



DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO FLUVIAL NO ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS

Iranilson Oliveira Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Rio de Janeiro
Agosto de 2009

DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO FLUVIAL NO ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS

Iranilson Oliveira Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof.^a Susana Beatriz Vinzón, D.Sc.

Prof.^a Josefa Varela Guerra, Ph.D.

Prof. Benoit Le Guennec, Ph.D.

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2009

Silva, Iranilson Oliveira

Distribuição da Vazão Fluvial no Estuário do Rio Amazonas/
Iranilson Oliveira Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXI, 106 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Oceânica, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 96-100.

1. Medição da vazão fluvial. 2. Maré. 3. Rio Amazonas.
4. Modelagem numérica. I. Vinzón, Susana Beatriz.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

À professora Susana Vinzón, minha orientadora, pela oportunidade oferecida para fazer este curso de mestrado e por toda a sua dedicação e acessibilidade com que orientou esta tese.

À minha família, pela confiança, paciência e apoio fornecidos a todo o momento. Em especial às minhas queridas irmãs Ivanilisa e Iranilde por sempre estarem ao meu lado dando apoio incondicional.

Ao amigo Márcio Sousa da Silva, do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA), pela participação nas campanhas e auxílio na obtenção dos registros dos dados de vazões por meio do ADCP.

À ANA (Agência Nacional de Águas), por fornecer os dados das campanhas de vazões e outros utilizados neste trabalho.

Aos amigos do LDSC (Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos), Carla Vilela, Leonardo Veloso Dardengo, Luana & Marcos Gallo e Rodrigo Duarte, pelas contribuições, companhia e amizade.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo apoio financeiro fornecido durante este curso de pós-graduação.

Aos professores e funcionários do Programa de Engenharia Oceânica, pela atenção dispensada.

Agradeço às secretárias Glace Farias e Marise Cardoso, pelo carinho e atenção.

Por fim, agradeço a Deus, por sempre iluminar os meus caminhos e destino.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO FLUVIAL NO ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS

Iranilson Oliveira Silva

Agosto/2009

Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Programa: Engenharia Oceânica

O objetivo geral desta dissertação é compreender a distribuição da vazão fluvial do rio Amazonas através dos principais canais, utilizando dados medidos e modelados. Para isto, utilizaram-se os dados medidos nas campanhas de 2007 e 2008 em diferentes condições de maré e resultados de um modelo numérico calibrado para a região, desde a plataforma continental até além de onde há evidências da perturbação do nível d'água pela maré.

A análise dos dados medidos e os resultados do modelo mostram como a vazão fluvial se distribui pelos canais. Três seções principais foram consideradas: uma no Canal Norte, uma no Canal Sul e uma no Estreito de Breves. A amplitude da vazão é sempre maior ao longo do canal Sul, também as maiores vazões residuais. O comportamento das vazões ao longo do ciclo de maré muda da seca para a cheia, e nas marés de sizígia e quadratura, em fase e amplitude. Porém, apesar destas diferenças, a proporção das vazões escoando pelos diferentes canais não muda significativamente. De acordo com as medições, no Canal Norte a proporção da vazão residual foi mínima durante a cheia em maré de sizígia (37%, 91882 m³/s), máxima durante a cheia na maré de quadratura (39,5%, 106136 m³/s), sendo que pela seção do Estreito de Breves a vazão residual variou de 1 a 1,5%, sendo máxima quando as vazões residuais pelo canal Sul são máximas, ou seja, em condições de cheia e maré de sizígia. Neste canal observa-se vazões residuais sempre em direção ao rio Pará.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DISTRIBUTION OF RIVER FLOW IN THE ESTUARY OF THE AMAZON RIVER

Iranilson Oliveira Silva

August/2009

Advisor: Susana Beatriz Vinzón

Department: Ocean Engineering

This dissertation aims at understanding the distribution of the Amazon River discharge through the estuarine channels, using measured and modeled data. For this purpose, the data collected in different fluvial and tidal conditions were used as well as the results of a numerical model, calibrated for the region, from the continental shelf to the upper limit where the tide is damped.

The analysis of the data and the model results show how the river flow is distributed among the channels network. Three main sections were considered: the North Channel, South Channel and Breves Strait cross sections. The amplitude of the discharge is always larger in the South Channel as well as the residual discharges. The behavior of the discharges along the tidal cycle in the two main channels changes in amplitude and phase from low to high waters and from neap to spring tides. In spite of these differences in tide propagation along both channels, the residual discharge proportion did not varied significantly during the three field campaigns. According to the measurements the proportion of the residual discharges along the North Channel was minimum in high water and spring tides (37%, 91882 m³/s) and maximum at high water and neap tides (39.5%, 106136 m³/s). Along the Breves Strait the residual discharge varied from 1 to 1.5%, being maximum when the residual discharge along the South Channel is also maximum, in high water and spring tides. Along this strait the residual discharge is always directed to the Para River.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	5
1.1.1. Objetivo geral	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
2. REGIÃO DE ESTUDO.....	7
2.1. Caracterização e localização do estuário do rio Amazonas	7
2.2. Caracterização do regime de maré no estuário do rio Amazonas	8
2.3. Regime de vazões do rio Amazonas em Óbidos	12
3. DADOS DE CAMPO UTILIZADOS	15
3.1. Campanhas de Vazões.....	15
3.2. Localização geográfica das seções	16
3.3. Previsão de maré para o período das campanhas	20
3.4. Metodologias empregadas na obtenção dos dados de vazões	22
3.4.1. Curvas de vazões da campanha de 2007, cheia do rio Amazonas	24
3.4.2. Curvas de vazões da campanha de 2008, na época de cheia do rio Amazonas	29
3.4.3. Curva de vazões da campanha de 2008, na época de seca do rio Amazonas	31
4. METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA VAZÃO RESIDUAL	36
4.1. Conceitos utilizados nas análises	36
4.2. Metodologias aplicadas nos cálculos das vazões	37
4.2.1. Vazões residuais a partir dos dados do ADCP	37

4.2.2.	Cálculo da vazão residual a partir dos dados medidos.....	38
4.2.3.	Cálculo das vazões utilizando a interpolação dos dados medidos	38
4.2.4.	Interpolação de funções para representar a variação de vazões no ciclo de maré	40
4.3.	Extrapolação das curvas parametrizadas.....	47
4.4.	Vazões residuais nas seções medidas.....	51
5.	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	58
5.1.	Implementação do Modelo Numérico no domínio de estudo	58
5.1.1.	Malha de elementos finitos	58
5.1.2.	Condição de contorno fluvial e oceânica	59
5.2.	Seções onde foram calculadas as vazões.....	61
5.2.1.	Metodologias utilizadas nos cálculos das vazões do modelo numérico	63
5.3.	Vazões instantâneas nas seções do modelo numérico.....	64
5.4.	Filtragem da maré nas vazões modeladas	67
5.4.1.	Vazões médias anuais nas seções analisadas	71
5.5.	Comparação das vazões modeladas e medidas no ciclo de maré.....	71
5.5.1.	Distribuição da vazão nas seções durante os períodos de cheia e seca do rio Amazonas, para marés de sizígia e quadratura	76
5.5.1.1.	Período de cheia	76
5.5.1.2.	Período de seca.....	80
5.6.	Comportamento das vazões e os níveis nas seções analisadas durante o ciclo de maré para as situações de cheia e seca, nas marés de sizígia.	83
6.	CONCLUSÕES	92
6.1.	Medições realizadas com Perfilador Acústico – ADCP	92

6.2. Uso de modelo numérico para analisar a distribuição da vazão fluvial no estuário do rio Amazonas em seus principais canais.	93
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	96
ANEXO 1	101
ANEXO 2	102
ANEXO 3	105

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Imagem de satélite da região de estudo, destacando os seus principais tributários situados na margem direita do rio Amazonas. Fonte: NASA, 2009.....4
- Figura 2: Área do estudo, com destaque para os seus principais tributários (margem direita) e os canais de interesse para este estudo.....8
- Figura 3: Curva chave para a estação fluviométrica de Óbidos no rio Amazonas.....13
- Figura 4: Regime hidrológico do rio Amazonas, em Óbidos, de 1968 a maio de 2008. Vazões calculadas a partir da informação de cotas diárias e curvas chaves fornecidas pela Agência Nacional de Águas - ANA (fonte: ANA, 2008).14
- Figura 5: Mapa com identificação das seções onde foram feitas as medições durante as campanhas de vazões e os principais tributários do rio Amazonas pela margem direita.....17
- Figura 6: Representação da seção onde foram feitas as medições no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves), com a identificação das margens adotadas: Md (margem direita) e Me (margem esquerda) e a indicação do sentido da vazão de vazante (Q_+), em direção ao rio Pará.....18
- Figura 7: Representação da seção onde foram feitas as medições no canal do Vieira Grande (Canal Sul), com a identificação das margens adotadas: Md (margem direita) e Me (margem esquerda) e a indicação do sentido da vazão de vazante (Q_+), em direção ao Oceano.18
- Figura 8: Representação da seção onde foram feitas as medições no canal em frente à cidade de Macapá (AP) (Canal Norte), com a identificação das margens adotadas: Md (margem direita) e Me (margem esquerda) e a indicação do sentido da vazão de vazante (Q_+), em direção ao Oceano.19
- Figura 9: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu, na época de cheia do rio Amazonas, para o mês de jun/2007, em destaque o período em que foram realizadas as medições e as condições de maré.....20
- Figura 10: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu, na época de cheia do rio Amazonas, para o período de 25 de maio a 15 de junho de 2008, em destaque o período em que foram realizadas as medições e as condições de maré.21

