máximos níveis de maré e correntes estarão defasados em 90°. Ou seja, velocidade de corrente é nula tanto na baixamar quanto na preamar (Figura 5).

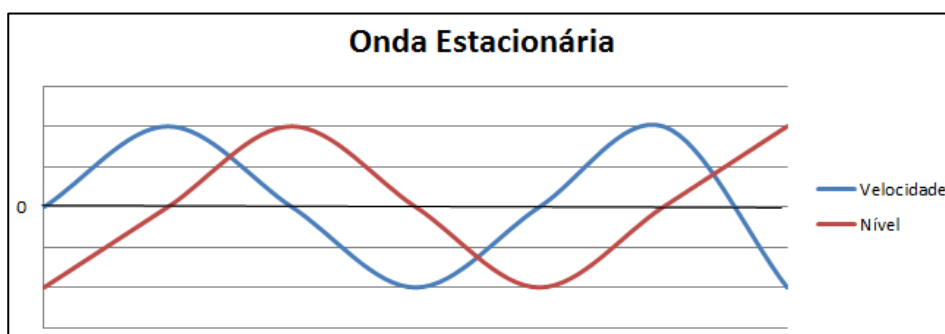


Figura 5. Exemplo idealizado de uma onda de maré estacionária. Fonte: Elaboração própria a partir de Dalbone, 2014.

De acordo com Dyer³ (1998, *apud* DALBONE, 2014), a onda com caráter progressivo ocorre quando a energia da onda de maré for completamente dissipada pelo atrito antes da reflexão, ou se o estuário for infinitamente longo. Na onda progressiva os máximos dos níveis de maré e correntes estarão em fase, ou seja, a magnitude máxima de corrente de enchente ocorrerá na preamar e a magnitude máxima de corrente de vazante ocorrerá na baixamar, como mostra a Figura 6.

³ DYER, K.R., 1998. "The typology of intertidal mudflats". In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (Eds.), "Sedimentary Processes in the Intertidal Zone", Geological Society, London, Special Publications v. 139., pp. 11-24.

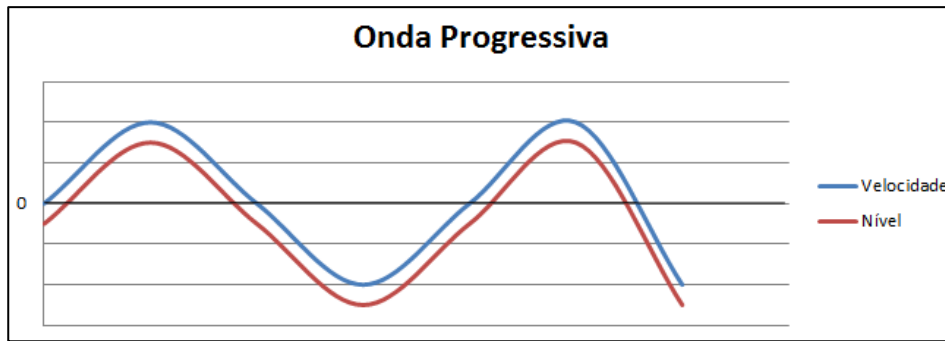


Figura 6. Exemplo idealizado de uma onda de maré progressiva. Fonte: Elaboração própria a partir de Dalbone, 2014.

O diagrama h-v representa a relação entre a elevação e velocidade da onda. A Figura 7 é um exemplo idealizado de diagrama de velocidade *versus* amplitude de maré, no qual a elipse configura uma onda estacionária e a linha uma onda progressiva. A elipse tracejada é a onda estacionária com contribuição progressiva de magnitude variável. Nas oscilações de magnitude de correntes, geralmente são utilizados valores positivos como períodos de vazante e os valores negativos como períodos de enchente, como no exemplo abaixo.

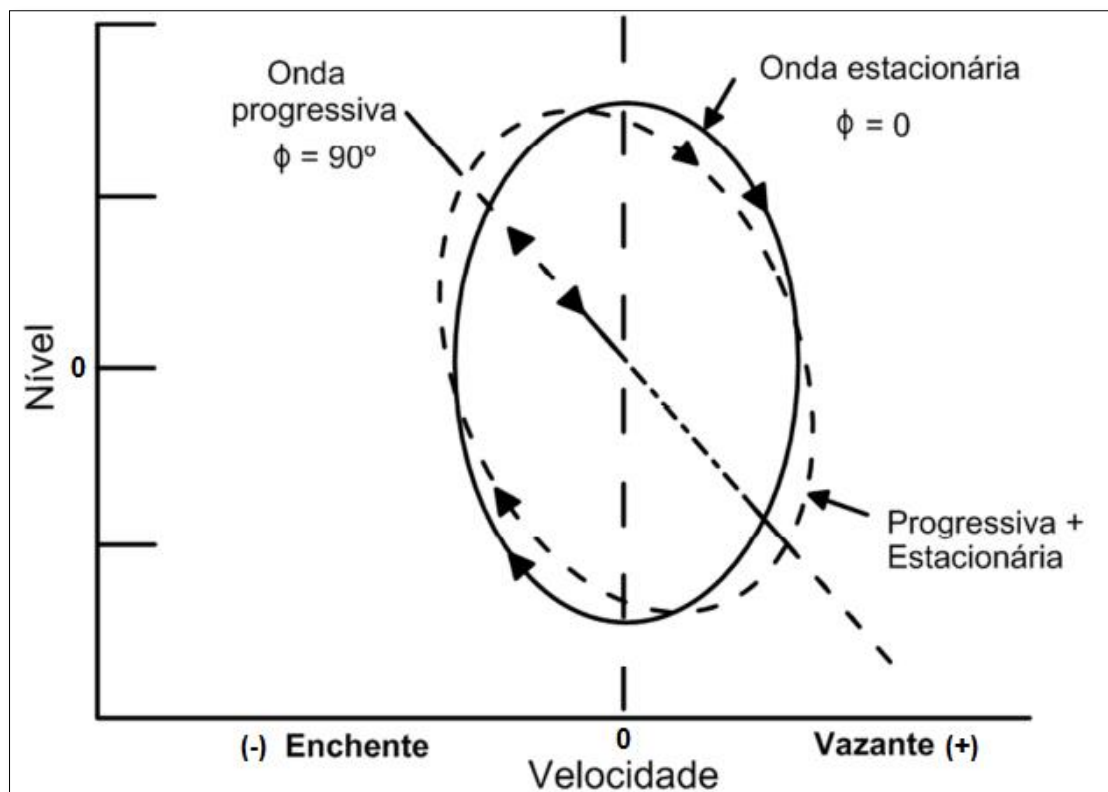


Figura 7. Exemplo idealizado de diagrama h-v de uma maré estacionária, uma maré progressiva e a combinação entre os dois tipos (adaptado de DALBONE,2014).

5.7. Hidrodinâmica de canais interconectados

Estuários e regiões costeiras podem consistir em complexos padrões geométricos que criam uma rede de canais interconectados influenciados pela maré se propagando por diferentes extremidades (WARNER, et al., 2003).

A circulação residual em uma rede de canais interconectados, que é influenciada pela maré a partir de extremidades opostas, é controlada pela fase temporal e pela assimetria espacial das duas forçante de maré. Um exemplo do exposto foi o estudo realizado por WARNER et al., (2003) na baía de San Pablo (Califórnia, EUA)(Figura 8), no qual os autores descrevem os processos físicos que controlam a circulação hidrodinâmica em canais interconectados no complexo de Napa Sonoma Marsh que sofre influência da maré entrando por diferentes extremidades. As marés assimétricas vindas de leste e oeste encontram-se no meio para produzir uma zona de convergência que controla o transporte de água e sedimentos na região.

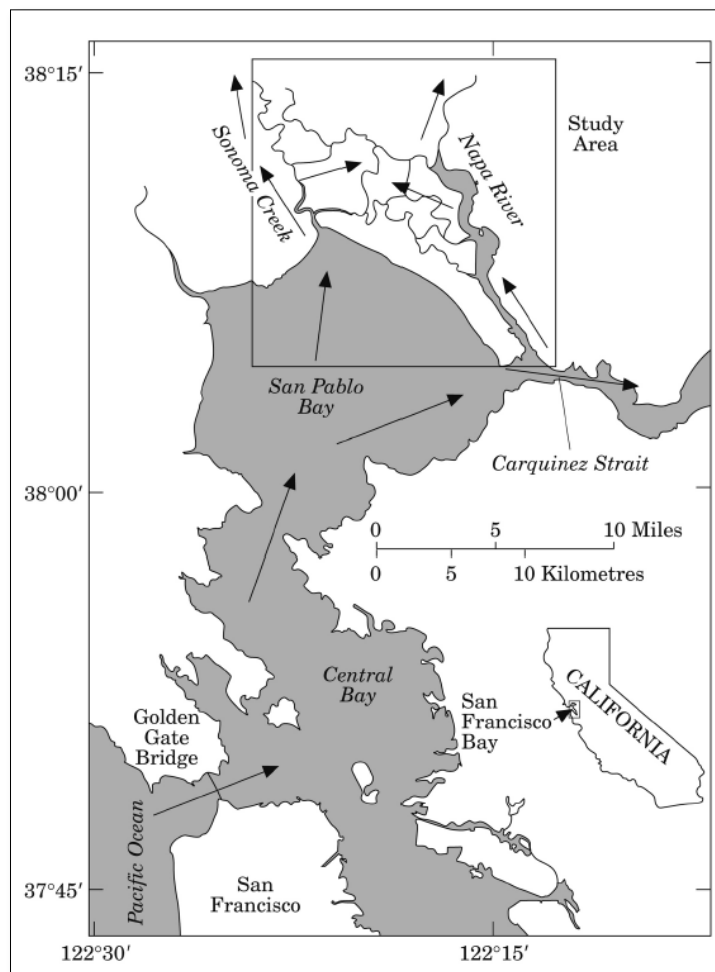


Figura 8. Baía de San Pablo (Califórnia, EUA)(WARNER et al., 2003).

Outro exemplo de canais interconectados influenciados pela maré é o estuário do Yangtze, na China (Figura 9), onde os principais efeitos da maré nesses canais são aumentar a resistência da descarga do rio em direção ao mar e aumentar a capacidade de transporte de sedimentos (WANG e DING, 2012).

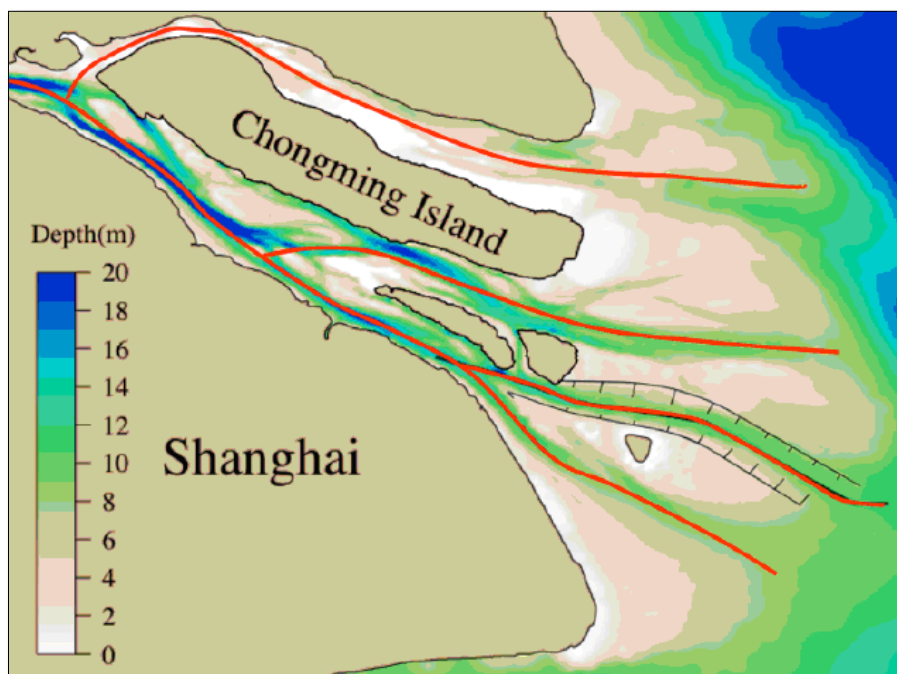


Figura 9. Estuário do Yangtze, China (WANG e DING, 2012).

Na conexão de canais dominados por marés, as ondas que se propagam em direção à montante dos canais afetam umas às outras e a energia da onda de maré pode se propagar em duas direções. As vazões dos rios agem redistribuindo e dissipando a energia da maré devido ao efeito de atrito do fluxo. BUSCHMAN et al., (2010) mostraram no estudo de caso de um delta na Indonésia, no sistema estuarino de Berau (Figura 10) , que até para forçantes de marés equivalentes em uma rede de canais, o fluxo residual pode ser resultado de diferenças na profundidade, comprimento, largura da convergência ou rugosidade do fundo entre os canais conectados na junção.

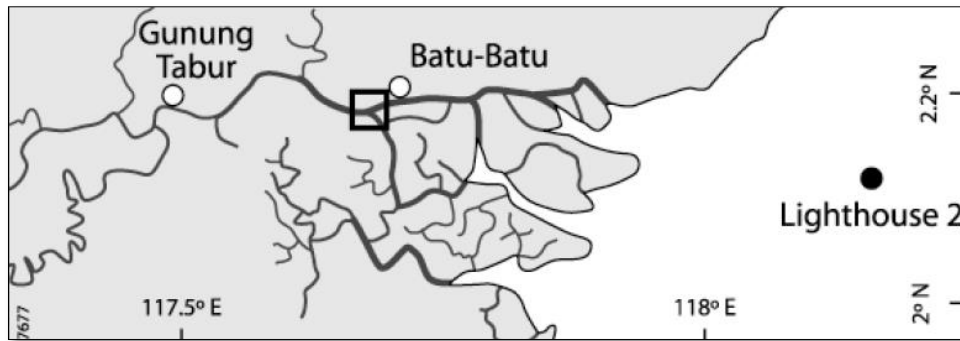


Figura 10. Delta de Berau na Indonésia (BUSCHMAN et al., 2010).

5.8. Importância do estudo da propagação da maré em canais interconectados

A hidrodinâmica de estuários é favorável à retenção de nutrientes tornando-o uma zona de atividade biológica intensa, transformando-o em viveiros de peixes e crustáceos (DUARTE e VIEIRA, 1997). Um conhecimento maior sobre esses complexos sistemas estuarinos poderá ajudar a explicar e entender melhor a migração de diversas espécies, como por exemplo, peixes e camarões.

Além disso, regiões estuarinas têm grande importância social, pois dispõem normalmente de quantidades de água capazes de assegurar o abastecimento (doméstico e/ou industrial) de uma cidade (DUARTE e VIEIRA, 1997). No entanto, a extensiva intrusão da cunha salina pode modificar as condições de potabilidade da água nos reservatórios subterrâneos, afetando a qualidade e continuidade do abastecimento de água em cidades próximas. Segundo Nguyen (2008), a intrusão salina é muito estudada em estuários de canal único, mas esse assunto ligado aos estuários de multicanais ainda não é bem desenvolvido. Por isso, o entendimento da hidrodinâmica local é importante para prever essas situações e possibilitar a procura de alternativas.

Zonas estuarinas são locais abrigados e propícios para construção de portos e conseqüentemente seus canais interconectados são rotas de navegação importantes para a economia regional e mundial. Um exemplo disso são os estuários dos rios Amazonas e Pará, que dão acesso à diversos portos e importantes vias navegáveis, como mostra a Figura 11.