Figura 11: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu, na época de seca do rio Amazonas, no período de 21 de setembro a 15 de outubro de 2008, em destaque o período em que foram realizadas as medições e as condições de maré.	21
Figura 12: Interface do programa WinRiver utilizado para processar o sinal transmitido pelo ADCP. (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI <i>Instruments</i>).	23
Figura 13: Anteparo utilizado para afixar o ADCP, que está submerso, na lateral do barco.	24
Figura 14: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves.), na época de cheia do rio Amazonas em 2007.	25
Figura 15: Seção transversal realizada no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves) em 19/06/2007. (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI <i>Instruments</i>).	25
Figura 16: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do vieira Grande – Canal Sul, na época de cheia do rio Amazonas em 2007.	26
Figura 17: Seção transversal realizada no Canal do Vieira Grande; (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI <i>Instruments</i>).	27
Figura 18: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal em frente à cidade de Macapá (AP) - Canal do Norte, na época de cheia do rio Amazonas em 2007.	28
Figura 19: Seção transversal realizada no Canal em frente à cidade de Macapá (AP); (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI <i>Instruments</i>).	28
Figura 20: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do rio Jacaré – Estreito de Breves, na época de cheia do rio Amazonas em 2008.	29

Figura 21: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do Vieira Grande - Canal Sul do rio Amazonas, na época de cheia do rio Amazonas em 2008.....	30
Figura 22: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal em frente à cidade de Macapá-AP (canal do Norte), na época de cheia do rio Amazonas em 2008.....	31
Figura 23: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves), na época de seca do rio Amazonas em 2008. ...	32
Figura 24: Resultado (linha pontilhada em azul) do ajuste feito para a curva de vazões medidas para o Canal do Sul, a curva resultante das medições no dia 01/10/2008 (em vermelho) e a curva resultante das medições no dia 02/10/2008 (em preto)...	33
Figura 25: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do Vieira Grande – Canal Sul do rio Amazonas, na época de seca do rio Amazonas em 2008.....	34
Figura 26: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal em frente à cidade de Macapá-AP (Canal Norte), na época de seca do rio Amazonas em 2008.....	35
Figura 27: Determinação do tempo de inicial e final da onda de vazão. (modificada de: Nota Técnica Conjunta nº 1/2008/NHI/SAR. Da Agência Nacional das Águas – ANA).....	37
Figura 28: Comparação entre a curva das vazões medidas com a das vazões interpoladas durante um ciclo de maré para a seção no Estreito de Breves, resultante das medições feitas em 2007.....	39
Figura 29: Comparação entre a curva das vazões medidas com a das vazões interpoladas durante um ciclo de maré para a seção no Canal do Sul, resultante das medições feitas em 2007.....	39
Figura 30: Comparação entre a curva das vazões medidas com a das vazões interpoladas durante um ciclo de maré para a seção no Canal Norte, resultante das medições feitas em 2007.....	40
Figura 31: Exemplo da planilha desenvolvida no Excel para a parametrização das curvas de vazões empregando a função $Q(t)$	41

Figura 32: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 19/06/2007, no Estreito de Breves, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia – 2007.	43
Figura 33: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 23/06/2007, no Canal Sul, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia - 2007.	43
Figura 34: Comparação entre as curvas das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 26/06/2007, no Canal Norte, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia – 2007.	44
Figura 35: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 03/06/2008, no Estreito de Breves, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia de 2008.	44
Figura 36: Comparação entre as curvas das vazões medidas com resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 04/06/2008, no Canal Sul, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia de 2008.	45
Figura 37: Comparação entre as curvas das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 05/06/2008, no Canal Norte, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia de 2008.	45
Figura 38: Comparação entre as curvas das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 30/09/2008, no Estreito de Breves, durante o período de seca do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de seca de 2008.	46
Figura 39: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 02/10/2008, no Canal Sul, durante o período de seca do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de seca de 2008.	46

Figura 40: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 03/10/2008, no Canal Norte, durante o período de seca do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de seca de 2008.	47
Figura 41: Vazões obtidas a partir das extrapolações das curvas parametrizadas, compreendendo o período de duração da medição durante o período de cheia em 2007.	48
Figura 42: Vazões obtidas a partir das extrapolações das curvas parametrizadas, compreendendo o período de duração das medições durante o período de cheia em 2008.	48
Figura 43: Vazões obtidas a partir das extrapolações das curvas parametrizadas, compreendendo o período de duração das medições durante o período de seca em 2008.	49
Figura 44: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu (na foz do estuário), para a época das campanhas de vazões, no mês de junho de 2007, de maio a junho de 2008 e de setembro a outubro de 2008.	50
Figura 45: Soma das vazões extrapoladas através das curvas parametrizadas para as seções onde foram realizadas as medições nas campanhas de 2007 e 2008.	51
Figura 46: Representação dos resultados apresentados na Tabela 5, a partir das metodologias adotadas para obter os valores residuais de vazões, de acordo com o ano e o período hidrológico das medições.	55
Figura 47: Dados de vazão medidos em Óbidos, a partir dos quais é determinada a curva chave.	57
Figura 48: Mapa com a malha da região modelada destacando os seus principais tributários e os canais próximos à foz (canais Norte e Sul).	59
Figura 49: Hidrograma de vazões registradas na estação de Óbidos para o ano de 2007, utilizado como dado de entrada do modelo numérico. Fonte: ANA - Agência Nacional das Águas.	60
Figura 50: Mapa da região modelada. Em azul e vermelho, as seções pré-determinadas para o estudo da distribuição de vazões; em preto, são as seções feitas na campanha	

de vazões realizada em junho/2007; incluindo os dois principais canais, o norte e o sul.	61
Figura 51: Localização e identificação das seções S_a e S_b , utilizadas para contabilizar a distribuição da vazão fluvial que se dirige aos Canais do Norte e Sul, propriamente ditos, passando pelas seções CN (S_4 – Canal Norte), CS (S_5 – Canal Sul) e EB (S_6 – Estreito de Breves).	62
Figura 52: Seção transversal, idealizada para ilustrar a definição adotada para obter a equação utilizada nos cálculos de vazões do modelo numérico.....	63
Figura 53: Comparação entre a curva das vazões do modelo numérico da seção S_0 com a curva do hidrograma de vazões da estação de Óbidos. (Fonte: ANA-2007).	65
Figura 54: Hidrograma das vazões modeladas para a seção S_1 (preto) comparada com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (cinza) acrescida da vazão média do rio Tapajós.	65
Figura 55: Hidrograma resultante da soma das vazões instantâneas da seção S_2 com a S_3 (preto), comparado com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (cinza) acrescida da vazão média dos rios Tapajós e Xingu.	66
Figura 56: Hidrograma resultante da soma das vazões instantâneas das seções S_4 , S_5 e S_6 (preto), as mesmas onde foram feitas as medições no Canal Norte, Canal Sul e Estreito de Breves, respectivamente. Comparado com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (cinza), acrescida da vazão média dos rios Tapajós e Xingu.	66
Figura 57: Hidrograma resultante da soma das vazões instantâneas das seções S_6 (Estreito de Breves), S_a e S_b (em preto), à jusante das seções S_4 e S_5 . Comparado com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (em cinza) acrescida da vazão média dos rios Tapajós e Xingu.	67
Figura 58: Comparação entre a curva das vazões instantâneas da seção S_0 com a curva resultante da média móvel para filtragem da maré, comparadas com o hidrograma da estação de Óbidos.	68
Figura 59: Comparação entre a curva das vazões filtradas da seção S_1 com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média do rio Tapajós.	69

Figura 60: Comparação entre a curva das vazões filtradas das seções S ₂ e S ₃ com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média dos rios Tapajós e Xingu.....	69
Figura 61: Comparação entre a curva das vazões filtradas das seções S ₄ , S ₅ e S ₆ com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média dos rios Tapajós e Xingu.....	70
Figura 62: Comparação entre a curva das vazões filtradas das seções S _a , S _b e S ₆ com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média dos rios Tapajós e Xingu.....	70
Figura 63: Comparação entre a curva das vazões medida com a de vazões modeladas da seção S ₄ , que é a equivalente à seção onde foram feitas as medições de vazões no Canal Norte, na época de cheia em 2007.	72
Figura 64: Comparação entre a curva de vazões medidas com as modeladas da seção S ₅ , que é equivalente à seção onde foram feitas as medições de vazões no Canal Sul, na época de cheia em 2007.....	73
Figura 65: Comparação entre a curva de vazões medidas com as modeladas da seção S ₆ , que é equivalente à seção onde foram feitas as medições no Estreito de Breves, na época de cheia em 2007.	73
Figura 66: Comparação entre as curvas de vazões modeladas com a translação feita a partir dos dados medidos. Dentro das elipses é destacada a curva obtida a partir das vazões medidas em cada uma das seções durante a campanha realizada no período de cheia do rio Amazonas, em junho de 2007.....	75
Figura 67: Evolução da distribuição da vazão fluvial nos principais canais do estuário do rio Amazonas durante o período de cheia, em que foram feitas as medições....	76
Figura 68: Gráfico da curva de vazão com destaque dos intervalos de tempo utilizados na análise da distribuição da vazão nas seções S ₂ e S ₃ , durante marés de sizígia e quadratura, no período de cheia.	77
Figura 69: Gráfico da curva de vazão com destaque dos intervalos de tempo utilizados na análise da distribuição da vazão nas seções S ₄ , S ₅ e S ₆ , durante marés de sizígia e quadratura.	78

Figura 70: Gráfico da curva de vazão com destaque dos intervalos de tempo utilizados na análise da distribuição da vazão nas seções S_a , S_b , S_6 , durante marés de SIZÍGIA e QUADRATURA.	78
Figura 71: Curva de vazões com destaque para o período em que ocorre maré de sizígia e quadratura, durante a época de seca do rio Amazonas.	80
Figura 72: Curva de vazões com destaque para o período em que ocorre maré de sizígia e quadratura, durante a época de seca do rio Amazonas.	81
Figura 73: Curva de vazões com destaque para o período em que ocorre maré de sizígia e quadratura, durante a época de seca do rio amazonas.	81
Figura 74: Variação das curvas de níveis ao longo do Braço NORTE, para a época de cheia e seca em maré de sizígia, sendo que $n(S_a)$, $n(S_4)$ e $n(S_2)$ são as variações do nível d'água nas respectivas seções.	83
Figura 75: Variação das curvas de níveis ao longo do Braço SUL, para a época de cheia e seca em maré de sizígia, sendo que $n(S_a)$, $n(S_4)$ e $n(S_2)$ são as variações do nível d'água nas respectivas seções.	84
Figura 76: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de cheia no mês de junho de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_2 e S_3	85
Figura 77: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de seca no mês de outubro de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_2 e S_3	85
Figura 78: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de cheia no mês de junho de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_4 , S_5 e S_6	86
Figura 79: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de seca no mês de outubro de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_4 , S_5 e S_6	86
Figura 80: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de cheia no mês de junho de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_a , S_b e S_6	87
Figura 81: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de seca no mês de outubro de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_a , S_b e S_6	87
Figura 82: Comparação entre as curvas de vazões e a variação dos níveis para as seções S_2 e S_3 durante os períodos de cheia em maré de quadratura e seca em maré de sizígia, para o ano de 2007.	88

Figura 83: Comparação entre as curvas de vazões e a variação dos níveis para as seções S ₄ , S ₅ e S ₆ durante os períodos de cheia em maré de quadratura e seca em maré de sizígia, para o ano de 2007.....	88
Figura 84: Comparação das curvas de vazões entre o período de cheia e seca e da variação do nível das seções Sa e Sb, na foz do estuário do rio Amazonas em maré de sizígia, para o ano de 2007.	89
Figura 85: Histograma da distribuição da vazão fluvial nas seções escolhidas no modelo numérico as quais foram analisadas durante os períodos de cheia e seca, respectivamente, em maré de sizígia e quadratura.....	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Principais componentes astronômicas, períodos (msd: dia solar) e origem astronômica. (Fonte: PUGH, 1987).....	9
Tabela 2: Harmônicos de águas rasas, origem e período. (Fonte: PUGH, 1987).	10
Tabela 3: Principais constantes harmônicas constituintes da maré selecionadas para fazer a previsão na estação de Ponta do Céu, localizada na ilha do Curuá, Barra Norte do rio Amazonas. (Fonte: FEMAR, 2009; http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/014.html).	11
Tabela 4: Vazões máximas, médias e mínimas no período 1998 a 2007 para a estação de Óbidos. Fonte: ANA (Agência Nacional das Águas, 2008).	14
Tabela 5: Resumo das principais características observadas nas seções durante as medições na época de cheia em 2007/2008 e seca 2008. EB (Estreito de Breves), CS (Canal Sul) e CN (Canal Norte).	19
Tabela 6: Vazões médias fornecidas pelo ADCP para todas as seções feitas durante as campanhas realizadas nos períodos de cheia e seca do rio Amazonas, durante um ciclo de maré.	52
Tabela 7: Resultados das vazões residuais nas seções medidas durante as campanhas, segundo as diferentes metodologias e valor da vazão residual.	53
Tabela 8: Resultados das diferenças entre os métodos utilizados para os cálculos das vazões residuais e a equivalência percentual entre os métodos.	54
Tabela 9: Resultado da soma das vazões residuais das três seções onde foram feitas as medições nas campanhas de cheia (2007 e 2008) e seca (2008), sendo este o valor da vazão residual do rio Amazonas para a época das medições de acordo com o período hidrológico.	55
Tabela 10: Valores das vazões para a época das campanhas realizadas nos períodos de cheia (2007 e 2008) e seca (2008) do rio Amazonas.	56
Tabela 11: Vazão máxima, mínima e a média anual registrada na estação de Óbidos em 2007.....	60

Tabela 12: valores médios anuais de vazão utilizados como dado de entrada no modelo numérico.....	60
Tabela 13: Vazões médias anuais nas diferentes seções modeladas e vazões médias anuais ingressadas ao modelo nas condições de contorno.	71
Tabela 14: Comparação entre as vazões residuais obtidas a partir das medições com as resultantes da modelagem numérica, para as seções do Estreito de Breves (EB – S ₆), Canal Sul (CS – S ₅) e Canal Norte (CN – S ₄).	74
Tabela 15: Vazões médias durante maré de SIZÍGIA para a época de cheia do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das seções, os principais rios e a soma com a vazão média de Óbidos, a diferença da vazão que entrou no modelo e a que passou pelas seções. Na quinta coluna os valores médios da soma das vazões e o erro relativo.	79
Tabela 16: Vazões médias durante maré de QUADRATURA para a época de cheia do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das seções, os principais rios e a soma com a vazão média de Óbidos, a diferença da vazão que entrou no modelo e a que passou pelas seções. Na quinta coluna os valores médios da soma das vazões e o erro relativo.	79
Tabela 17: Vazões médias durante maré de SIZÍGIA para a época de seca do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das seções, os principais rios e a soma com a vazão média de Óbidos, a diferença da vazão que entrou no modelo e a que passou pelas seções. Na quinta coluna os valores médios da soma das vazões e o erro relativo.	82
Tabela 18: Vazões médias durante maré de QUADRATURA para a época de seca do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das seções, os principais rios e a soma com a vazão média de Óbidos, a diferença da vazão que entrou no modelo e a que passou pelas seções. Na quinta coluna os valores médios da soma das vazões e o erro relativo.	82
Tabela 19: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Estreito de Breves, no dia 21/06/2007.....	101

Tabela 20: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Vieira Grande, no dia 23/06/2007.	102
Tabela 21: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Norte, no dia 26/06/2007.....	102
Tabela 22: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Estreito de Breves, no dia 03/06/2008.....	103
Tabela 23: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Vieira Grande, no dia 04/06/2008.	104
Tabela 24: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Norte, no dia 04/06/2008.....	104
Tabela 25 Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Estreito de Breves, no dia 30/09/2008.....	105
Tabela 26: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Vieira Grande, no dia 01 e 02/10/2008.....	106
Tabela 27: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Norte, no dia 03/10/2008.....	106

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo da distribuição da vazão fluvial sujeita à influência da maré no estuário do rio Amazonas, levando em consideração a contribuição de seus principais afluentes. Busca-se compreender como é a proporção da distribuição da vazão fluvial, principalmente nos canais Norte e Sul, e a comunicação do rio Amazonas com o rio Pará, através do Estreito de Breves.

Este estudo pode revelar-se de grande importância sob vários aspectos, dos quais se podem citar situações de cheia em rios, erosão fluvial e para a navegação. A região Amazônica possui uma vocação natural para a navegação, uma vez que os rios desempenham um papel preponderante, sendo, em muitos casos, a única alternativa de transporte e comunicação. O melhor entendimento acerca da distribuição da vazão fluvial, em seus mais importantes canais navegáveis, será um elemento importante para o entendimento da hidrodinâmica do estuário.

Do ponto de vista econômico e social, o rio Amazonas é uma importante via fluvial ligando a área de produção de petróleo, na parte superior da bacia Amazônica Brasileira, em Urucu, com a refinaria em Manaus (AM), beneficiando várias cidades que recebem óleo fornecido por navios. A movimentação de embarcações através da foz do rio Amazonas, região de interesse deste estudo, apresentou uma movimentação de 1143 navios no ano de 2005 (COCONTRAM, 2006). Esta é uma região estuarina de grande relevância comercial devido à sua localização estratégica no escoamento de mercadorias para o exterior e no transporte de combustíveis que é realizado ao longo da hidrovia. É também importante destacar que o Canal Norte (Barra Norte) do rio Amazonas constitui-se na principal feição fluvial do Setor Costeiro Estuarino do Estado do Amapá (AP), com 336 km de extensão, limitado ao sul pela foz do rio Jari e, a leste, pela foz do rio Araguari (TORRES & COSTA, 1999).