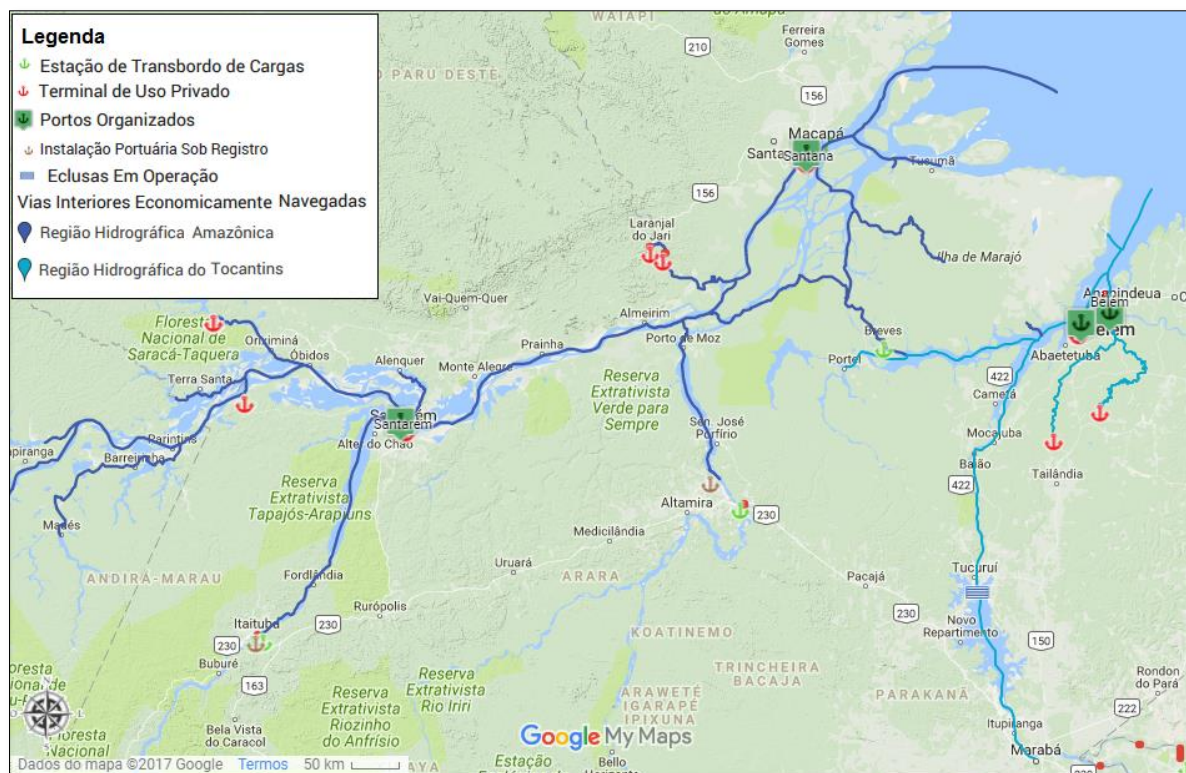


Figura 11. Elementos de Transporte Aquaviário (ANTAQ, 2016).

6. Metodologia

Os dados maregráficos disponíveis na região foram analisados com o objetivo de compreender a propagação da maré em canais interconectados nos estuários dos rios Amazonas e Pará e avaliar a influência da vazão fluvial e batimetria. Também foram analisados resultados preliminares de simulações hidrodinâmicas que estão sendo desenvolvidas no Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC) da Coppe/UFRJ com o modelo 2DH do Delft3D (DELTARES, 2014)). A seguir será apresentada a descrição dos métodos para a compreensão da análise de níveis de água, propagação da maré, descargas fluviais nos rios influenciados pela maré e do modelo. E a apresentação das características do modelo hidrodinâmico utilizado para as simulações de propagação da maré.

6.1. Dados de maré e vazão

Dados de maré são gerados a partir dos dados de nível d'água registrados em estações maregráficas instalados ao longo dos canais na região de estudo (localização na Figura 12) e os dados de descarga fluvial são provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA).



Figura 12. Mapa com a localização das estações maregráficas utilizadas. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Construiu-se uma base de dados composta por informações de nível d'água das estações maregráficas de interesse, fornecidos por diferentes órgãos: Diretoria de hidrografia e navegação (DHN- Marinha do Brasil), Projeto de Pesquisa HiBAM (Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica) e Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (Quadro 2).

Quadro 2. Informações dos dados maregráficos analisados.

| Estação maregráfica | Localização | | Períodos disponíveis | | Número de dias | Intervalo de Medição (min) | Fonte |
|------------------------|---------------|---------------|----------------------|------------|----------------|----------------------------|-------|
| | Latitude | Longitude | Início | Fim | | | |
| Breves - PA | 01° 41' 36" S | 50° 29' 36" W | 08/07/1977 | 28/02/1978 | 236 | 60 | DHN |
| Portusil - PA | 00° 43' 18" S | 50° 43' 18" W | 10/07/1977 | 10/02/1978 | 216 | 60 | DHN |
| Ponta grossa - PA | 01° 32' 00" S | 48° 45' 00" W | 26/11/1977 | 27/12/1977 | 32 | 60 | DHN |
| | | | 13/02/1978 | 31/03/1978 | 50 | 60 | |
| Maré Afuá - PA | 00° 09' 06" S | 50° 23' 30" W | 05/08/1974 | 05/09/1974 | 32 | 60 | DHN |
| | | | 27/08/2008 | 30/09/2008 | 35 | 15 | |
| | | | 21/10/2008 | 19/11/2008 | 30 | 15 | |
| | | | 15/10/2008 | 09/02/2009 | 115 | 15 | |
| | | | 30/05/2009 | 03/08/2009 | 66 | 15 | |
| Vila Curumú - PA | 00° 59' 55" S | 50° 50' 03" W | 29/08/2008 | 29/09/2008 | 32 | 15 | DHN |
| Vila Nazaré - PA | 00° 09' 30" S | 49° 09' 00" W | 23/08/1973 | 21/10/1973 | 60 | 60 | DHN |
| | | | 09/05/2006 | 18/06/2006 | 41 | 60 | |
| Curralinho - PA | 01° 49' 18" S | 49° 47' 30" W | 14/08/1973 | 14/09/1973 | 32 | 60 | DHN |
| Chaves - PA | 00° 08' 30" S | 49° 59' 18" W | 19/06/1966 | 20/07/1966 | 33 | 60 | DHN |
| Ilha de Mosqueiro - PA | 01° 09' 36" S | 48° 28' 36" W | 08/08/1973 | 07/09/1973 | 31 | 60 | DHN |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Estas estações foram selecionadas por serem as únicas localizadas na área de estudo: canal sul, Estreito de Breves e rio Pará. Como pôde ser observado no Quadro 2, as séries de dados não têm período de coleta simultâneo e alguns dos dados fornecidos são antigos, datando das décadas de 60 e 70.

Empregando a análise harmônica foram determinadas as componentes presentes na onda de maré e foi observada a evolução da componente M_2 no sentido da propagação entrando tanto pelo Canal Sul como pela foz do rio Pará. Na Figura 12 são mostradas as localizações das estações.

Do banco de dados da ANA foram retirados os dados diários de vazões dos principais afluentes dos rios Amazonas e Pará. Na Figura 13, estão representados

os últimos dez anos disponíveis da ANA de dados de vazão do rio Amazonas na cidade de Óbidos (1999 até 2008). A vazão do rio Amazonas é a mais expressiva da região e foi utilizada para analisar a maré e calibrar o modelo simplificado detalhado adiante.

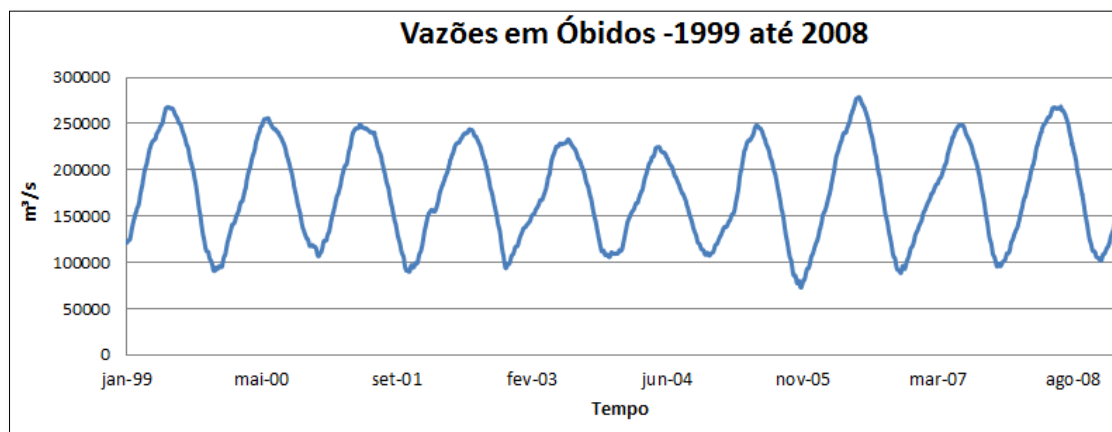


Figura 13. Descarga fluvial de 1999 até 2008 na cidade de Óbidos. Fonte: Elaboração Própria a partir de ANA, 2017.

A partir de uma análise estatística dos dados de vazão foram definidas faixas de valores mínimo, médio e máximo de descarga fluvial para serem utilizadas na análise dos dados maregráficos selecionando os períodos de seca, vazão média e cheia, que serão discutidos mais detalhadamente em tópicos posteriores.

6.2. Análise Harmônica (Série de Fourier)

O objetivo de se analisar uma série temporal no campo das frequências é separar as componentes das oscilações periódicas do que são flutuações randômicas e não periódicas. A análise de Fourier é um dos métodos mais comumente utilizados para identificar essas componentes periódicas em dados oceanográficos. Usando a análise de Fourier, é possível reproduzir o sinal original como uma soma de senos e cossenos de diferentes amplitudes e fases. No caso da análise de série de maré, não há a necessidade de se procurar por frequências que não sejam aquelas determinadas pelas forças astronômicas (SATO, 2010).

A análise harmônica é o método mais utilizado para previsão e análise da maré astronômica e foi aplicado no presente trabalho. Esse método, parte do princípio que a maré observada é um somatório de componentes de marés, que correspondem a um dos movimentos relativos entre a Terra, o Sol e a Lua. Essas componentes são

caracterizadas por períodos, frequências, amplitudes e fases, chamadas de constantes harmônicas que tem valores fixos para cada local (GODIN, 1999)

O método da análise harmônica trabalha com frequências pré-determinadas e, segundo GALLO (2004), quando uma componente não periódica modula a resposta do sistema, como no caso da propagação da maré em estuários com forte influência fluvial, aparece uma não-estacionaridade que não é contemplada nesse método. Isso gera resultados da análise harmônica com magnitudes anômalas nas amplitudes e nas fases.

No entanto, a análise harmônica será empregada nesse estudo como técnica preliminar para entender o comportamento e geração das constantes harmônicas ao longo do Estreito de Breves. A escolha foi baseada em função da informação disponível e a que a vazão fluvial do rio Amazonas apresenta um ciclo sazonal anual com mudanças não muito fortes (em relação à média) de um mês para outro.

Em termos de geração potencial de maré o nível d'água no instante t de uma maré observada pode ser expresso por (FRANCO, 1997):

$$\eta(t) = R_0 + \sum_{n=1}^{n=Q} R_n \cos(\omega_n t + \alpha_n)$$

Onde $\eta(t)$ é o nível da maré no instante t , R_0 é no nível médio de referência estabelecido, Q número de componentes harmônicas usadas, R_n é a amplitude, ω_n é a frequência angular e α_n é a fase, sempre referidos à componente n -ésima.

No Quadro 1, foram mostradas as principais componentes astronômicas e suas origens. Através do ajuste de mínimos quadrados dos registros maregráficos de cada local são determinadas as constantes harmônicas (PUGH, 1987).

A análise harmônica foi aplicada tanto nos dados de nível de água medidos quanto nos calculados pelo modelo simplificado. Essa técnica foi aplicada empregando as rotinas do programa T_TIDE (PAWLOWICZ, *et. al* 2002), no software MATLAB (THE MATHWORKS, INC.), que retornaram às componentes harmônicas para o registro de elevação dessa localidade e suas respectivas frequências, amplitudes e fases.

A determinação da amplitude e fase de cada componente para um determinado ponto é feita a partir do registro da maré nesse ponto, por tempo suficientemente

longo. Para maior confiabilidade dos dados foram consideradas séries temporais de em média 30 dias. No presente trabalho, as análises foram baseadas no comportamento da componente semidiurna lunar principal M_2 , que é a componente astronômica mais importante na região de estudo.

Em geral, os registros foram realizados durante a vazão média do rio Amazonas. Contudo, nas estações de Breves, Portusil, Afuá e Nazaré foi possível realizar a análise da maré para períodos de vazão máxima e mínima, na estação de Vila Nazaré para vazão máxima e em Ponta Grossa para vazão mínima. Na Figura 12 foram mostradas as localizações das estações, as quais, se utilizando da análise harmônica, foram determinadas as componentes presentes na onda de maré.

6.3. Análise das Vazões

Visando caracterizar as vazões mínimas (seca), médias e máximas (cheia), foi realizado um estudo estatístico das vazões do local de estudo. Os períodos tiveram como base os dados diários de vazões de 1999 até 2008 na cidade de Óbidos. A partir disso, foram calculadas as vazões média (175.000 m³/s), máxima média (250.000 m³/s) e mínima média (95.000 m³/s).

Tendo em vista dar mais liberdade para usar os dados de vazão na seleção dos períodos para fazer a análise harmônica, foi criada uma faixa de vazão e demarcado o período em que ocorre cada vazão durante o ano. Para determinar essas faixas de valores de vazão foi calculado um intervalo de confiança para vazão mínima, média e máxima. Em vez de estimar a vazão por um único valor, é dado um intervalo de estimativas prováveis. O quanto estas estimativas são prováveis será determinado pelo coeficiente de confiança $(1 - \alpha)$, para $\alpha \in (0,1)$. No caso, o nível de confiança é de 99%, com $\alpha=0,01$. No Excel, foi determinado o desvio padrão de cada vazão: $\sigma_{\text{méd}}= 9.169,45$, $\sigma_{\text{máx}}= 16.555,84$ e $\sigma_{\text{mín}}=10.648,85$. E sabendo o tamanho da amostra, 10 anos, foi possível calcular um intervalo de confiança de cada período de vazão usando o Excel, para a vazão média $\pm 7.468,97$ m³/s, para a vazão máxima $\pm 13.485,55$ m³/s e para a mínima $\pm 8.674,01$ m³/s (Quadro 3).

Quadro 3. Intervalos de vazão e respectivos meses.

| | Vazão (m ³ /s) | Intervalo de confiança | Faixa de vazão (m ³ /s) | | Meses | Período |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------|--|---------|
| | | | min | máx | | |
| Vazão mínima | 95.000 | ± 8.674,01 | 86.10 ³ | 104.10 ³ | Outubro a Dezembro | Seca |
| Vazão média | 175.000 | ± 7.468,97 | 169.10 ³ | 185.10 ³ | Janeiro a Março e Agosto a Setembro | Média |
| Vazão máxima | 250.000 | ± 26.5467,55 | 238.10 ³ | 266.10 ³ | Abril a Julho | Cheia |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Após o cálculo das vazões, foram determinados os intervalos de vazão e selecionados os meses que representam os períodos de seca, cheia e vazão média (Figura 14). Os intervalos de vazão ficaram resumidos a:

- **Vazão mínima (86-104)10³ m³/s** - Outubro a Dezembro;
- **Vazão média (169-185) 10³ m³/s** - Janeiro a Março e Agosto a Setembro;
- **Vazão máxima (238-266) 10³ m³/s** - Abril a Julho.

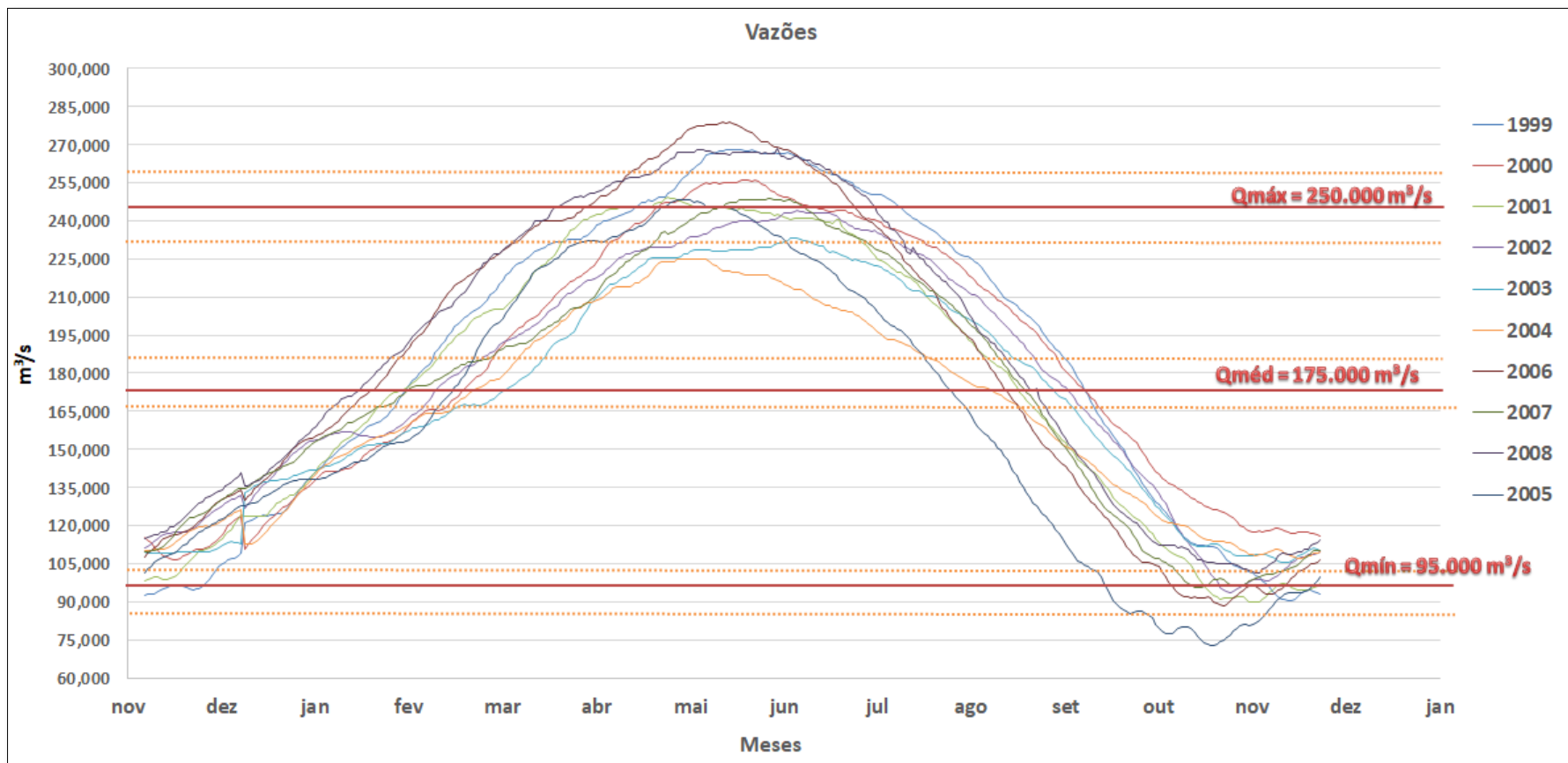


Figura 14. Descarga fluvial de 1999 até 2008 na cidade de Óbidos. Fonte: Elaboração Própria a partir de ANA, 2017.

6.4. Celeridade

A celeridade é a velocidade de propagação da onda. Para o cálculo da velocidade de deslocamento da onda de maré, pode-se tanto fazer o cálculo da celeridade de uma onda em água rasa através da profundidade média de cada trecho, como fazer a diferença de fase para a estimativa do tempo e assim calcular sua velocidade média.

A celeridade é a velocidade com a qual a onda se desloca, ou seja, uma determinada parte da onda passa por um ponto fixo. A celeridade da onda ou velocidade de propagação é dada pela razão entre o comprimento da onda e seu período, como mostrado na equação abaixo:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\sigma}{k}$$

Em águas rasas, a relação é $h/L < 1/20$, onda de maré tem um comprimento de onda muito grande em relação à profundidade média e pode-se aproximar o termo da tangente hiperbólica na equação de dispersão da onda;

$$\sigma^2 = (gk)(kh) \Rightarrow \sigma^2 = gk^2h \Rightarrow \frac{\sigma^2}{k^2} = C^2 = gh.$$

$$C = \sqrt{gh}$$

Em condições ideais, considerando o efeito do atrito desprezível, a velocidade de propagação da onda é expressa pela raiz da gravidade multiplicada pela batimetria.

Outra forma de calcular a velocidade de entrada da maré é através diferença de fase entre as estações. Com a diferença de fase entre as estações, têm-se a duração da propagação da onda de maré entre dois pontos e com a distância entre esses dois pontos, tem-se a velocidade.

Um período (360°) da componente M_2 tem 12,42 horas. Sabendo disso, a duração da onda de maré pode ser calculada pela diferença de fase da componente M_2 através da seguinte fórmula:

$$360^\circ - \text{-----} - 12,42 \text{ horas (período da } M_2)$$

$$x^\circ - \text{-----} - \Delta t \text{ horas}$$

$$\Delta t = \frac{(Fase\ 1 - Fase\ 2)^\circ * 12,42 \text{ horas}}{360^\circ}$$

A distância do trecho entre os dois pontos é conhecida. Com isso, finalmente a velocidade pode ser calculada pela fórmula:

$$Velocidade = \frac{Distância}{Duração}$$

6.5. Modelo simplificado

Para auxiliar o estudo da propagação da onda de maré, foi utilizado um modelo hidrodinâmico simplificado desenvolvido no LDSC utilizando-se o módulo 2DH do programa Delft3D (DELTA RES, 2014). O modelo com geometria simplificada tem características e forçantes aproximados ao que ocorrem no complexo estuarino estudado. Foram simulados cenários com a maré e a vazão fluvial agindo como forçantes hidrodinâmicas. A maré foi representada pelas componentes M_2 e S_2 , cujas amplitudes e fases tiveram como referência a análise harmônica realizada nas estações Ilha de Mosqueiro (FP0) e Vila Nazaré (CS0).

O modelo simulado é composto por uma grade com dois canais paralelos de 15 km de largura identificados como CS (Canal Sul) e FP (Foz do Pará), conectados por um canal de 1,5 km de largura, identificado como B (Breves) (Figura 15). Ao longo dos canais foram colocados pontos simulando estações fictícias e algumas coincidentes com estações maregráficas reais existentes no local de estudo.

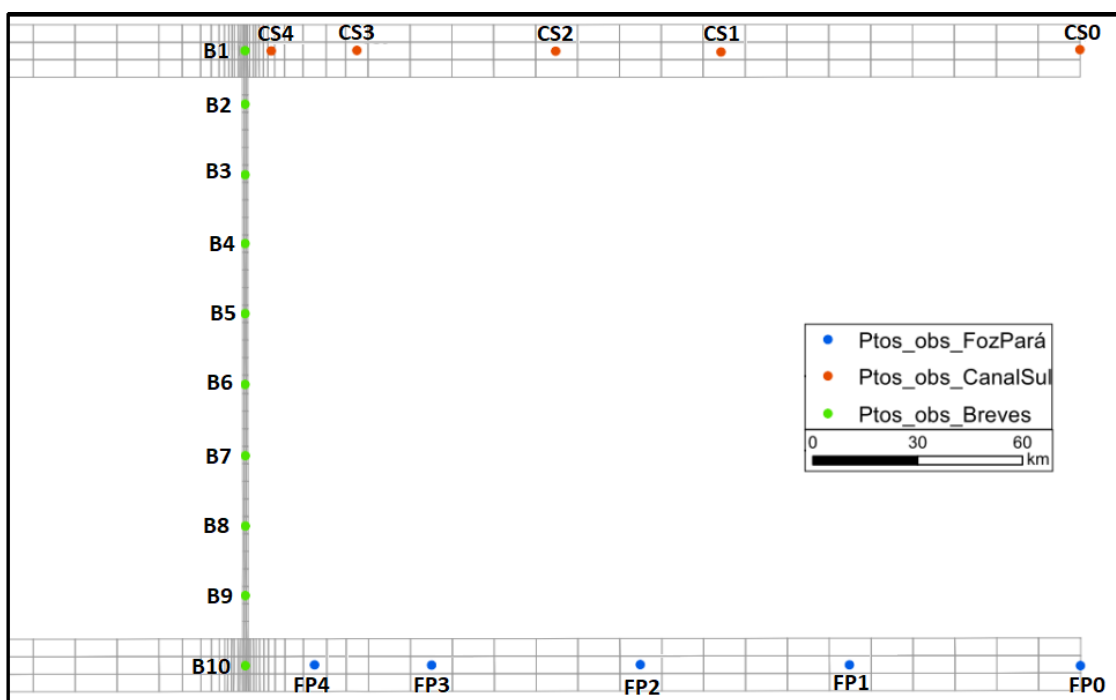


Figura 15. Grade computacional do modelo. Os pontos indicam as estações de observação no modelo. Fonte: BALTAZAR, 2017.

O Quadro 4 abaixo mostra a relação espacial entre os pontos do modelo simplificado e as estações maregráficas disponíveis na área de estudo.

Quadro 4. Relação dos pontos do modelo simplificado com as estações maregráficas espacialmente correspondentes, quando existentes.

| Pontos do Modelo | Estações maregráficas | Localização |
|-------------------------|------------------------------|--------------------|
| CS0 | Vila Nazaré | Canal Sul |
| CS1 | Chaves | Canal Sul |
| CS2 | Afuá | Canal Sul |
| CS3 | - | Canal Sul |
| CS4 | - | Canal Sul |
| B1 | Portusil | Estreito de Breves |
| B2 | - | Estreito de Breves |
| B3 | Vila Curumú | Estreito de Breves |
| B4 | - | Estreito de Breves |
| B5 | - | Estreito de Breves |
| B6 | - | Estreito de Breves |
| B7 | - | Estreito de Breves |
| B8 | - | Estreito de Breves |
| B9 | Breves | Estreito de Breves |
| B10 | Baía das bocas | Estreito de Breves |
| FP4 | - | Rio Pará |
| FP3 | Currálinho | Rio Pará |
| FP2 | - | Rio Pará |
| FP1 | Ponta Grossa | Rio Pará |
| FP0 | Ilha de Mosqueiro | Rio Pará |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Nas simulações, para a vazão dos rios Tocantins e Amazonas foi considerado a base mensal climatológica proveniente de dados da ANA (ANA, 2017). Foram usados os valores da vazão zero, média e máxima do rio Tocantins diretamente para o canal Pará. No entanto, os dados de vazão do canal sul foram calculados a partir das

porcentagens da vazão total do Rio Amazonas que seguem somente pelo canal sul em cada período: 76% na cheia e 71% vazão média (GALLO, 2004) (Quadro 5).

Quadro 5. Dados de Vazão do modelo simplificado.

| Vazão (m³/s) | Média | Máxima |
|---|--------------|---------------|
| Rio Amazonas | 180.000 | 250.000 |
| Porcentagem em relação à vazão total do rio Amazonas (Óbidos) | 71% | 76% |
| Canal Sul | 127.800 | 190.000 |
| Rio Tocantins (Canal Pará) | 11.000 | 38.500 |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

A média total da batimetria nos três canais é de aproximadamente 15 m. No entanto, para verificar a importância da batimetria no sistema, existe um cenário com a batimetria média real de cada canal no modelo simplificado. Neste cenário, as batimetrias utilizadas foram de 16,44 m, 13,5 m e 13,92 m nos canais Sul, Breves e Pará, respectivamente. A Figura 16 mostra a média da batimetria entre cada estação maregráfica e o mapa da Figura 17 ilustra esses trechos de onde foram feitas as médias da batimetria para compor os três trechos finais.

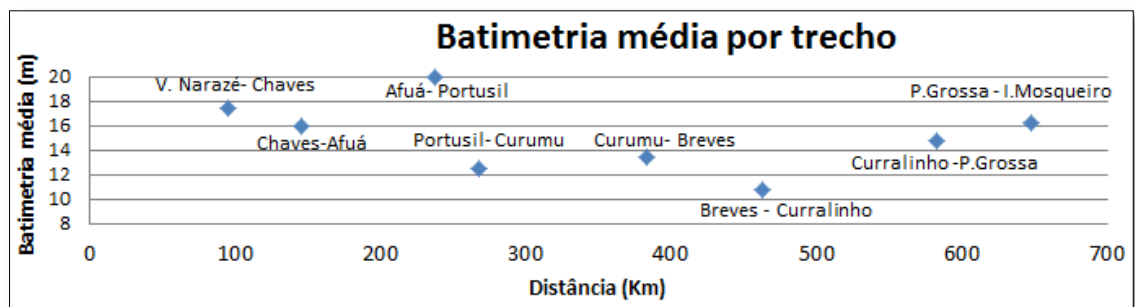


Figura 16. Batimetria média ao longo do canal entre as estações maregráficas. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

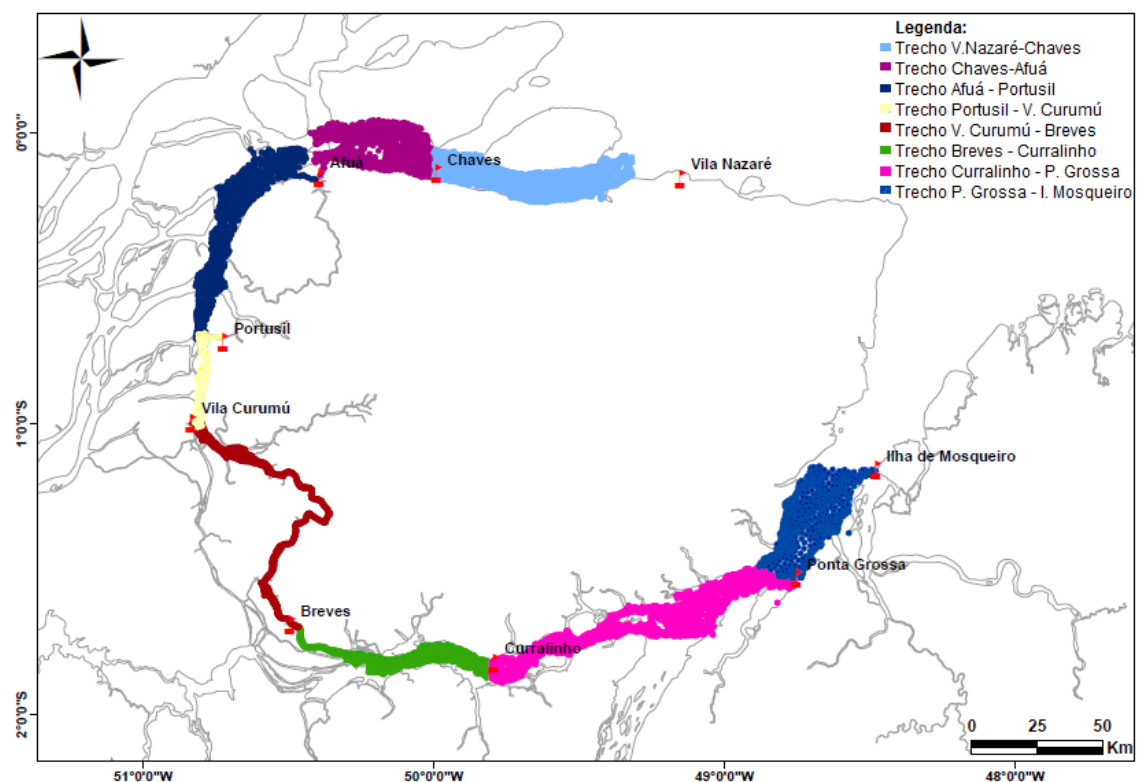


Figura 17. Trecho entre as estações maregráficas para o cálculo da batimetria média de cada canal. Fonte: BALTAZAR, 2017.

Foram simulados quatro cenários de propagação da maré com o modelo simplificado, variando as condições de vazões (zero, média e máxima) e batimetria (homogênea ou média nos canais). O quadro a seguir ilustra as condições de cada cenário (Quadro 6).

Quadro 6. Características dos cenários simulados no modelo simplificado.

| Cenário | Maré | Vazão | Batimetria |
|---------|------|-------|------------|
|---------|------|-------|------------|

| | | | |
|------------|----------------|--------|------------------|
| C1a | M2 e S2 - real | Média | Homogênea 15 m |
| C1b | M2 e S2 - real | Zero | Homogênea 15 m |
| C2a | M2 e S2 - real | Média | Média nos canais |
| C2b | M2 e S2 - real | Máxima | Homogênea 15 m |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Os resultados obtidos com cenário C2a foram comparados aos dos dados para avaliar o comportamento da maré entrando tanto pelo canal sul como pela foz do rio Pará. Além disso, o cenário C2a é a representação dos dados no modelo (ambos tem vazão média e a batimetria do C2a é a média real de cada canal) e essa comparação foi utilizada para verificar a confiabilidade do modelo.