O balanço hídrico da bacia amazônica tem sido um desafio para os pesquisadores que trabalham na região. As dificuldades se iniciam com a própria medida de vazão do rio Amazonas, pelas suas dimensões, necessitando de adaptação de metodologias utilizadas para outros grandes rios. Soma-se na região estuarina às

grandes dimensões do rio Amazonas a variabilidade da vazão com a maré, pelo que, para se ter um dado de vazão, é necessário realizar medições num ciclo completo.

As primeiras estimativas da vazão do rio Amazonas datam do século XIX (SPIX & MARTIUS, 1831; RECLUS, 1877; SIEMENS, 1896; KATZER, 1898 In OLTMAN *et al.*, 1964). Esses resultados, que correspondem mais frequentemente a medidas pontuais, eram baseados na estimativa da velocidade média da corrente e da área da secção do rio. Pardé estima em seguida a vazão do rio Amazonas (aproximadamente 1×10^5 m³/s) a partir das observações de Le Cointe e do cálculo de um balanço hídrico rudimentar (LE COINTE, 1935; PARDÉ, 1936, 1954). As primeiras medições de descarga do Amazonas, realizadas em 1963-64 pelo US Geological Survey, permitiram enfim ter uma ideia correta da vazão do Amazonas na estação de referência de Óbidos, que drena uma bacia de 4.620.000 km². As contribuições deste rio ao oceano Atlântico oscilarão, segundo os autores, e os períodos considerados, de 175×10^3 a 212×10^3 m³/s (OLTMAN, 1968; NORDIN & MEADE, 1985; RICHEY *et al.*, 1986). Das primeiras medidas feitas por Oltman, em 1967, até o momento, os valores para descarga para o rio Amazonas têm sido realizados por diversos pesquisadores e as tecnologias vêm sendo aprimoradas. O valor indicado para a vazão média do rio Amazonas na estação de Óbidos, para o ano de 2007, é de 168×10^3 m³/s (ANA, 2007).

Campanhas de levantamento de dados de campo foram realizadas em 2007 e 2008, na época de cheia e seca do rio Amazonas e em diferentes condições de maré. Neste estudo, para a medição de vazão, foi utilizado o Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). O ADCP é usualmente instalado em barcos e mede vazões em rios e canais através de informações coletadas durante uma travessia. Processando as informações em tempo real durante a travessia, o software do equipamento determina a velocidade da corrente normal à seção descrita pela trajetória do barco e o espaço percorrido e, conseqüentemente, a vazão, que é o produto da integração das áreas e velocidades normais. A análise destes dados fornece as informações pretendidas, mas também sugere novas indagações sobre os procedimentos de medições nas condições em que foram realizadas.

Um dos objetivos, exposto neste trabalho, é melhor conhecer a distribuição das vazões de acordo com suas variações sazonais, bem como fazer uma estimativa da proporção da distribuição pelos principais canais, levando em consideração a influência da maré e utilizando a contribuição de seus principais tributários. Neste sentido, a utilização de ferramentas complementares, que possam levar em consideração vários destes fatores para contribuir com a compreensão do fenômeno físico em questão, se faz necessária. A reprodução de condições observadas no campo pela modelagem permite a caracterização do fenômeno estudado e a influência que sofre com outros, definindo o comportamento da circulação do corpo d'água. A escolha na utilização de determinado modelo frente à diversidade de modelos existentes deve ser feita de forma criteriosa, de tal modo que leve em conta a capacidade do modelo em representar as características principais do corpo d'água, de acordo com a escala de interesse, e considerando as aproximações existentes; aliada ao custo computacional envolvido. Neste contexto, além do levantamento de dados, fez-se uso de modelo numérico EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code, HAMRICK, 1994), já testado a partir de outros estudos desenvolvidos na região (GALLO, 2004 e 2009).

Neste estudo será considerado que a soma das vazões residuais obtidas nos três cursos d'água (Canal Norte, Canal Sul e Estreito de Breves), representa o escoamento superficial do rio Amazonas (na foz), com destaque para o Estreito de Breves – que serve de interligação entre o rio Amazonas e o rio Pará.

A região em estudo (Figura 1), o estuário do rio Amazonas, estende-se, aproximadamente, desde a cidade de Óbidos até o talude continental, considerando-se como limites superiores e inferiores do estuário aquele local até onde a maré é observada e a região em que é possível encontrar quantidades apreciáveis de água doce, respectivamente. É um ambiente extremamente energético, onde há a atuação de fenômenos físicos com características bem peculiares e que tem como principais forçante a descarga fluvial do rio Amazonas e a maré, que tem sua influência que se estende até aproximadamente uns 800 km à montante da foz, onde ainda são observadas perturbações na linha d'água.



Figura 1: Imagem de satélite da região de estudo, destacando os seus principais tributários situados na margem direita do rio Amazonas. Fonte: NASA, 2009.

1.1. Objetivo

Com vistas a contribuir para o conhecimento da distribuição da vazão fluvial pela rede de canais que formam o estuário do rio Amazonas e, conseqüentemente, com o desenvolvimento de ferramentas mais confiáveis para a determinação da vazão residual, a presente dissertação se propõe a atender aos seguintes objetivos gerais e específicos.

1.1.1. Objetivo geral

- ❖ Caracterizar a distribuição da vazão fluvial no estuário do rio Amazonas através da rede de canais que o formam.

1.1.2. Objetivos específicos

- ❖ Coletar dados de vazões, em seções pré-definidas na rede estuarina (no Estreito de Breves, no Canal Norte e no Canal Sul);
- ❖ Tratar os dados coletados para obter a vazão residual nas seções;
- ❖ Obter a série temporal de vazões, a partir de dados do modelo numérico, em diversas seções de interesse, incluindo as seções medidas com ADCP;
- ❖ Comparar os resultados do modelo com os dados medidos nas seções para os dias das medições;
- ❖ Obter as vazões residuais resultantes do modelo numérico;
- ❖ Estabelecer a proporção da distribuição das vazões modeladas e medidas, nos principais canais em diversas situações de interesse.

No Capítulo 2 desta dissertação a partir de trabalhos anteriores é feito um resumo do conhecimento da hidrodinâmica da região, caracterizando o regime de marés e a sua propagação no estuário. É também caracterizado o regime de vazões do rio Amazonas na estação de Óbidos, mostrando uma longa série de dados a partir de 1968 até maio de 2008. No Capítulo 3 faz-se uma descrição, caracterização geográfica das seções e uma abordagem da metodologia utilizada na obtenção dos dados de campo, de acordo com o ano e o período hidrológico das medições

A fim de atender aos objetivos deste trabalho foram propostas metodologias para os cálculos das vazões a partir dos dados medidos, empregando-se técnicas de ajuste de curvas para a interpolação das vazões das medições; e de parametrização, usando uma combinação de funções senoidais resultando em uma nova curva de vazões com a qual pode ser feita uma translação temporal e obter assim a simultaneidade das medições. No Capítulo 4 são apresentadas as metodologias adotadas e os resultados obtidos através delas.

No Capítulo 5 apresenta-se a modelagem hidrodinâmica, a localização da área modelada e malha de elementos finitos, assim como uma exposição das condições de contorno adotadas. É feita uma descrição e caracterização das seções adotadas no modelo numérico com o objetivo de analisar a distribuição da vazão fluvial pela rede de canais do estuário e a metodologia utilizada para os cálculos e filtragem da maré nas vazões modeladas. Foram consideradas duas situações: 1) a distribuição de vazões durante o ano modelado (2007), obtendo os valores médios anuais em cada uma das seções; 2) distribuição da vazão fluvial em um ciclo de aproximadamente seis dias na época de cheia e de seca em maré de sizígia e quadratura, obtendo-se os valores médios de vazões que passaram nas seções. Em seguida é feita a comparação entre as vazões medidas e modeladas, através das curvas resultantes e dos valores residuais calculados. E, por fim, são apresentadas no Capítulo 6 desta dissertação, as conclusões e considerações acerca dos resultados obtidos.

2. REGIÃO DE ESTUDO

2.1. Caracterização e localização do estuário do rio Amazonas

A região Amazônica é conhecida por sua grande disponibilidade hídrica, o que se dá por uma densa rede de drenagem entrecortando uma vasta região geográfica com rios, lagos e igarapés¹ com grande variabilidade, tanto na extensão quanto na largura dos rios, bem como no volume de água por eles transportado.

A Região Hidrográfica Amazônica, na forma como é tratada no *Caderno da Região Hidrográfica da Amazônia* com base no PNRH (*Plano Nacional de Recursos Hídricos*), está inserida no quadrante definido pelas coordenadas: 05°20'N/48°20'W e 16°20'S/74°00'W, sendo que o rio Amazonas lança suas águas no Oceano Atlântico mais ou menos ao nível da linha do Equador, em aproximadamente 50°W de longitude.

Ocupando uma área total de 6.925.674 km², desde as nascentes do rio Amazonas, nos Andes Peruanos, até sua foz, no Oceano Atlântico, a Região Hidrográfica Amazônica tem, no Brasil, 63,88% do seu território Figura 1. Nos demais países que a compõem, a região tem respectivamente: 16.14% na Colômbia, 15.61% na Bolívia, 2.31% no Equador, 1.35% na Guiana, 0.60% no Peru e 0.11% na Venezuela de participação em sua área total (FILIZOLA et al., 2002).

A área de estudo da presente dissertação, inicia-se em um determinado trecho do rio Amazonas, especificamente a partir da localidade denominada Óbidos, no Estado do Pará (PA), representando o limite à jusante do domínio analisado, a partir da desembocadura do rio Amazonas. Especificamente o trecho estuarino estaria compreendido entre as latitudes de 1°54'36,00''S e 3°17'24,00''S e as longitudes de 55°31'12,00''W e 60°37'11,99''W.

¹ O **igarapé** (*igara*, que significa embarcação escavada no tronco de uma só árvore, e *pé*, que significa caminho), em termos científicos, significa cursos de água amazônicos de primeira ou segunda ordem, braços estreitos de rios ou canais existentes em grande número na [bacia amazônica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Bacia_Amazonica), caracterizados por pouca profundidade e por correrem quase no interior da mata (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Igarapé>).

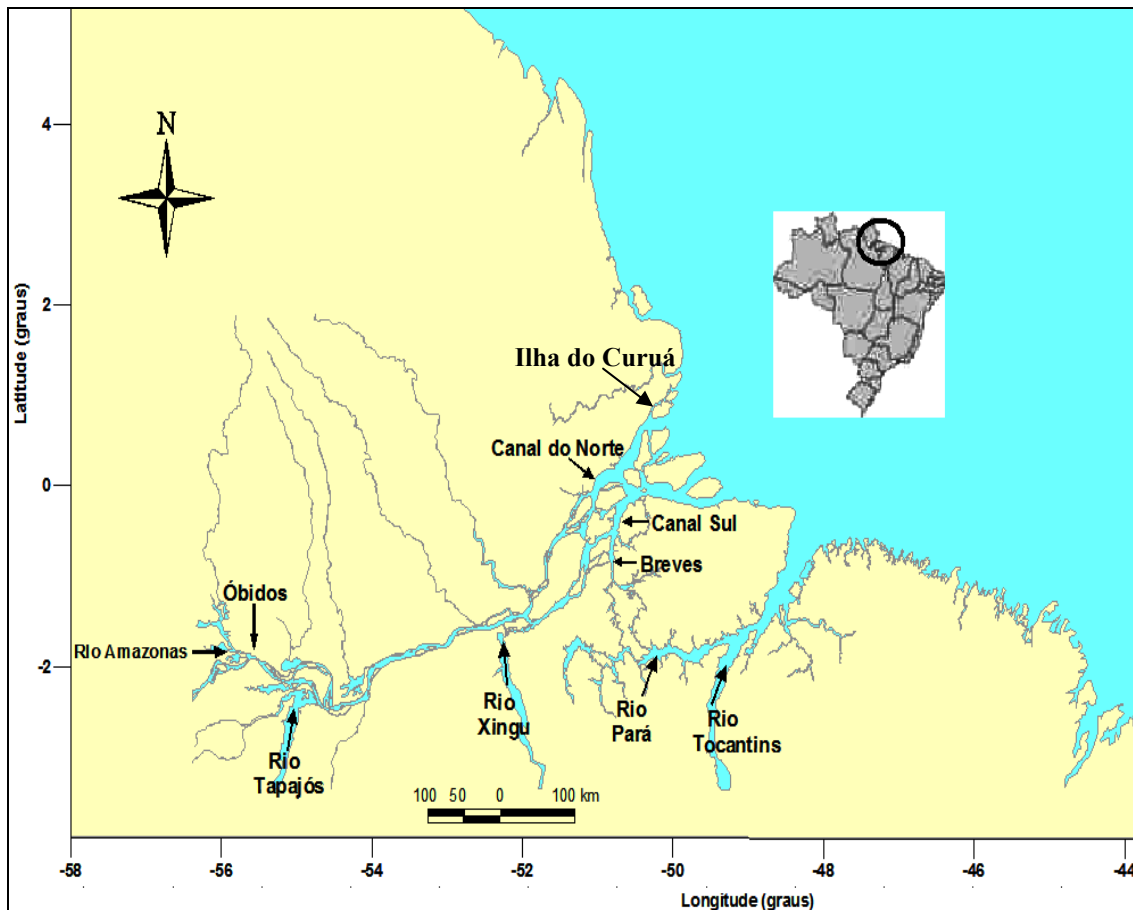


Figura 2: Área do estudo, com destaque para os seus principais tributários (margem direita) e os canais de interesse para este estudo.

2.2. Caracterização do regime de maré no estuário do rio Amazonas

A maré na plataforma continental amazônica é predominantemente semidiurna e é amplificada na região costeira, caracterizando o estuário como de macro maré, somando-se a isso as grandes vazões do rio Amazonas, este ambiente apresenta uma forte dinâmica (GALLO, 2004).

A propagação da maré no trecho fluvial se dá na forma de uma onda progressiva com características semidiurnas e com a geração de outras componentes em decorrência de fatores como a geometria, os efeitos de águas rasas, o atrito no fundo e a vazão fluvial. As características peculiares do rio Amazonas, principalmente no trecho inferior, fazem com que as marés tenham uma influência no curso do rio até além de Óbidos (DEFANT, 1960; KOSUTH *et al.*, 1999).

As variações da altura de maré podem ser representadas pela soma de um número finito de termos harmônicos aos quais se chamam constituintes harmônicas da maré. As componentes harmônicas de maré têm associadas frequências relacionadas com as forças que são responsáveis pela sua geração. São classificadas em astronômicas, geradas pela atração gravitacional da lua, do sol e de águas rasas, que são o resultado das interações das componentes astronômicas ou com outras de águas rasas, devido aos processos não lineares presentes no escoamento (WESTERNIK *et al.*, 1989; GALLO, 2004).

Ao movimento periódico dos astros podem somar-se um número de fatores que contribuem para um comportamento não estacionário das marés em regiões estuarinas, como quando a onda é afetada pela vazão fluvial. Mas, no caso da propagação da onda de maré em rios e estuários, esses conceitos são discutidos devido à influência da vazão, o que dá o caráter não permanente ao fenômeno (GODIN, 1999). A Tabela 1 mostra as principais componentes astronômicas e suas origens (PUGH, 1987).

Tabela 1: Principais componentes astronômicas, períodos (msd: dia solar) e origem astronômica. (Fonte: PUGH, 1987).

Espécie	Componente	Período		Velocidade		Origem
		(msd)	(h)	f(cpd)	$\sigma(^{\circ}/h)$	
0	S _a	364.960	8759.040	0.0027	0.041	Solar anual
	S _{sa}	182.700	4384.800	0.0055	0.082	Solar semianual
	M _m	27.550	661.200	0.0363	0.544	Lunar mensal
	M _f	13.660	327.840	0.0732	1.098	Lunar quinzenal
1	Q ₁	1.120	26.880	0.8929	13.393	Elíptica lunar maior
	O ₁	1.076	25.824	0.9294	13.941	Principal lunar
		1.035	24.840	0.9658	14.487	Elíptica lunar menor
	M ₁	1.035	24.840	0.9661	14.492	Parallax lunar
		1.035	24.840	0.9664	14.497	Elíptica lunar menor
	P ₁	1.003	24.072	0.9970	14.955	Principal solar
	S ₁	1.000	24.000	1.0000	15.000	Radiação
	K ₁	0.997	23.928	1.0030	15.045	Principal lunar
		0.997	23.928	1.0030	15.045	Principal solar
J ₁	0.962	23.088	1.0395	15.593	Elíptica lunar	
2	N ₂	0.527	12.648	1.8975	28.463	Elíptica lunar menor
	M ₂	0.518	12.432	1.9305	28.958	Principal lunar
	L ₂	0.508	12.192	1.9686	29.529	Elíptica lunar menor
		0.508	12.192	1.9692	29.538	Elíptica lunar menor
	T ₂	0.501	12.024	1.9960	29.940	Elíptica solar maior
	S ₂	0.500	12.000	2.0000	30.000	Principal solar
	R ₂	0.499	11.976	2.0040	30.060	Elíptica solar menor
	K ₂	0.499	11.976	2.0040	30.060	Declinação da lua
0.499		11.976	2.0040	30.060	Declinação do sol	
3	M ₃	0.345	8.280	2.8986	43.478	Parallax lunar

“Em águas rasas a propagação da onda de maré é afetada pelo atrito e outros processos físicos (...)” (GALLO, 2004, p. 7). As distorções geradas por esses processos nos harmônicos principais que geram variações nos níveis e nas velocidades são representadas pela adição de harmônicos de ordem superior. Essas distorções podem ser expressas como harmônicos com velocidade angular igual a múltiplos, somas ou diferenças das velocidades das componentes principais, mostradas na Tabela 2, (GALLO, 2004).