Os cenários C1a e C2a foram comparados a fim de verificar a influência da batimetria na evolução da maré pelos canais. O que difere esses cenários é a profundidade dos canais, pois no C1a é constante (15 m) e no C2a é diferente em cada canal 16,44 m no Sul, 13,5 m em Breves e 13,92 m no Pará. A vazão é a mesma para os dois cenários.

Para verificar se há influência da vazão na propagação da maré no local de estudo foram comparados os cenários C1a, C1b e C2b. Isso é possível, pois cada cenário tem uma vazão diferente e batimetria homogênea de 15 m. O cenário C1b não tem vazão e será o cenário de referência comparando com o C2a de vazão média e C2b de vazão máxima.

7. Resultados e Discussões

Os parâmetros investigados foram as fases e amplitudes da maré, a celeridade da onda de maré e a variação da maré de acordo com a vazão fluvial e a batimetria dos canais.

7.1. Fluxos Residuais

Através dos gráficos de velocidade residual do modelo no cenário C2a (Figura 18 e Figura 19), é possível saber o sentido do fluxo residual de água no cenário com as características básicas do Estreito de Breves. A velocidade residual representada é a média dos três meses que o modelo foi rodado. Neste cenário, é possível perceber que as velocidades médias residuais no canal Sul são maiores que no canal Pará e o sentido do fluxo de água no canal de Breves é do canal Sul para o Pará.

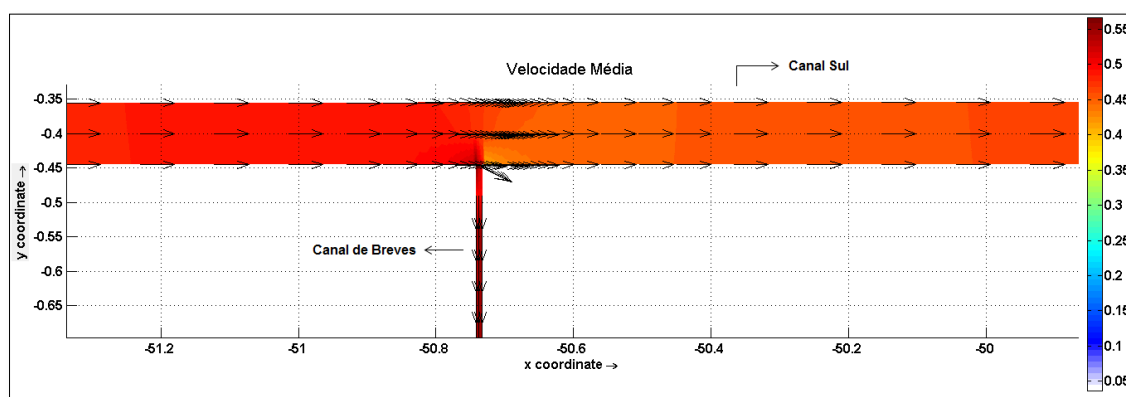


Figura 18. Velocidade Residual Canal Sul. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

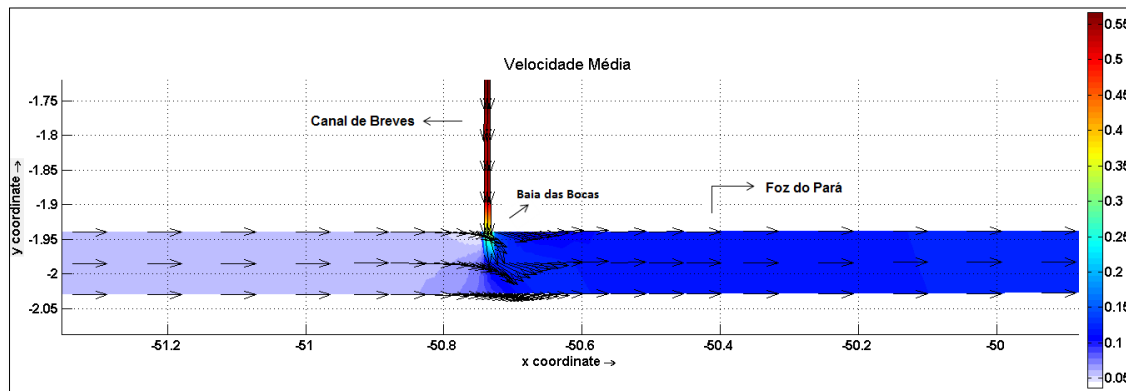


Figura 19. Velocidade Residual Foz Pará. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Essa situação também é observada através da análise dos dados de vazão do dia 19/06/2007 na seção de Baía das Bocas. Essa estação é representada no modelo pelo ponto B10, que se localiza na ligação do canal de Breves com a Foz do Pará. Os valores positivos são para sentido da foz rio Pará, enquanto os negativos na direção contrária (Figura 20). No gráfico é possível notar que duração do fluxo no sentido de vazante (positivo) é maior que de enchente (negativo), indicando que o fluxo residual segue no sentido foz do rio Pará, assim como na Figura 19. O fluxo residual na

estação de Baia das bocas é de aproximadamente $6.683 \text{ m}^3/\text{s}$ no sentido da foz do rio Pará.

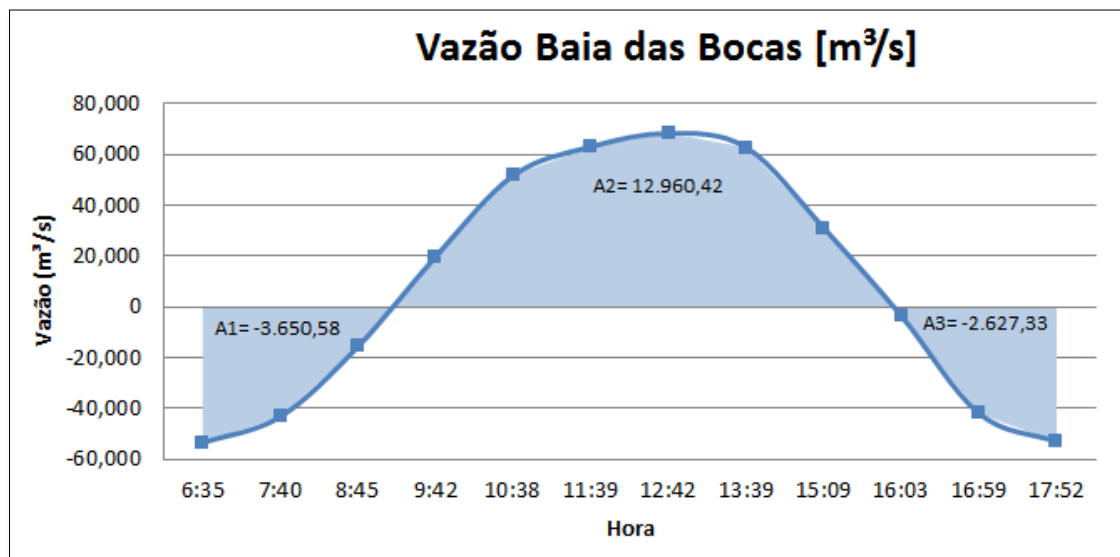


Figura 20. Vazão em Baia das Bocas. No gráfico estão especificados os valores das áreas, que são as vazões dos períodos de enchente (A1 e A3) e vazante (A2). Fonte: Elaboração Própria, 2017.

7.2. Amplitude

A análise da amplitude dos dados permite ter uma avaliação da distribuição relativa de energia nos diferentes pontos ao longo canal. O modelo no cenário C2a apresentou o mesmo padrão dos dados.

Na Figura 21 observa-se que a amplitude da maré diminui ao se propagar pelo canal Sul e Pará. Contudo, quando entra pelo canal de Breves, as ondas de maré convergem e a amplitude aumenta até o ponto B5.

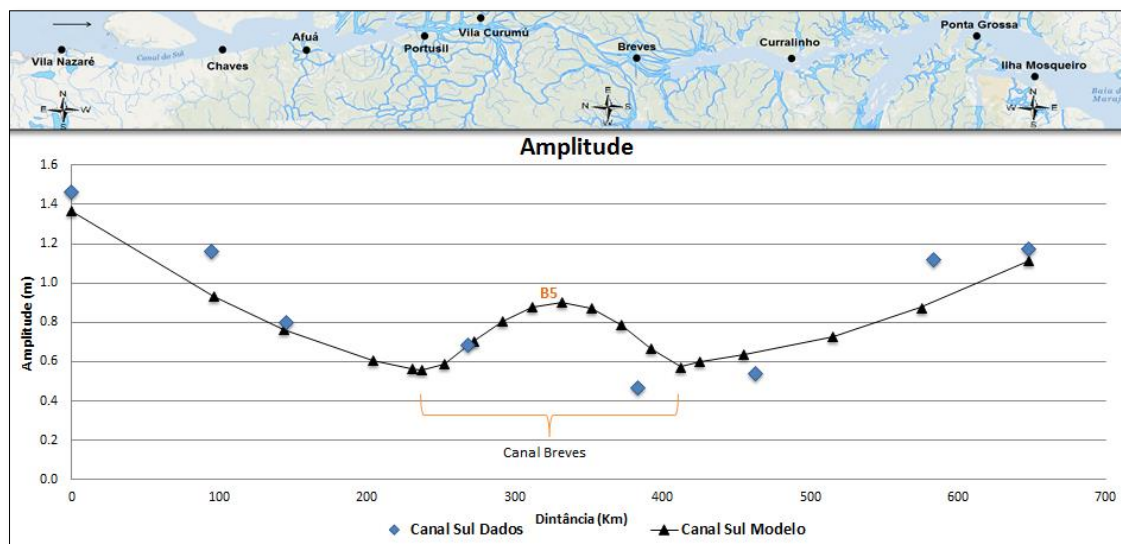


Figura 21. Gráfico comparativo da amplitude da componente M_2 da maré a partir da análise harmônica dos dados (azul) e do modelo C2a (preto). Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Essa redução na amplitude nos canais Sul e Pará pode ser explicada pelo amortecimento da maré durante sua propagação devido ao atrito de fundo, vazão fluvial e geometria dos canais. Já o aumento da amplitude ao entrar pelo canal de Breves, pode ser indicativo de reflexão da onda de maré ou ocasionado pelo estreitamento abrupto do canal.

Essa tendência é ilustrada no cenário C2a do modelo (Figura 22) com um diagrama de Hovmöller ao longo dos canais durante dois dias de sizígia. Isto é, ao entrar no canal de Breves, a onda de maré eleva o nível até o ponto de encontro onde sofre interferência da onda que converge vindo em sentido contrário. Nota-se também que em um dia há duas cristas e duas cavas de onda, característica de uma maré semidiurna.

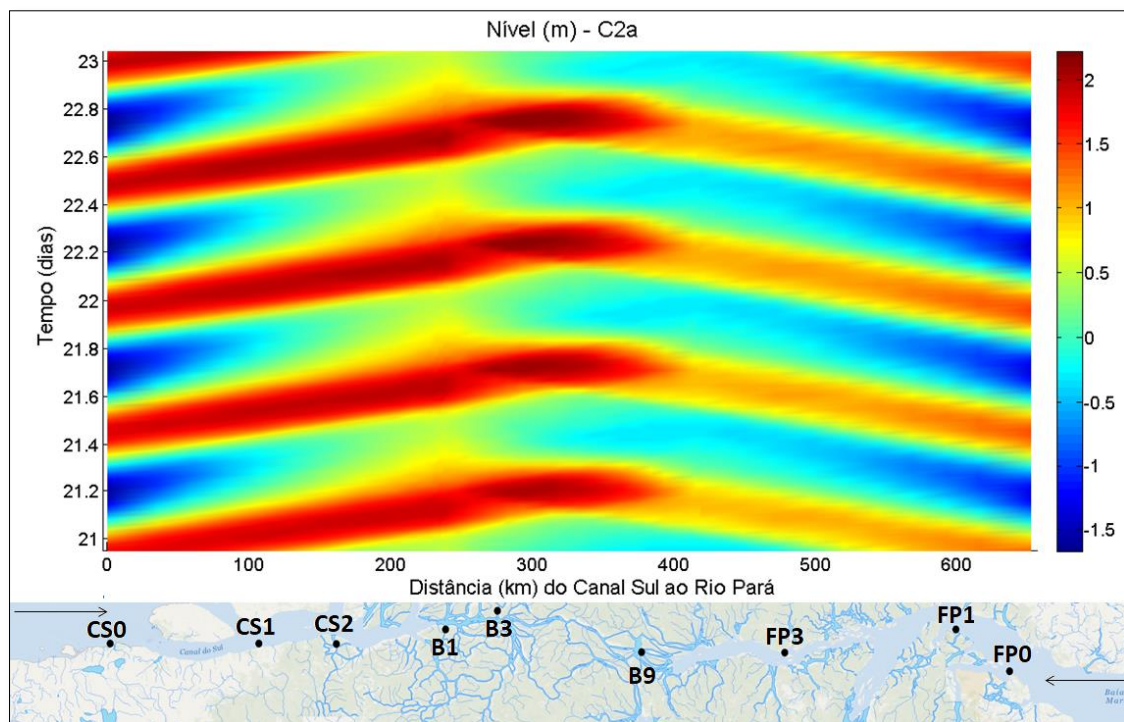


Figura 22. Diagrama Hovmöller (tempo pela distância): Amplitude no cenário C2a. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Como dito anteriormente, amplitude da onda de maré sofre influência da vazão do rio e na Figura 23 pode-se observar essa influência através da análise harmônica do modelo simplificado para cenários com diferentes vazões e mesma batimetria. A variação da amplitude ao longo dos canais com vazões distintas segue o mesmo padrão explicado anteriormente. Além disso, pode-se observar que a magnitude da amplitude de maré diminui com o aumento da vazão do rio, ou seja, quanto maior a vazão fluvial, maior é amortecimento da onda de maré.

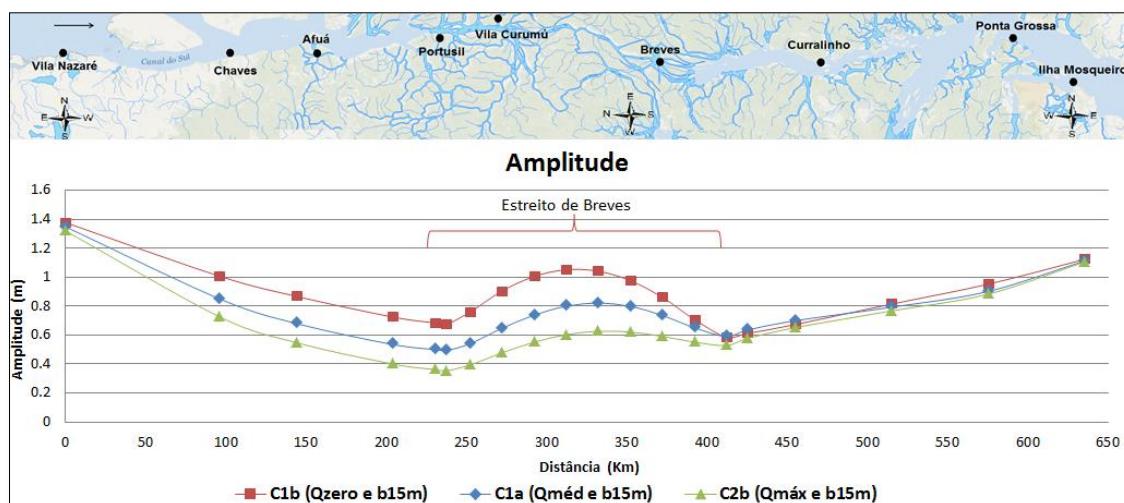


Figura 23. Gráfico comparativo da amplitude da componente M_2 da maré a partir da análise harmônica dos cenários C1b, C1a e C2b com mesma batimetria nos três canais (15 m) e vazões diferentes. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

No gráfico acima também nota-se que a variação da amplitude em relação à vazão é maior no canal Sul do que no canal Pará. Isso é justificado pelo fato da vazão do rio Tocantins ser uma ordem de grandeza menor que o do rio Amazonas e não interferir sensivelmente na propagação da maré pelo canal Pará.

Os resultados mostram que a penetração da maré nos estuários é afetada pela vazão fluvial, sendo responsável pelo amortecimento das diferentes componentes. Tais resultados corroboram com os estudos de WANG e DING (2012) e BUSCHMAN et al. (2010), que as vazões dos rios agem redistribuindo e dissipando a energia da maré devido ao efeito de atrito do fluxo.