A penetração da maré num estuário é o resultado da interação do escoamento fluvial e do movimento oscilatório gerado pela maré na sua embocadura, onde essas ondas longas são geralmente amortecidas e progressivamente distorcidas pelas forças do atrito no fundo e a vazão fluvial (GODIN, 1999) e influenciada também pela geometria do canal (IPPEN e HARLEMAN, 1966). Devido ao seu longo período e comprimento de onda, as ondas de maré comportam-se como ondas de águas rasas, sendo influenciadas pela profundidade em que se encontram. Algumas das componentes mais importantes de águas rasas são listadas na Tabela 2.

Tabela 2: Harmônicos de águas rasas, origem e período. (Fonte: PUGH, 1987).

Espécie	Componentes	Origem	$\sigma(^{\circ}/h)$	T(h)
Longo Período	M_{sf}	$M_2 - S_2$	1.016	354.366
Diurna	MP_1	$M_2 - P_1$	14.025	25.668
	SO_1	$S_2 - O_1$	16.057	22.420
Semidiurna	MNS_2	$M_2 + N_2 - S_2$	27.423	13.127
	$2MS_2$	$2M_2 - S_2$	27.968	12.872
	MA_2	$2M_2 - S_a$	28.943	12.438
	MB_2	$2M_2 + S_a$	29.025	12.403
	MSN_2	$M_2 + S_2 - N_2$	30.544	11.786
	$2SM_2$	$2S_2 - M_2$	31.016	11.607
3-diurna	MO_3	$M_2 + O_1$	42.927	8.386
	MK_3	$M_2 + K_1$	44.025	8.177
4-diurna	MN_4	$M_2 + N_2$	57.424	6.269
	M_4	$M_2 + M_2$	57.968	6.210
	MS_4	$M_2 + S_2$	58.984	6.103
	MK_4	$M_2 + K_1$	59.066	6.095
	S_4	$S_2 + S_2$	60.000	6.000
6-diurna	M_6	$M_2 + M_2 + M_2$	86.952	4.140
	$2MS_6$	$2M_2 + S_2$	87.968	4.092
8-diurna	M_8	$4M_2$	115.936	3.105

A penetração da maré dentro do estuário é fortemente afetada pela vazão fluvial, sendo responsável pelo amortecimento das diferentes componentes e também pela geração de novos harmônicos, afetada pela magnitude da vazão. Apresenta comportamento de onda dispersiva, com as componentes de período menor propagando-se mais rápido que as de baixa frequência, ou seja, as ondas de menor período são amortecidas mais rapidamente que as ondas de período maior.

No caso do estuário do rio Amazonas, onde a componente M_2 predomina na foz e na presença da vazão fluvial, os harmônicos mais importantes, em teoria, seriam: M_4 , M_{sf} , M_{S_4} e M_6 (GALLO, 2004). As amplitudes das principais componentes observadas na foz são de aproximadamente: $M_2 \approx 140$ cm, $S_2 \approx 30$ cm, $N_2 \approx 20$ cm (semidiurnas), $K_1 \approx 10$ cm e $O_1 \approx 5$ cm (diurnas) (GALLO & VINZON, 2005).

A Tabela 3 mostra as principais constantes harmônicas utilizadas na previsão de maré (variação do nível d'água) na estação de Ponta do Céu (Barra Norte do Rio Amazonas no estado do Amapá - AP), que está situada na ilha do Curuá (Figura 2), localizada na embocadura do estuário.

Tabela 3: Principais constantes harmônicas constituintes da maré selecionadas para fazer a previsão na estação de Ponta do Céu, localizada na ilha do Curuá, Barra Norte do rio Amazonas. (Fonte: FEMAR, 2009; <http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/014.html>).

CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS			
Componentes	Semiamplitude H (cm)	Componentes	Semiamplitude H (cm)
Mm	12,6	MU ₂	13,9
Msf	8,6	N ₂	29,0
Q ₁	1,4	NU ₂	5,5
O ₁	8,4	M ₂	148,3
M ₁	0,7	L ₂	12,4
P ₁	5,5	S ₂	34,8
K ₁	16,6	K ₂	9,5
J ₁	0,9	MO ₃	3,2
OO ₁	5,1	M ₃	1,2
MNS ₂	1,6	MK ₃	3,8
2N ₂	3,8	MN ₄	5,7
		M ₄	12,7
		SN ₄	1,9
		MS ₄	6,0

2.3. Regime de vazões do rio Amazonas em Óbidos

O rio Amazonas aporta ao Oceano Atlântico a maior vazão de água doce do mundo, sendo também o terceiro em importância em transporte de sedimentos em suspensão, liberando $1,2 \times 10^9$ toneladas de sedimentos por ano na plataforma (MEADE *et al.*, 1985). O ciclo hidrológico anual do rio Amazonas apresenta um período caracterizado por águas altas, preponderantemente entre os meses de maio a julho, e um de águas baixas, tipicamente entre os meses de outubro e dezembro (OLIVEIRA, 2007).

A vazão líquida ingressando no estuário pode ser estimada a partir do somatório da vazão do rio Amazonas em Óbidos e do aportado pelos rios Tapajós e Xingu (afluentes principais à jusante de Óbidos, ver Figura 1). O regime hidrológico do rio Amazonas apresenta uma variação sazonal, com uma vazão média de, aproximadamente, $172 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ em Óbidos, máximos em junho na ordem de $278 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e mínimos em novembro da ordem de $72 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, como observado na Figura 4 (ANA, 2009). A vazão média dos rios Tapajós e Xingu é de aproximadamente $11 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e $9 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, o que corresponde a aproximadamente 6,5 % e 5,3 % em relação à vazão média em Óbidos (GABIOUX, 2002).

Nessa localidade, onde há uma das principais estações de referência hidráulico-sedimentológica do rio Amazonas (estação de Óbidos, no Estado do Pará - PA), a vazão líquida média é obtida concomitantemente a partir de registros diários de níveis e curvas-chave ajustadas. Para obter-se uma estimativa do comportamento dos níveis d'água e vazões no posto fluviométrico de Óbidos, construiu-se uma curva chave média a partir da totalidade das medições de vazão registradas no período de 1996 a 1999, fornecidas pela ANA (Agência Nacional de Águas), que é mostrada na Figura 3.

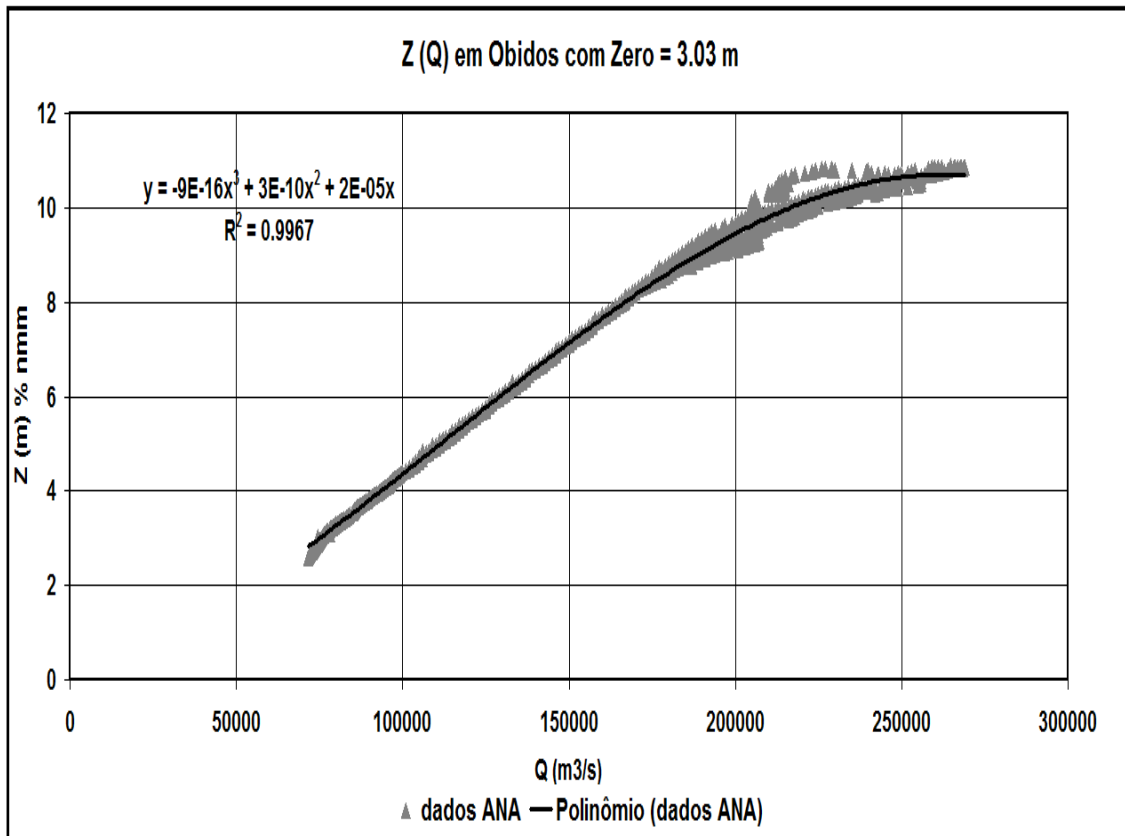


Figura 3: Curva chave para a estação fluviométrica de Óbidos no rio Amazonas.