7.3. Estudo das Fases

A diferença de fase é a diferença, expressa em ângulo ou tempo, entre duas ondas que tenham mesma frequência e em referência ao mesmo ponto no tempo. As fases da componente M_2 foram obtidas através da análise harmônica das séries temporais de cada estação maregráfica. A partir desses dados, realizou-se o acompanhamento da evolução da onda dessa componente ao longo dos canais, iniciando o percurso na foz do Canal Sul, seguindo pelo Estreito de Breves e saindo pela Foz do Pará e com a maré se propagando pela direção contrária, iniciando pela Foz do Pará (Figura 24).

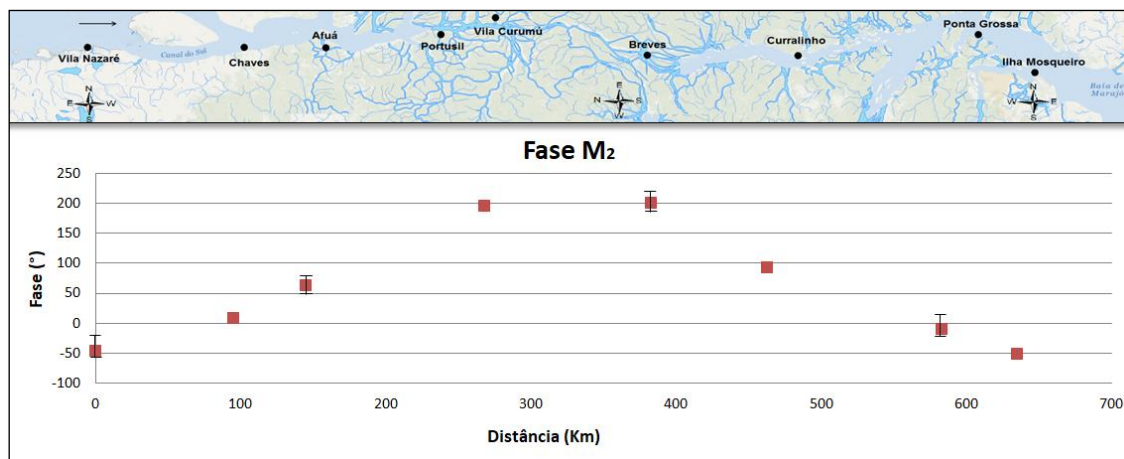


Figura 24. Fase da componente M_2 (dados). Dados de vazão média com dispersão em função da vazão (seca e cheia) nas estações onde há essa informação. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

O gráfico foi plotado com os dados da fase de M_2 durante a vazão média e em algumas estações onde há informações de dados nos períodos de seca e cheia foi colocado uma barra de dispersão. Além dos dados de vazão média, as estações de Breves, Afuá e Portusil contém dados em período de seca e cheia, enquanto a estação de Vila Nazaré somente de cheia e Ponta Grossa somente de seca.

No entanto, nos dados a variação na fase da M_2 não foi tão significativa para mudança no padrão de propagação da onda com a variação da vazão. O Quadro 7 mostra os resultados da comparação entre as fases da componente M_2 nas estações com diferentes vazões: média, máxima e mínima. Confrontando a fase na vazão média com a máxima e a mínima, a maior diferença é de $13,4^\circ$, aproximadamente 27 minutos, com a onda de maré se propagando mais rápido durante a vazão média do que na máxima, devido ao maior amortecimento da onda pela maior vazão fluvial.

Gallo (2004) identificou que em estações localizadas no trecho superior do rio Amazonas os atrasos são maiores que no trecho inferior, da ordem de 20° (aproximadamente 40 minutos) em função do aumento de vazão. Isto é, a vazão interfere mais na propagação da maré em trecho mais a montante no rio do que mais próximo da foz.

Quadro 7. Fases da componente M_2 determinadas na análise harmônica com vazões nas estações onde há disponibilidade de dados em diferentes vazões.

| Estação | Fase MED (°) | Fase MAX (°) | Fase MIN (°) | Diferença de Fase MED-MAX (min) | Diferença de Fase MED-MIN (min) |
|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Vila Nazaré | 313.43 | 323.53 | - | 20.91 | - |
| Chaves | - | 7.71 | - | - | - |
| Maré Afuá | 61.27 | 69.93 | 63.95 | 17.93 | 5.55 |
| | 62.68 | | | 15.01 | 2.63 |
| Portusil | 353.41 | 348.22 | 359.47 | 10.74 | 12.54 |
| | 349.77 | | | 3.21 | 20.08 |
| Vila Curumú | 194.81 | - | - | - | - |
| Breves | 197.09 | 191.29 | 196.89 | 12.01 | 0.41 |
| | 204.66 | | | <u>27.68</u> | 16.08 |
| Curralinho | - | 92.89 | - | - | - |
| Ponta Grossa | 350.64 | - | 347.58 | - | 6.33 |
| Ilha Mosqueiro | 308.01 | - | - | - | - |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Através da análise da Figura 24 é possível identificar o encontro das marés no Estreito de Breves entre as estações de Breves e Vila Curumú. Nesse trecho há a descontinuidade do crescimento da fase causado pela convergência das ondas de maré provenientes de sentidos opostos. Isto é, entre essas duas estações do canal de Breves o tempo de deslocamento da onda de maré proveniente do canal sul aumenta até encontrar a onda que entra através do canal Pará, ocorrendo então uma interferência na evolução da onda ao longo do canal de Breves.

Contudo, a distância entre essas duas estações é de aproximadamente 115 km e não há outras estações maregráficas entre esses pontos. Portanto, para poder avaliar mais precisamente o local de encontro das marés os resultados do modelo simplificado com o cenário C2a (Figura 25) foram analisados, demonstrando boa representatividade dos dados.

No modelo, o ponto de encontro das ondas de maré localiza-se no ponto de observação B5, que apresenta o maior valor de fase antes do decaimento, ou seja, onde há a descontinuidade do crescimento da fase da M_2 . O ponto de observação B5 se encontra a aproximadamente 40 km da estação de Vila Curumú (B3) e 80 km de Breves (B9).

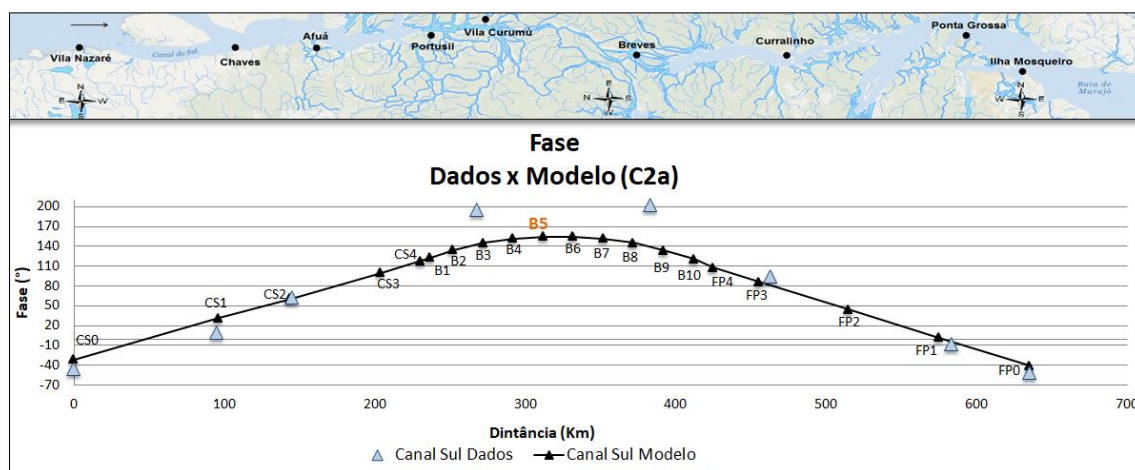


Figura 25. Gráfico comparativo da fase da componente M_2 a partir da análise harmônica dos dados (azul) e do modelo C2a (preto). Fonte: Elaboração Própria, 2017.

A fase das componentes da onda de maré sofre influência da vazão do rio, assim como a amplitude. Os gráficos da Figura 26 são os resultados da análise harmônica do modelo simplificado para cenários com diferentes vazões e mesma batimetria. Pode-se observar que quanto maior a descarga do rio, maior é a fase da componente M_2 , ou seja, maior o tempo de deslocamento da onda entre as estações.

Além disso, esse comportamento é mais acentuado nos canais Sul e Breves, que sofrem influência da vazão do rio Amazonas, como detalhado no gráfico da diferença de fase entre vazões (Figura 26).

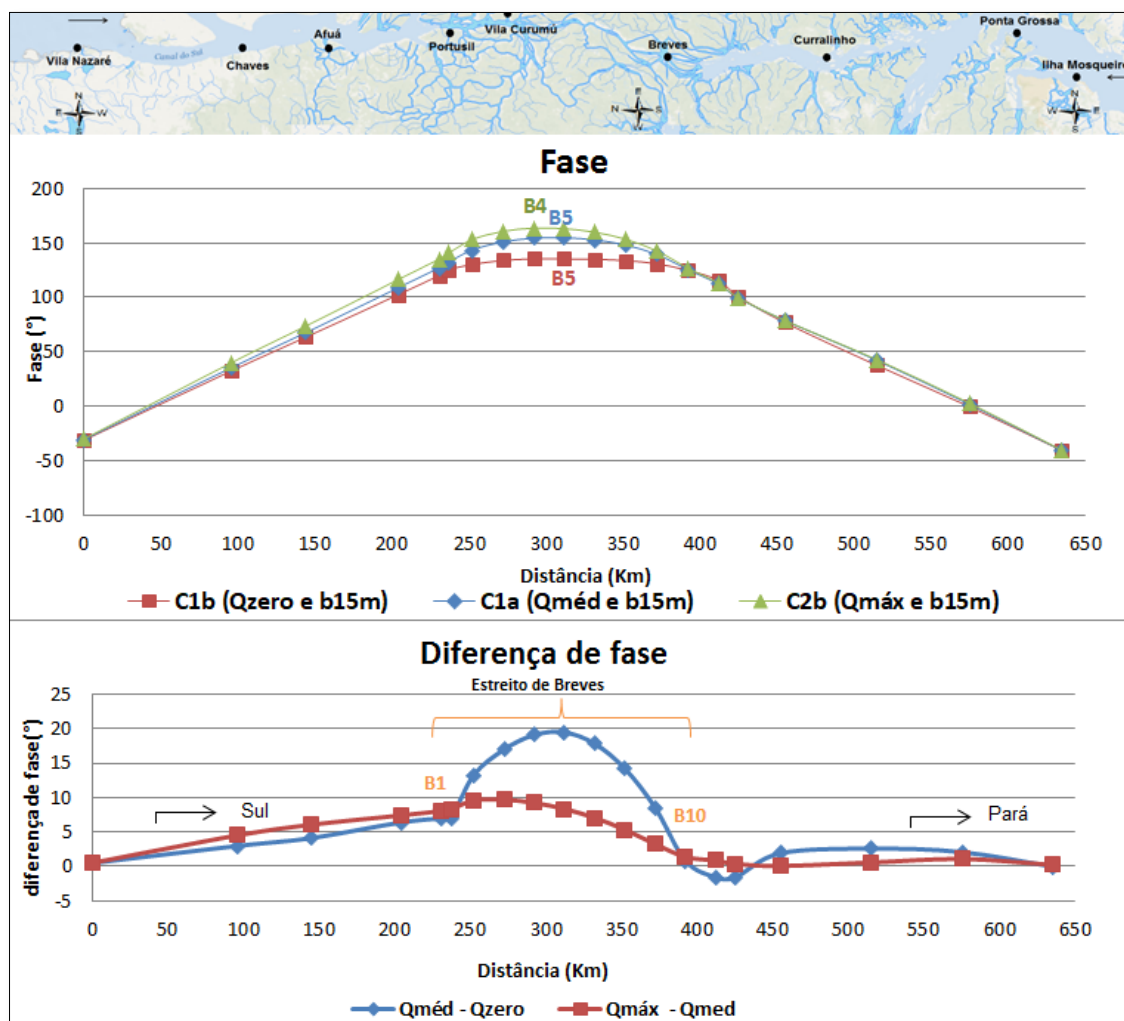


Figura 26. Gráficos comparativos da fase da componente de maré M_2 a partir da análise harmônica dos cenários C1b, C1a e C2b com mesma batimetria nos três canais (15 m) e vazões diferentes. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Na Figura 26 foi marcado o ponto de observação que apresenta o maior valor de fase antes do decaimento para cada cenário. Houve variação no ponto de encontro das ondas de maré entrando no Estreito de Breves por lados opostos. Com uma vazão maior, o ponto de encontro da maré se desloca do B5 para o B4. Isso é, quanto maior as descargas fluviais de ambos os lados, o ponto de encontro da maré se aproxima de Vila Curumu, em direção ao canal Sul, que sofre maior amortecimento da maré imposta pela maior descarga fluvial do rio Amazonas.

7.4. Celeridade

Para o cálculo da velocidade de deslocamento da onda entre as estações, utilizou-se tanto a diferença de fase para a estimativa do tempo, quanto a profundidade média de cada trecho, calculando a celeridade de uma onda em água rasa, que não leva em consideração o atrito.

Foram calculadas as velocidades de entrada da maré pelos dois lados do Estreito de breves a partir da diferença de fase de M_2 entre as estações. Na Figura 27 são comparadas as velocidades nos 8 trechos do canal sul até a foz do Pará, calculadas através da base de dados. A celeridade da maré entrando pelo canal sul é 38,97 km/h (de Vila Nazaré até Vila Curumú) e entrando pela Foz do Pará é 37,81 km/h (Ilha mosqueiro até Breves). Os dados mostram que pelo canal Sul a propagação da onda de maré é mais rápida do que pela foz do Pará. Isso, possivelmente, deve-se à diferença de profundidade média dos canais, como o canal Sul é mais profundo, a onda se propaga mais rápido.

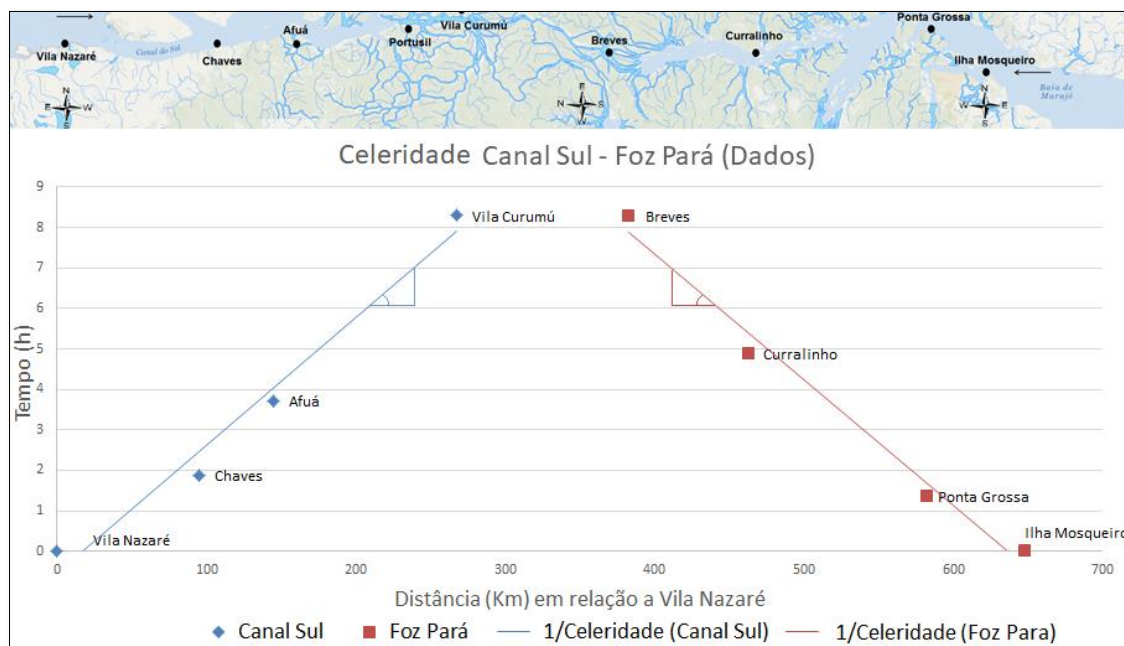


Figura 27. Celeridade de entrada da maré (Dados). A inclinação da reta entre duas estações é o inverso da celeridade. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

O diagrama Hovmöller (Figura 22) apresentado anteriormente, também é um gráfico de tempo por distância e sua inclinação é o inverso da celeridade. A partir desse diagrama também pode ser notado que a celeridade da onda de maré é maior no canal Sul, pois a inclinação em relação ao eixo horizontal ligeiramente é menor que na foz do Pará.

No Quadro 8 encontra-se o resumo das velocidades encontradas em cada cenário do modelo simplificado e dos dados.

Quadro 8. Resumo das velocidades e celeridades em cada cenário no Canal Sul e no Pará.

| Cenário | Dados | | C2a | | C1a | |
|---|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | Canal Sul | Canal Pará | Canal Sul | Canal Pará | Canal Sul | Canal Pará |
| Trecho | | | | | | |
| Velocidade média (km/h) | 38.97 | 37.81 | 44.50 | 41.26 | 42.14 | 43.72 |
| Batimetria (m) | 16.44 | 13.92 | 16.44 | 13.92 | 15.00 | 15.00 |
| Celeridade \sqrt{gh} (km/h) | 45.72 | 42.07 | 45.72 | 42.07 | 43.67 | 43.67 |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Os valores da celeridade calculados através da batimetria são normalmente maiores que os calculados através da diferença de fase. Isso se deve ao fato da fórmula da celeridade não levar em consideração a vazão contrária do rio, o atrito de fundo e nem a geometria do canal. Por exemplo, considerando a profundidade média do canal Sul como sendo de 16,44 metros, a velocidade de propagação de uma onda de maré, sem atrito, seria $C = gh^{1/2} = 45.72$ km/h e a calculada através diferença de fase dos dados, 14% menor (38,97 km/h).

A velocidade calculada a partir da diferença das fases da M_2 representa apenas um valor da velocidade média entre dois pontos, uma vez que as condições geométricas e de fundo do canal mudam continuamente, pode-se dizer que de uma forma geral, há uma concordância razoável com os valores calculados através da batimetria, principalmente através do modelo.

Os resultados do modelo simplificado com o cenário C2a (onde a maré é real e batimetria é a média dos canais) estão representados na Figura 28. O modelo representou bem as velocidades médias em cada seção, acompanhando a tendência dos dados. Mesmo com velocidades médias maiores, a maré entrando pelo canal Sul se propaga mais rápido que pela Foz do Pará, 44,50 km/h e 41,26 km/h, respectivamente.

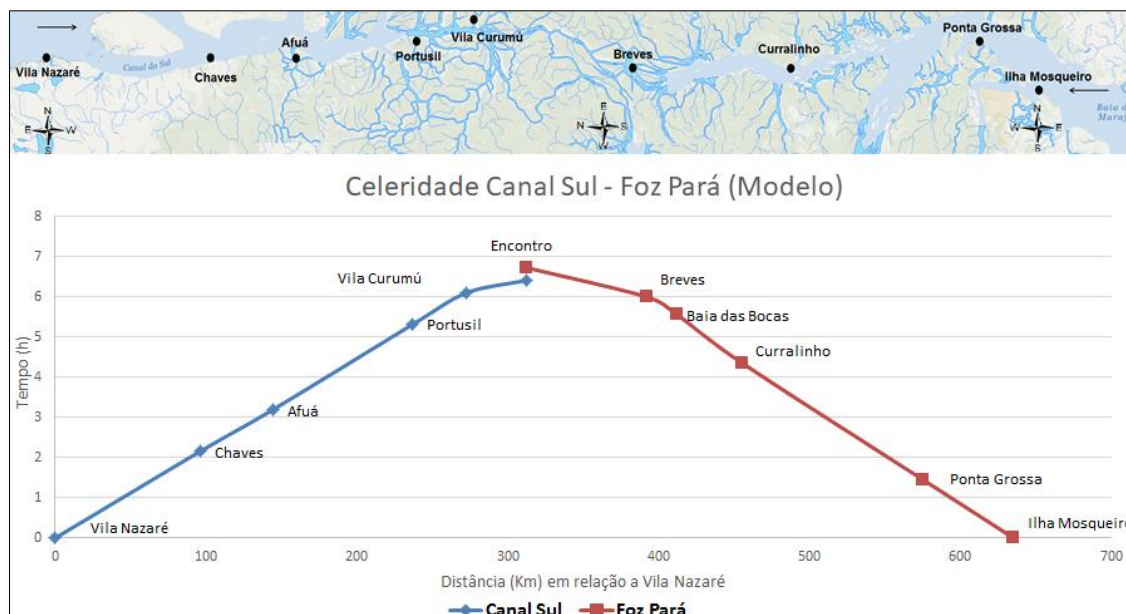


Figura 28. Celeridade de entrada da maré (Modelo). A inclinação da reta entre duas estações é o inverso da celeridade. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

A diferença nas velocidades de propagação da onda de maré entre os canais pode ser influenciada pela batimetria do canal. Para verificar a relação da velocidade de entrada da maré com a profundidade, foi realizada uma comparação entre o cenário C1a (com batimetria média de 15 m em todos os canais) e o cenário C2a (com batimetria de 16.44 m no canal sul, 13.5 m no Estreito de Breves e 13.92 m na foz do Pará), ambos com a vazão média.

No gráfico a seguir (Figura 29), quanto maior o ângulo θ em relação ao eixo x, menor a velocidade. A velocidade da onda pelo canal sul no cenário C1a é menor que no C2a, pois no cenário C1a a batimetria foi reduzida. A velocidade no cenário C1a no canal Pará é maior comparada ao C2a, pois no C1a houve o aprofundamento do canal. Ou seja, quanto maior a profundidade do canal, maior é a velocidade de propagação da onda.

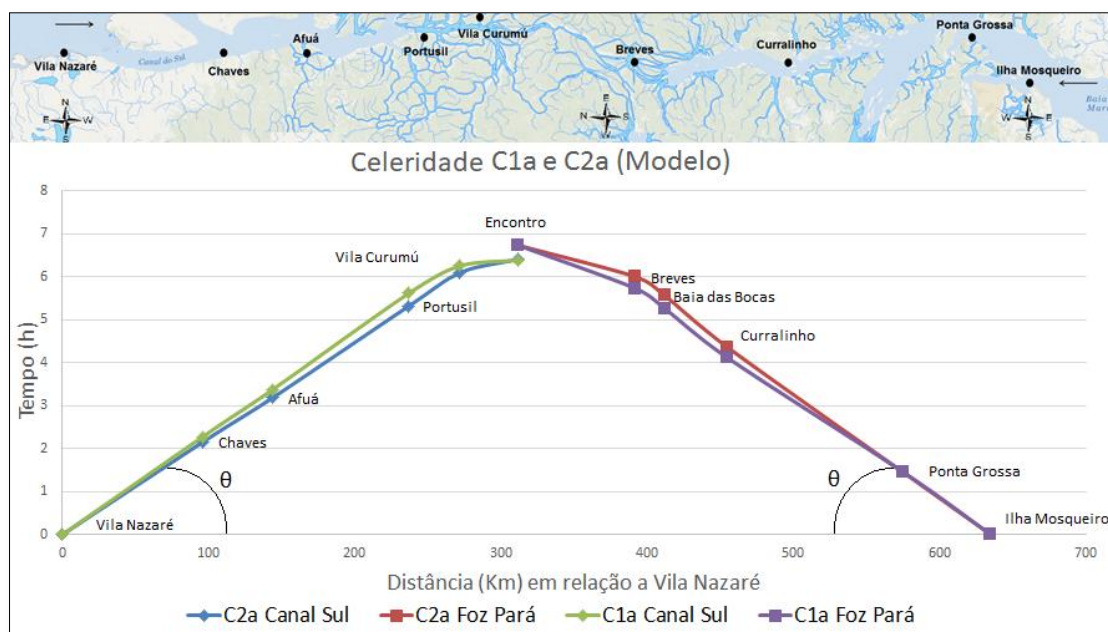


Figura 29. Celeridade de entrada da maré - Comparação do cenário C1a e C2a do Modelo. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Com relação à influência da variação de vazão, o Quadro 9 compara os diferentes cenários simulados. Como pode ser observado, quando não é considerada a vazão nos rios a velocidade de propagação da maré é a maior. Nota-se que quanto maior a vazão, menor a velocidade, indicando o amortecimento da maré pelo fluxo de água do rio.

Quadro 9. Resumo das velocidades e celeridades em cada cenário no Canal Sul e no Pará com vazões diferentes.

| Cenário | C1b (Q zero) | | C1a (Q méd) | | C2b (Qmáx) | |
|---|--------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| | Canal Sul | Canal Pará | Canal Sul | Canal Pará | Canal Sul | Canal Pará |
| Trecho | | | | | | |
| Velocidade média (km/h) | 43.90 | 44.45 | 42.14 | 43.72 | 40.23 | 43.78 |
| Batimetria (m) | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 |
| Celeridade \sqrt{gh} (km/h) | 43.67 | 43.67 | 43.67 | 43.67 | 43.67 | 43.67 |

Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Essa tendência pode ser observada nos canais Sul e Pará, mas é mais significativa no canal Sul, cuja diferença entre vazão média máxima e zero é de 3,67 km/h, enquanto no canal Pará essa diferença é de apenas 0,67 km/h. Isso pode ser explicado pelo fato da variação entre as vazões mínimas e máximas no rio Tocantins

ser menor do que no rio Amazonas, numericamente a variação entre a magnitude da vazão na seca e na cheia é 3,6 vezes maior no Amazonas que a do Tocantins. Além disso, a vazão do rio Tocantins é de uma ordem de grandeza menor que o do rio Amazonas. Logo, a vazão do rio Tocantins não interfere na propagação da maré pelo canal Pará, tanto quanto a do rio Amazonas interfere na propagação da maré pelo canal Sul.

7.1. Nível e Velocidade

A velocidade encontrada é a magnitude da corrente média na coluna d'água em determinado ponto do canal. O sinal é a direção, no qual os valores positivos são considerados períodos de vazante, enquanto os valores negativos são considerados períodos de enchente.

Através da análise vetorial, é possível saber a magnitude e direção do vetor resultante da corrente em cada estação maregráfica. No modelo simplificado os canais são estritamente direcionados em Leste-Oeste e Norte-Sul, facilitando essas análises. As componentes da velocidade com valores relevantes para o canal Sul (CP2) e foz do Pará (FP2) são apenas as em x e para os pontos no canal Breves (B2, B4, B5 e B9 na direção norte-sul) as componentes em y.

Para os gráficos de nível e velocidade e os diagramas h-v foram escolhidos os seguintes pontos do modelo:

- FP2 e CS2 que se localizam no meio dos canais, foz do Pará e canal sul respectivamente;
- B2 e B9 são os primeiros pontos entrando no canal de Breves, B2 entrando pelo Canal Sul e B9 pelo canal Pará;
- Ponto de encontro da maré: B5 nos cenários C1a e C1b e B4 no C2b.

Nas Figuras 30, 31 e 32 os dados de nível e velocidade foram plotados em relação ao tempo com vazões zero, média e máxima, respectivamente.

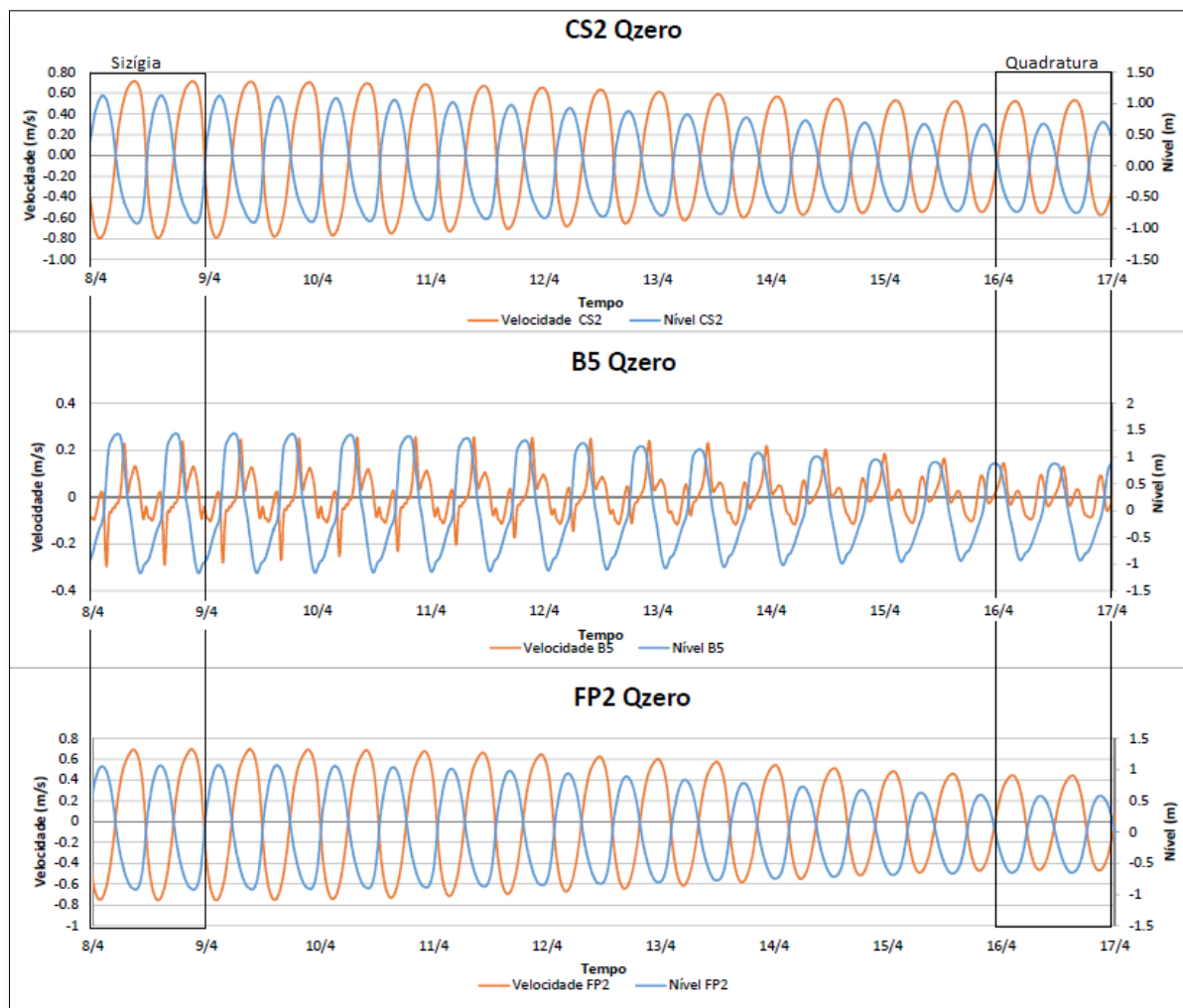


Figura 30. Gráficos de nível e velocidade em um ponto de cada canal sem vazão. Foram destacados os dias de maior sizigia e de menor quadratura. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