A Figura 4 mostra o hidrograma das vazões para a estação de Óbidos no período de fevereiro de 1968 a maio de 2008, aproximadamente 40 anos de registros, com as maiores vazões, observadas no mês de junho de 1989 e 2006, da ordem de 275×10^3 e 278×10^3 m^3/s , e as menores vazões, em novembro de 1997 e 2005, da ordem de 72×10^3 e 76×10^3 m^3/s , respectivamente.

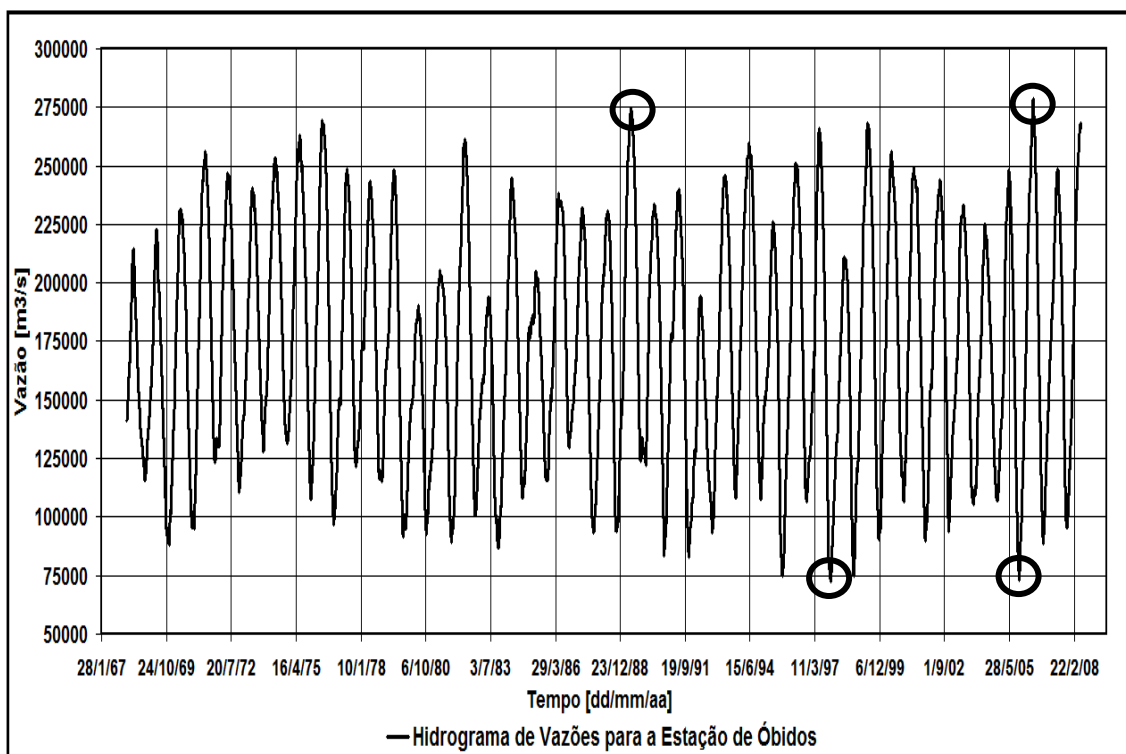


Figura 4: Regime hidrológico do rio Amazonas, em Óbidos, de 1968 a maio de 2008. Vazões calculadas a partir da informação de cotas diárias e curvas chaves fornecidas pela Agência Nacional de Águas - ANA (fonte: ANA, 2008).

A Tabela 4 apresenta os valores de máximas, mínimas e médias vazões registradas para um período de 10 anos (1998 a 2007) analisado. As máximas vazões observadas foram no mês de junho de 1999 e de 2006. Já os menores valores foram no mês de novembro de 1998 e de 2005.

Tabela 4: Vazões máximas, médias e mínimas no período 1998 a 2007 para a estação de Óbidos. Fonte: ANA (Agência Nacional das Águas, 2008).

ANO	Vazão [m ³ /s]		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA
1998	211200	75080	149646
1999	268300	90650	185923
2000	256260	123600	181795
2001	249200	132800	175322
2002	244000	132800	177982
2003	233100	105600	170469
2004	224800	107300	164307
2005	248100	72840	161740
2006	278700	88460	184516
2007	248800	95530	173965

3. DADOS DE CAMPO UTILIZADOS

Devido ao efeito da maré na vazão dos canais na região estuarina do rio Amazonas, para a sua determinação é necessária a medição contínua durante um ciclo de maré. Considerando as grandes extensões dos canais do rio Amazonas em sua foz (aproximadamente 12,9 km cada canal: Norte e Sul), os métodos antigos de medição de vazão em rios não se aplicam para medição de vazão nesta situação. A medição da vazão, neste caso, somente foi possível a partir do desenvolvimento dos equipamentos de medição de vazão por efeito Doppler, devido à redução drástica do tempo necessário para a medição.

3.1. Campanhas de Vazões

Os dados de campo utilizados na realização deste estudo são provenientes de três campanhas de medições de vazões na região estuarina do rio Amazonas (Figura 5). Nas três campanhas foi utilizado o equipamento “Acoustic Doppler Current Profile” ADCP de 600 MHz, da ANA (Agência Nacional de Águas).

A primeira campanha de vazões foi desenvolvida no âmbito do projeto PIATAM-mar II, e realizada durante os dias 16 a 26 de junho de 2007. Esta campanha, na qual fiz parte da equipe desde a organização até a execução, foi realizada em conjunto com a ANA, UFPA e IEPA (Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá). As medições de vazão atingiram um tempo total de 42h14min, somando-se o tempo de duração de cada uma das medições realizadas nas seções dos principais canais de interesse.

No período de 01 a 08 de junho de 2008 foi realizada a segunda campanha de medição de vazões na foz do rio Amazonas, a cargo da ANA, durante a época de cheia. Esta campanha contou com a participação de equipes técnicas da Agência Nacional de Águas – ANA, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, IEPA, Institut de Recherche pour Développement – IRD (França) e de pesquisadores da COPPE/UFRJ. As medições nas três seções resultaram em um tempo total de 36hs39min.

No período de 30/09 a 05/10 de 2008 foi realizada a terceira campanha de medição de vazões na foz do rio Amazonas, sendo a primeira realizada durante o período de seca, que varia de setembro a novembro, com o tempo total de realização das medições de aproximadamente 42h25min. Esta campanha contou com a participação de equipes técnicas da ANA, IEPA e também da COPPE/UFRJ.

Foram realizadas medições de velocidade, direção das correntes, vazão e batimetrias durante um ciclo de maré (~13 horas). As medições foram feitas em três seções definidas na primeira campanha em 2007.

Nos anexos 1, 2 e 3 e nas tabelas 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27, respectivamente, são mostrados os tempos de início e fim de cada travessia, a área da seção transversal registrada durante a medição, a velocidade média do barco utilizado, a velocidade média do fluxo e a vazão média resultante da travessia para as seções medidas nas três campanhas.

Então, a distribuição da vazão fluvial nos principais canais (Canal Norte, Canal Sul e Estreito de Breves) do estuário do rio Amazonas será analisada a partir dos dados das campanhas realizadas na época de cheia (2007 e 2008) e seca (2008).

3.2. Localização geográfica das seções

A Figura 5 mostra as seções medidas durante as campanhas, as quais foram denominadas de Estreito de Breves (Canal do rio Jacaré); Canal Sul (Canal do Vieira Grande) e Canal Norte (Canal em frente à cidade de Macapá-AP).

No Estreito de Breves – Canal do rio Jacaré – a primeira travessia foi iniciada na margem direita nas coordenadas $0^{\circ}56.3631'S/-50^{\circ}49.1826'W$, terminando na margem esquerda no ponto $0^{\circ}56.7942'S/-50^{\circ}48.0749'W$, registrados por meio de um GPS e indicados na Figura 6.

No Canal Sul – Canal do Vieira Grande – a primeira travessia foi iniciada na margem direita nas coordenadas $0^{\circ}11.1758'S/-50^{\circ}34.1082'W$, terminando na margem esquerda no ponto $0^{\circ}07.6340'S/-50^{\circ}39.3166'W$, como indicado na Figura 7.

No Canal Norte – em frente à cidade de Macapá (AP) – na primeira travessia não foi possível registrar as coordenadas devido a um problema no GPS, sendo registradas somente a partir da segunda, que foi iniciada na margem esquerda nas coordenadas $0^{\circ}05.6144'S/-50^{\circ}59.7038'W$ e terminando na margem direita no ponto $0^{\circ}03.0689'S/-51^{\circ}05.4845'W$, como indicado na Figura 8.