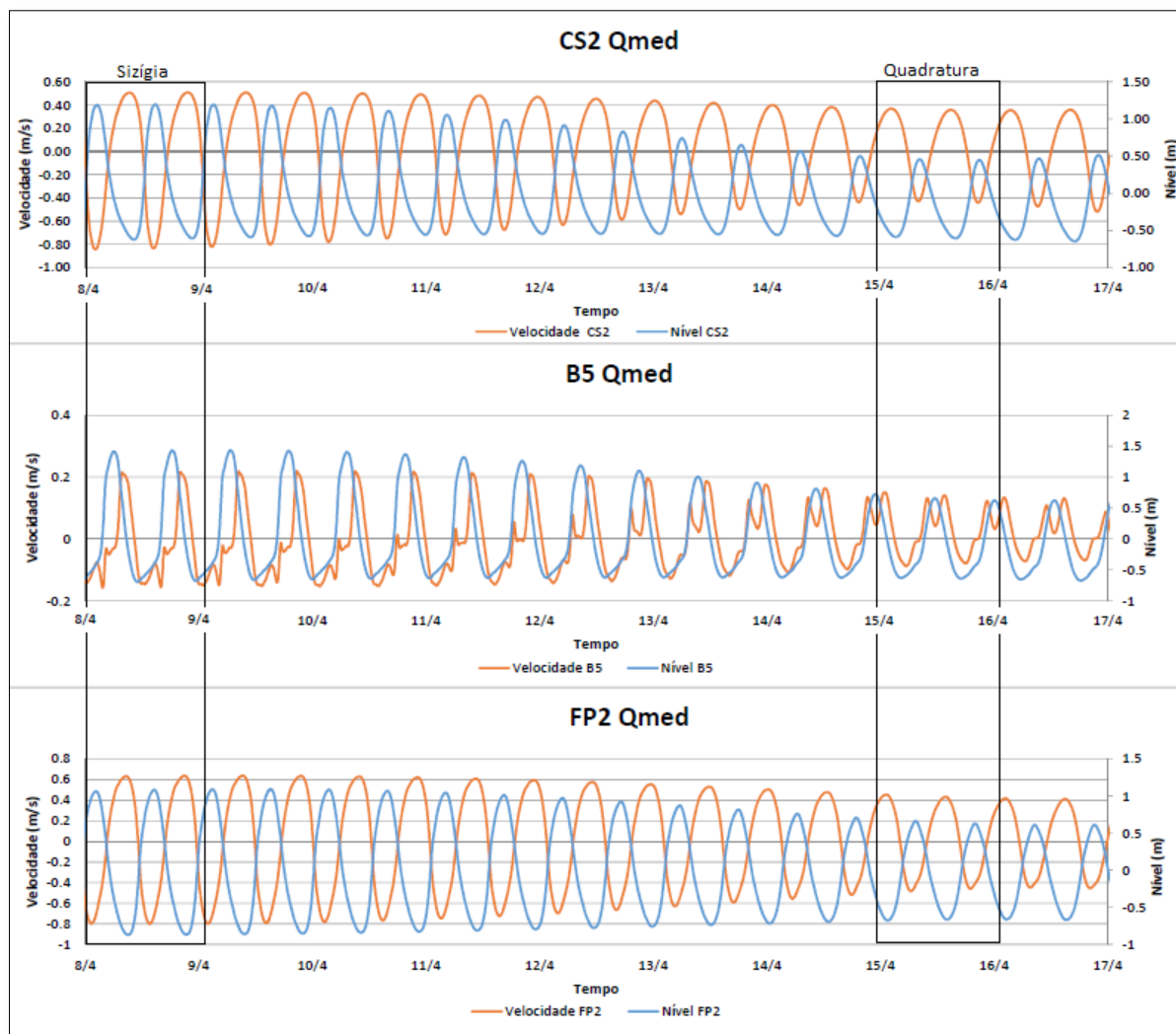


Figura 31. Gráficos de nível e velocidade em um ponto de cada canal com vazão média. Foram destacados os dias de maior sizígia e de menor quadratura. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

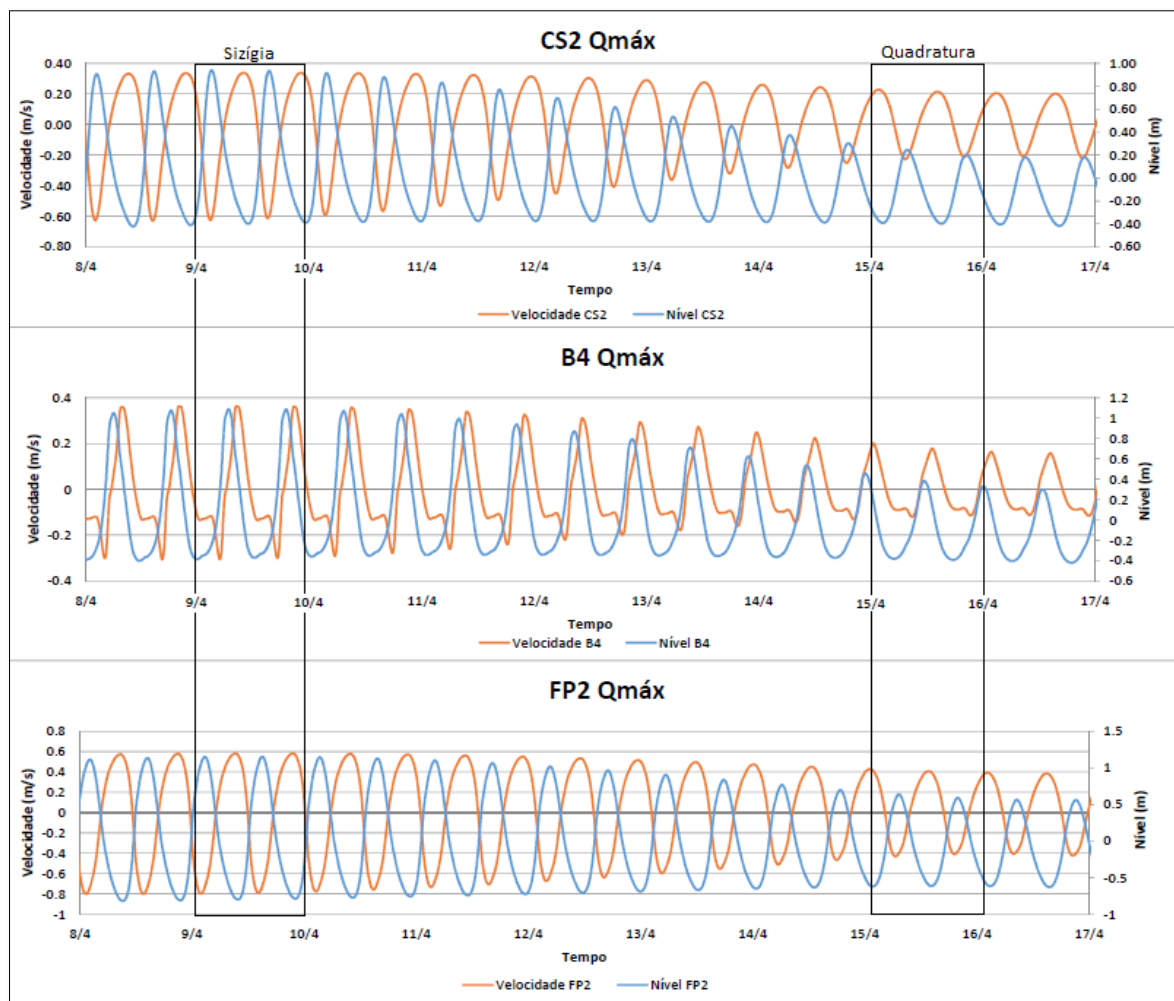


Figura 32. Gráficos de nível e velocidade em um ponto de cada canal com vazão máxima. Foram destacados os dias de maior sizígia e de menor quadratura. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Nos gráficos de nível e velocidade em relação ao tempo, pode-se notar em todas as vazões a mesma tendência. Os pontos do canal Sul e Pará seguem a definição de uma onda progressiva, na qual a velocidade de corrente tem máxima magnitude na baixamar e na preamar. Essa onda com caráter progressivo ocorre porque a energia da onda de maré é dissipada pelo atrito antes da reflexão que provavelmente ocorre quando as duas ondas de maré se encontram. No ponto de encontro de cada cenário, as velocidades são próximas a zero, tanto na preamar quanto na baixamar, o que indica uma onda com comportamento predominantemente estacionária. Observa-se também que há maior deformação da amplitude de maré no ponto de encontro no cenário sem vazão. Esses gráficos se iniciam em período de sizígia e terminam em

quadratura, isso explica redução da magnitude dos níveis e velocidade ao longo do tempo.

Os diagramas h-v foram feitos para o dia de maior sizígia e menor quadratura do período que o modelo foi rodado (1/03/2016 á 30/04/2016).

Na Figura 33 estão representados os diagramas h-v para todas as vazões, em sizígia e quadratura, dos pontos CS2, encontro (B4 ou B5) e FP2. Em sizígia a magnitude do nível de maré é maior que em quadratura. Observa-se nos pontos dos canais Sul e Pará as características de uma onda progressiva, ou seja, máxima magnitude da velocidade na baixamar e na preamar. Nos pontos de encontro (B4 e B5), apesar da elipse estar distorcida, também é possível notar as características que tendem à uma onda estacionária, com velocidades iguais ou próximas à zero na preamar e baixamar.

Nos cenários sem vazão, as velocidades são nulas tanto na preamar como na baixamar. Nos cenários com vazão (média e máxima) as velocidades são próximas à zero na preamar e na baixamar. Essa diferença ocorre provavelmente devido a influência da vazão.

Na Figura 34 estão representados os diagramas h-v dos primeiros pontos de entrada da maré no canal de Breves, B2 pelo Canal Sul e B9 pelo canal Pará. Nota-se uma onda de maré com características mistas, uma onda estacionária com contribuições progressivas. Isso indica a ocorrência da reflexão da onda de maré no ponto de encontro, pois, como dito anteriormente, a resposta das marés à dissipação da energia, antes e após a reflexão, é uma onda estacionária com contribuição progressiva de magnitude variável.

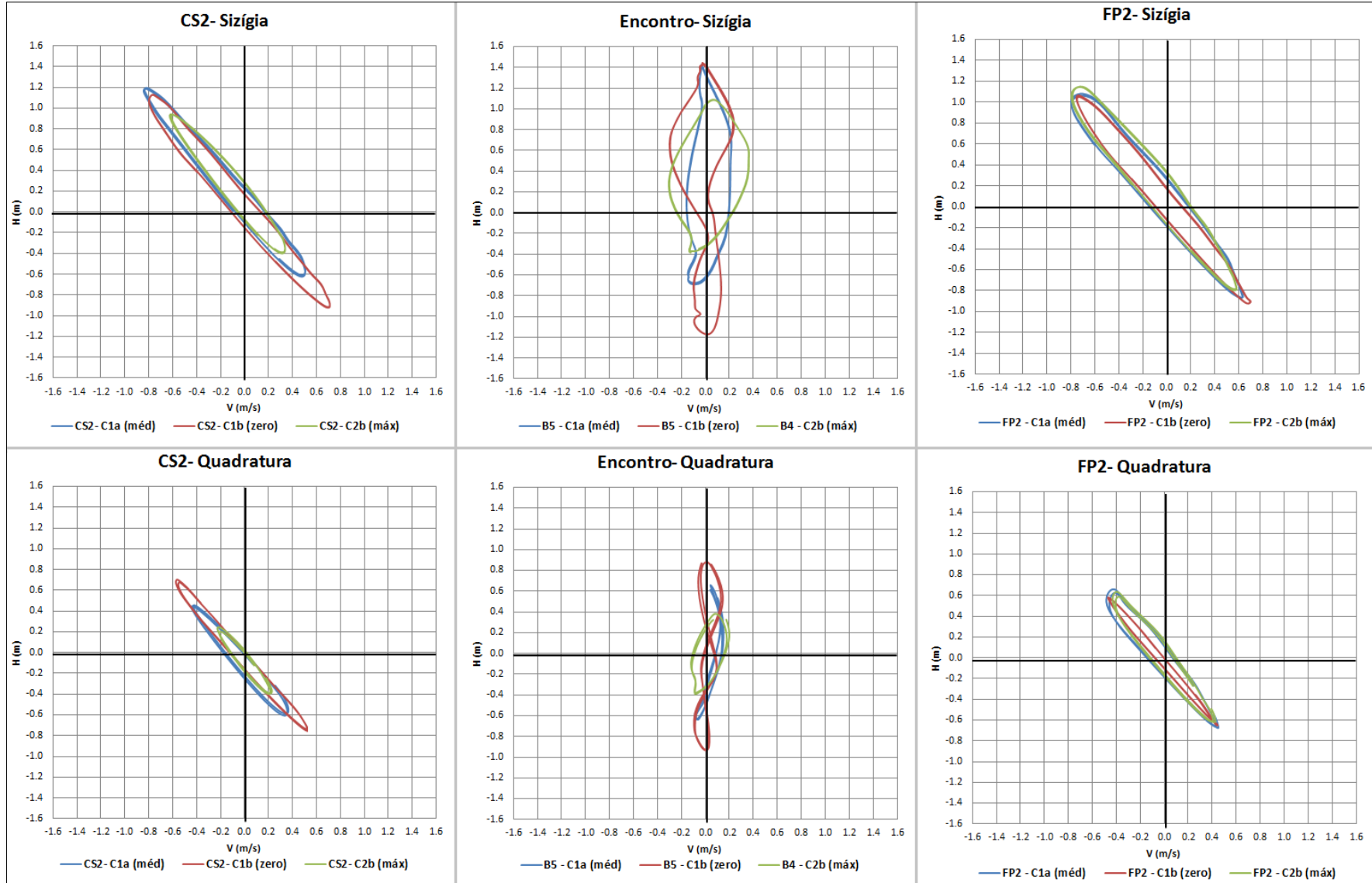


Figura 33. Diagramas h-v nos períodos de sizígia e quadratura em cada canal com diferentes vazões. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

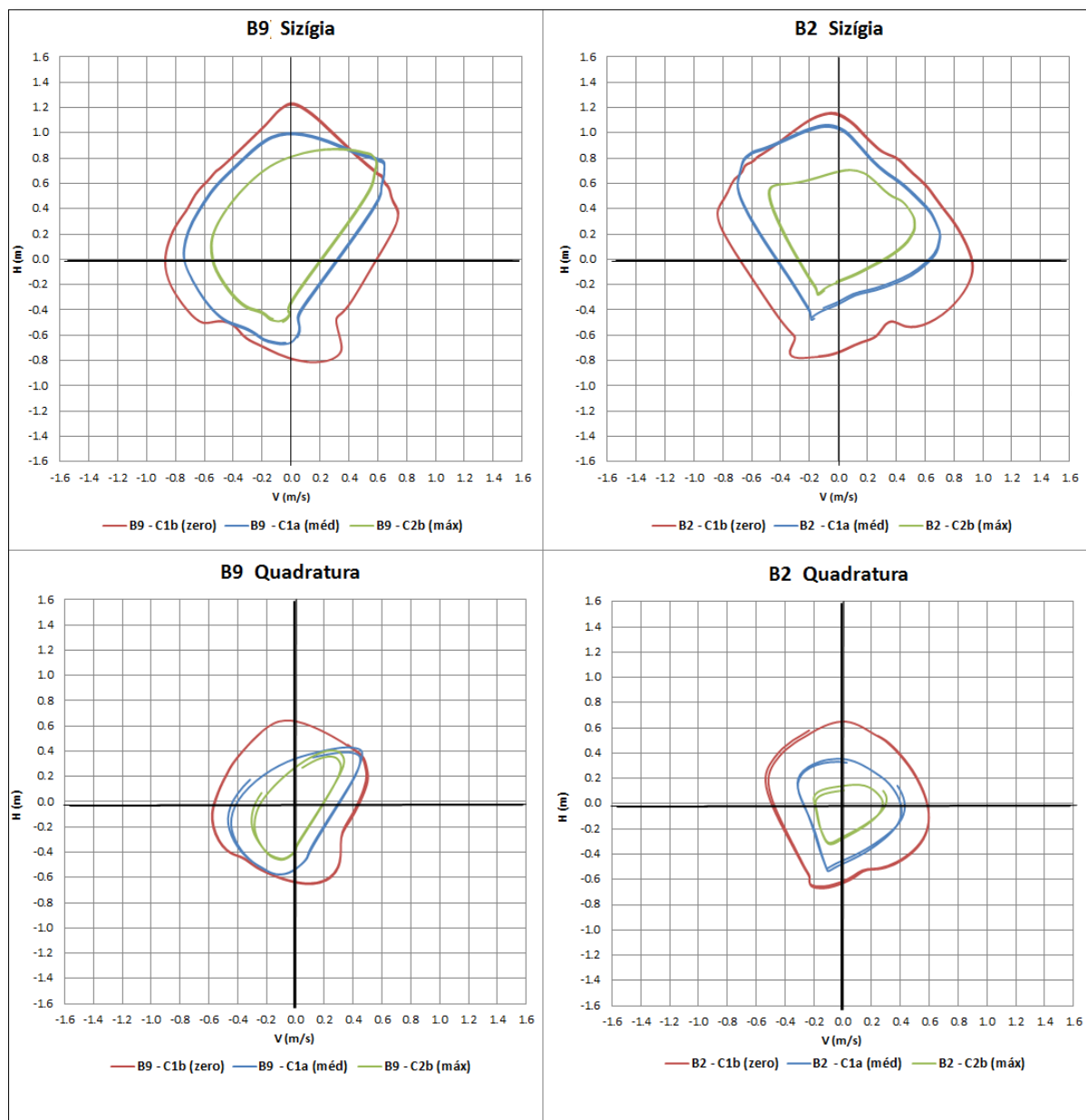


Figura 34. Diagramas h-v nos pontos iniciais do canal de Breves (B2 e B9) nos períodos de sizígia e quadratura em cada canal com vazão zero, média e máxima. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

A Figura 35 mostra o mapa da área de estudo em conjunto com as estações e os diagramas de elevação e velocidades de cada canal durante a maré de sizígia.

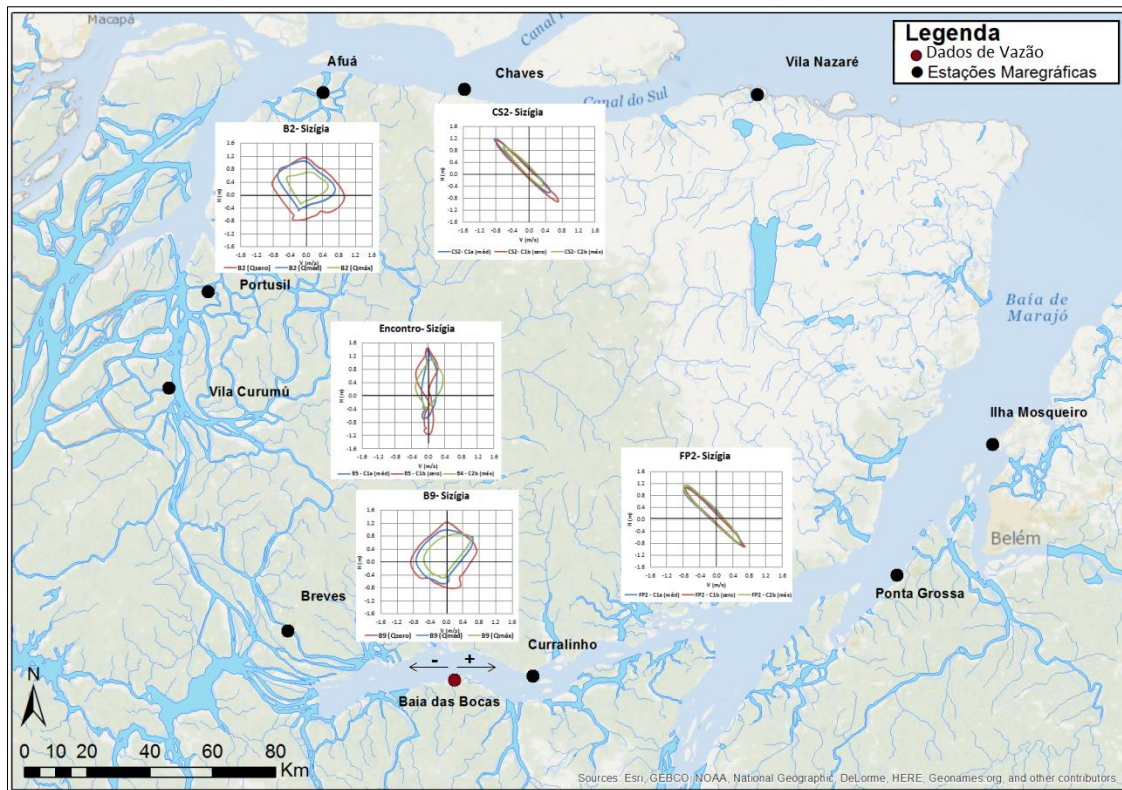


Figura 35. Propagação da maré através de diagramas de elevação da superfície e velocidade ao longo dos canais Sul, Breves e Pará, durante a maré de sizígia. Indicação do sentido de vazante (positivo) e enchente (negativo) no canal de Breves. Fonte: Elaboração Própria, 2017.

Observa-se que a característica da propagação da onda de maré muda ao longo dos canais. Para todas as vazões estudadas, a onda de maré nos canais Sul e Pará tem característica progressiva, e ao entrar no canal de Breves torna-se mista devido à reflexão da onda que ocorre no ponto de encontro, onde a onda tem característica predominantemente estacionária.

A velocidade da onda de maré reduz ao longo da sua propagação no estuário e a onda se deforma. A velocidade baixa no ponto de encontro pode levar ao acúmulo de sedimentos e nutrientes o que pode possivelmente atrair maior número de espécies para a região.

8. Considerações finais

8.1. Conclusões

Neste trabalho foi utilizada uma metodologia conjunta do uso de dados maregráficos e resultados disponíveis de um modelo numérico para analisar o encontro das marés em canais interconectados.

A análise preliminar da altura de maré e celeridade no sistema estuarino do Estreito de Breves permitiu conhecer as características gerais da maré no sistema, as modificações que ocorrem em sua evolução no interior do estuário, bem como avaliar a influência da batimetria e da vazão do rio na propagação da onda de maré.

As séries de dados não têm a abrangência espacial nem temporal desejada. Por este motivo, a análise dos dados tem caráter preliminar, sendo utilizado um modelo com geometria simplificada para complementar as análises, a fim de suprir a falta de dados para caracterizar a hidrodinâmica da região. Os resultados obtidos neste trabalho, embora limitados pela duração e extensão geográfica das observações no local, evidenciam a necessidade e a importância do estudo da maré e das correntes de maré em regiões estuarinas. Tais estudos, além de incrementar as referências e informações da região, podem trazer resultados de grande utilidade na calibração e verificação de modelos matemáticos em estuários, bem como em diversos campos de pesquisa interdisciplinar.

Os resultados do modelo, mesmo utilizando geometria simplificada, mostram que a simulação representou bem os padrões obtidos através dos dados disponíveis.

A maré que entra no canal de Breves sofre modificações durante sua propagação, resultando em distorções de fase, amplitude e celeridade. As principais conclusões dessa análise, as indicações sugeridas pelos resultados, e as hipóteses levantadas em função dos mesmos, estão resumidas a seguir.

No Estreito de Breves, para todas as vazões analisadas, o fluxo residual segue em direção ao canal Pará.

Estudando a propagação da maré em torno da ilha de Marajó, identificou-se no Estreito de Breves uma região de encontro das ondas de maré que penetram pelo Canal Sul do rio Amazonas e pela Foz do rio Pará. Acompanhando a evolução da componente M_2 ao longo do canal de Breves, através dos dados disponíveis, observou-se uma descontinuidade do crescimento da fase entre as estações

maregráficas de Vila Curumú e Breves, caracterizando o encontro das marés entrando por lados opostos do canal. A zona de convergência da maré está a 80 km de Breves e 40 km de Vila Curumu. Esse local é caracterizado por maior atraso de fase e maiores amplitudes de maré em relação ao restante da região estudada, o que indica a ocorrência de reflexão das ondas nesse trecho.

A ocorrência da reflexão pôde ser verificada pela característica da propagação da onda de maré ao longo dos canais, pois a resposta das marés ao amortecimento da energia, antes e após a reflexão, é uma onda estacionária com contribuição progressiva de magnitude variável, o que ocorre na área de estudo. No Estreito de Breves a maré observada resulta da convergência de duas ondas provenientes das duas entradas do canal. A onda de maré nos canais Sul e Pará tem característica predominante progressiva, e ao entrar no canal de Breves torna-se mista (progressiva + estacionária) devido à reflexão da onda que ocorre no ponto de encontro, onde a onda tem característica predominantemente estacionária. No ponto de encontro, as magnitudes máximas dos níveis (preamar e baixamar) têm velocidades nula ou próximas a zero.

A velocidade da onda de maré reduz ao longo da sua propagação no estuário e a onda se deforma. A velocidade baixa no ponto de encontro pode levar ao acúmulo de sedimentos e nutrientes.

Para verificar a influência da batimetria e da descarga fluvial na propagação da maré nos canais, foram comparados diferentes cenários simulados no modelo. Em época de cheia, quando as descargas fluviais de ambos os lados são maiores, a zona de convergência das ondas de maré se aproxima da estação Vila Curumu, seguindo em direção ao Canal Sul, onde esta sofre maior amortecimento causado pela descarga fluvial do rio Amazonas. A influência fluvial do Amazonas é mais marcante (sua vazão é uma ordem de grandeza maior que a do Tocantins) e a variação da amplitude de maré em diferentes vazões é maior no canal Sul do que no canal Pará. Devido à diferença de profundidade média dos canais, a velocidade da propagação da onda da maré durante a vazão média é maior no canal do Sul, que é mais profundo, que no canal Pará.

8.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como dito anteriormente, estuários são regiões de extrema importância e precisam ser constantemente avaliados e estudados. Ainda que haja modelos para a região, estes precisam ser calibrados corretamente e são necessárias novas campanhas de coleta de dados no local e estações de monitoramento de níveis permanentes. Durante o trabalho foi exposta a dificuldade de comparação dos resultados do modelo com dados, pois há uma lacuna de quantidade e qualidade (muito antigos) de dados no trecho de interesse. Os dados disponibilizados no estuário do rio Amazonas e Pará são antigos e alguns com curto tempo de amostragem, o que pode prejudicar a análise e alterar os resultados finais, considerando a sazonalidade do rio.

Um ponto importante a ser explorado no futuro é determinar relações entre a geometria dos sistemas e a maré, aperfeiçoando o modelo para as condições reais de morfologia e interpretar os dados obtidos com a geometria de diversos sistemas estuarinos. É importante ampliar o conhecimento das regiões estuarinas, o que é possível através de modelos que representem bem a hidrodinâmica da região.

9. Referências

- AB'SÁBER, A. N. "Zoneamento fisiográfico e ecológico do espaço total da Amazônia Brasileira". **estudos avançados**, v. 24, n. 68, pp. 15-24, Março 2010. ISSN 0103-4014.
- ALFREDINI,. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. 1. ed. São Paulo, SP: Bluche, 2005.
- ANA. HidroWeb. Sistemas de Informações Hidrológicas. **Agência Nacional de Águas**, 2017. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Arquivos obtidos em 2003.
- ANTAQ. Informações Geográficas - Elementos dos Transportes Aquaviários. **Agência Nacional de Transporte Aquaviário**, 25 Agosto 2016. Disponível em: <<http://portal.antaq.gov.br/index.php/informacoes-geograficas/>>. Acesso em: Maio 2017. Representação Geográfica dos Elementos de Transportes Aquaviários.
- BALTAZAR, L. R. S. *Encontro de marés no Golfão Marajoara: Complexo estuarino de multicanais Amazonas - Pará*. Tese de D.Sc UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2017.
- BARTHEM, R. B.; SCHWASSMANN, H. O. Amazon River Influence on the seasonal displacement of the salt wedge in the Tocantins River estuary, Brazil, 1983-1985. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Zoologia**, Belém, v. 10, n. 1, p. 119-130, Julho 1994. ISSN CDD:551.48309811.
- BUSCHMAN, F. A., HOITINK, A. J. F., VAN DER VEGT M., et al. Subtidal flow division at a shallow tidal junction. **Water Resources Research**, v. 46, n. W12515, p. 1-12, Dezembro 2010. ISSN doi:10.1029/2010WR009266.
- COSTA, M. S. *Aporte hídrico e do material particulado em suspensão para a Baía do Marajó- Influência dos rios Amazonas e Tocantins*. Tese de M.Sc., Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.2013
- DALBONE, R. D. C. **Análise das correntes de maré ao longo do canal de acesso Portuário da baía de são marcos: um estuário de macromarés**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 103. 2014.
- DELTA RES. Deltares Enabling Delta Life. **Deltares Systems**, 2014. Disponível em: <<https://www.deltares.nl/en/>>. Acesso em: Junho 2017.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação Marinha do Brasil. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/>>. Acesso em: Janeiro 2017.

DUARTE, A. A. L. S.; VIEIRA, M. P. J. Caracterização dos Ambientes Estuarinos. Mistura em Estuários. **Engenharia Civil - UM**, Braga, Portugal, p. 41- 55, Dezembro 1997. ISSN 6. ISSN 0873-1152.

FEMAR. Fundação de Estudos do mar. **Catálogo de Estações Maregráficas**, 2000. Disponível em: <<https://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/indice.html#amapaepara>>. Acesso em: Maio 2017. Rio de Janeiro, Brasil.

FRANCO, D. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, v. III, 1997. Diretoria de Hidrografia e navegação.

GABIOUX, M. **Influência da Lama em Suspensão sobre a propagação da maré na Plataforma Amazônica**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 99. 2002.

GALLO, N. M. *Influência da vazão fluvial sobre a propagação da maré no estuário do rio Amazonas*. Tese de M.Sc. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 111. 2004.

GALLO, N. S.; VINZON,. "Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary". **Ocean Dynamics**, Rio de Janeiro, Brasil, v. 55, pp. 441–448, 30 Agosto 2005. ISSN DOI 10.1007/s10236-005-0003-8.

GODIN, G. "The Propagation of Tides up Rivers With Special Considerations on the Upper Saint Lawrence River". **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, Ottawa Ont, Canada, v. 48, n. 3, p. 307-324, Março 1999. ISSN No. ecss.1998-0422. Disponível em <http://www.idealibrary.com>.

GOMES, D. O.; MELO FILHO, E. **Penetração da onda de maré em um canal fluvial: solução analítica adimensional**. Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande. 2004. Disponível em: http://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/5124/30_2004.pdf?sequence=1.

GOOGLE MAPS, 2017. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Breves>. Acesso em: Março 2017.

GREGÓRIO, H. P. *Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma do Emissário Submarino de Santos*. Tese de D.Sc USP. São Paulo, p. 125. 2009.

HOITINK, A. J. F.; JAY, D. A. "Tidal river dynamics: Implications for deltas". **Rev. Geophys**, p. 54, Fevereiro 2016. ISSN 10.1002/2015RG000507.

IBAMA. **GEO BRASIL 2002. Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil**. IBAMA, MMA e PNUMA. Brasília. 2002. (475).

LIMA, G. M. P. **Caracterização sedimentológica e dos padrões de circulação e mistura do estuário do rio Jacuípe – litoral norte do estado da Bahia**. Universidade Federal da Bahia. Salvador – BA, p. 149. 2007.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia física de estuários**. São Paulo, SP: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2002. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=cpM7IFEOS1sC&pg=PA73&lpg=PA73&dq=propaga%C3%A7%C3%A3o+da+mar%C3%A9&source=bl&ots=LqUA8N_0_S&sig=IwMxLyL5ai0TOvSamtU95oWUf0U&hl=pt-BR&sa=X&ei=zh9IUvCCLpLd4APenYDwCA#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: Março 2017.

NASA. Earth Observatory, 2012. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=79765&src=ve>>. Acesso em: 7 Abril 2017.

NEVES FILHO, C. **Variação da Maré meteorológica no litoral Sudeste do Brasil: 1965-1986**. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 125. 1992.

NGUYEN, A. D. **Salt intrusion, tides and mixing in multi-channel estuaries**. Delft University of Technology and of the Academic Board of the UNESCO-IHE Institute for Water Education. Delft, The Netherlands, p. 174. 2008. (ISBN 978-0-415-47122-0).

PAES CARVALHO NAVEGAÇÃO & LOGÍSTICA LTDA. Transporte de Grão na Amazônia. *TRAN'S 2015- VI Congresso Internacional de Transportes da Amazônia*. Belém, Pará: [s.n.]. 2015. pp. 22. Disponível em http://www.sindarpa.com.br/palestras_2015.php.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, ; LENTZ, S. "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE". **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 8, pp. 929–937, Outubro 2002.

PUGH,. **Tides, surges and mean sea level**. Swindon: John Wiley & Sons Ltd, 1987. 486 p. ISBN 0 471 91505 X.

SATO, O. **IOF1224 - Ondas e Marés**. Instituto Oceanográfico - Universidade De São Paulo. São Paulo, SP, p. 99. 2010.

THE MATHWORKS, INC. MATLAB R2016a. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>. Acesso em: Maio 2017.

WANG, Z. B.; DING, P. X. "The Branching Channel Network in the Yangtze Estuary". **Coastal Engineering Proceedings**, Santander, Spain, 2012. ISSN ISBN: 978-0-9896611-1-9.

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, n. 3-4, pp. 629–639, Março 2003. ISSN 10.1016/S0272-7714(02)00213-5.