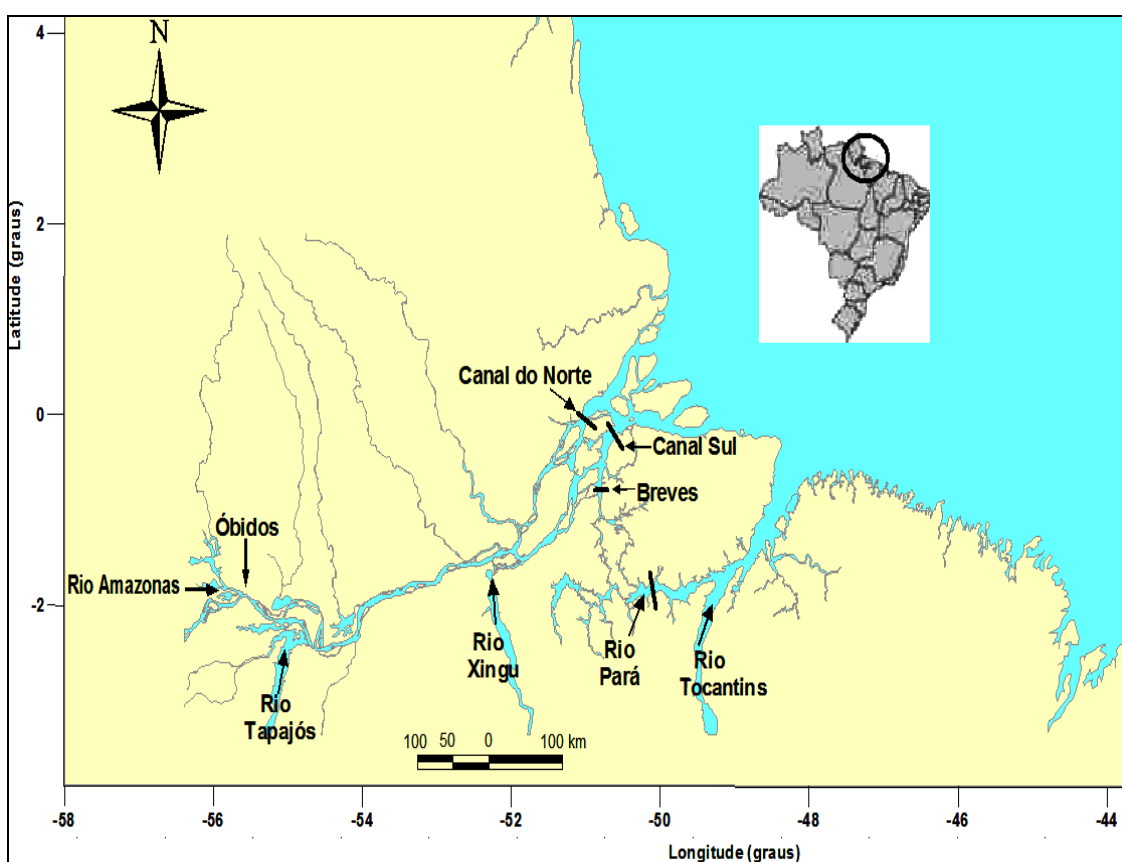


Figura 5: Mapa com identificação das seções onde foram feitas as medições durante as campanhas de vazões e os principais tributários do rio Amazonas pela margem direita.

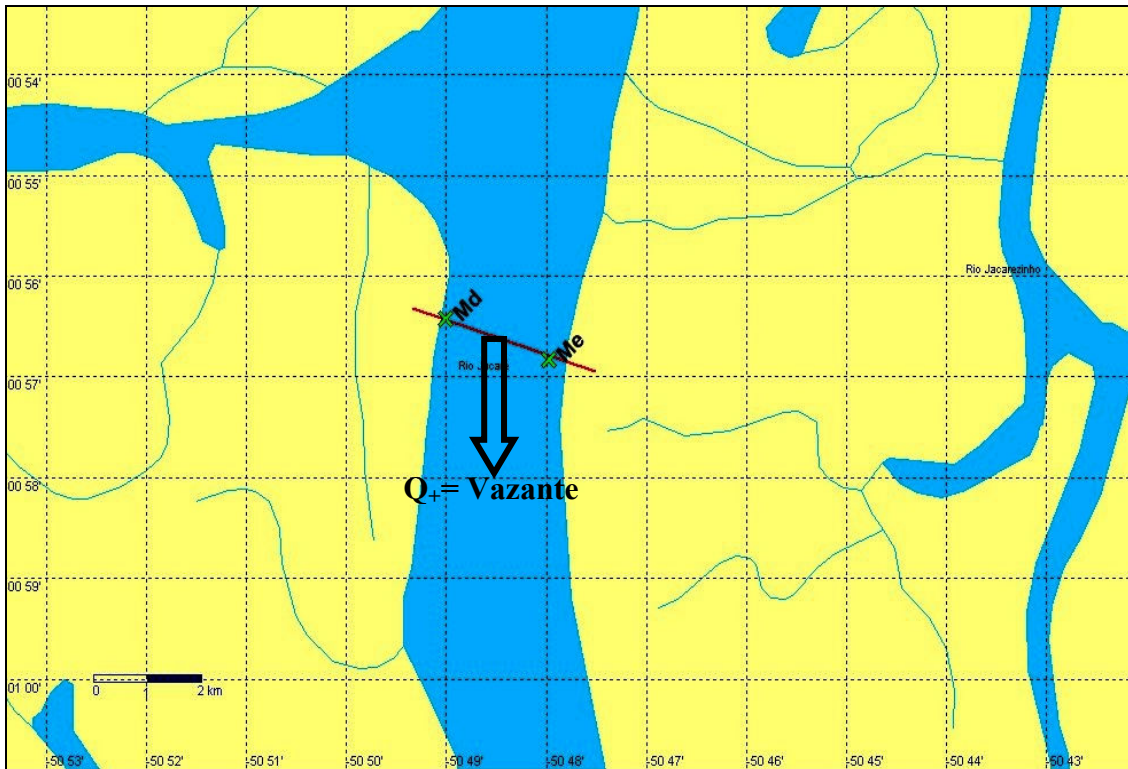


Figura 6: Representação da seção onde foram feitas as medições no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves), com a identificação das margens adotadas: Md (margem direita) e Me (margem esquerda) e a indicação do sentido da vazão de vazante (Q_+), em direção ao rio Pará.

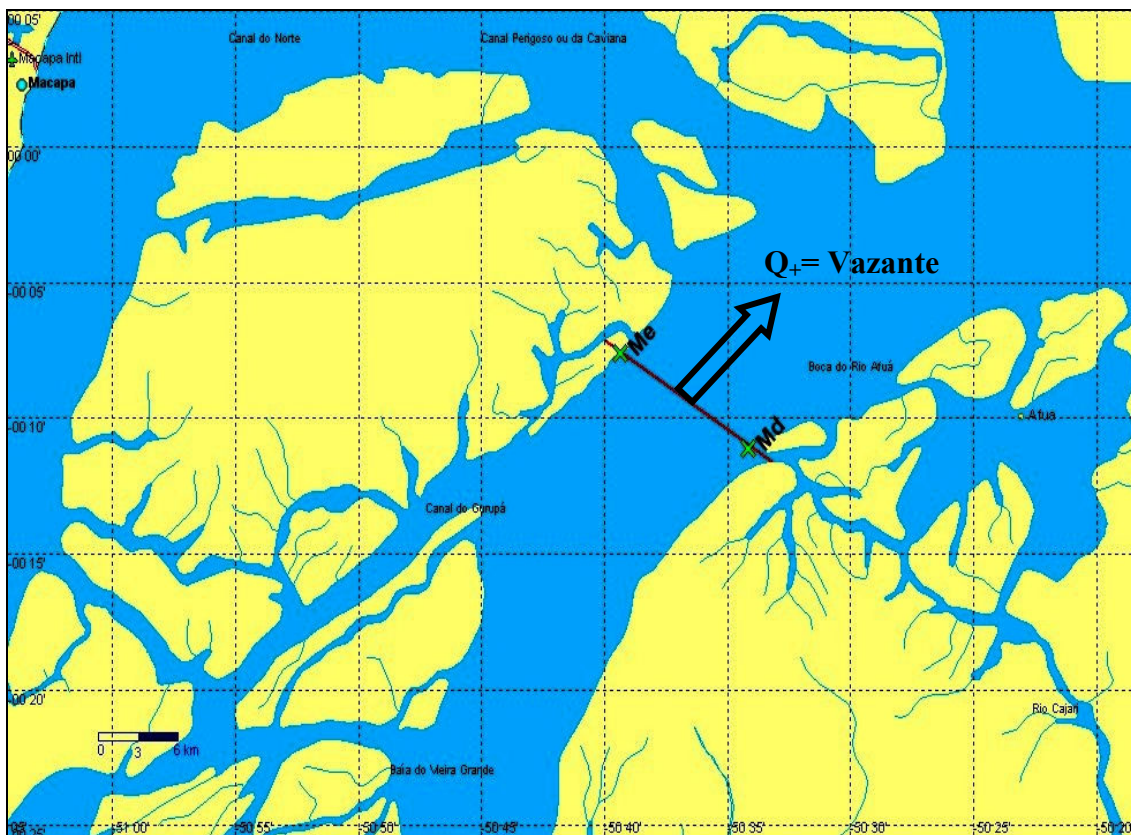


Figura 7: Representação da seção onde foram feitas as medições no canal do Vieira Grande (Canal Sul), com a identificação das margens adotadas: Md (margem direita) e Me (margem esquerda) e a indicação do sentido da vazão de vazante (Q_+), em direção ao Oceano.

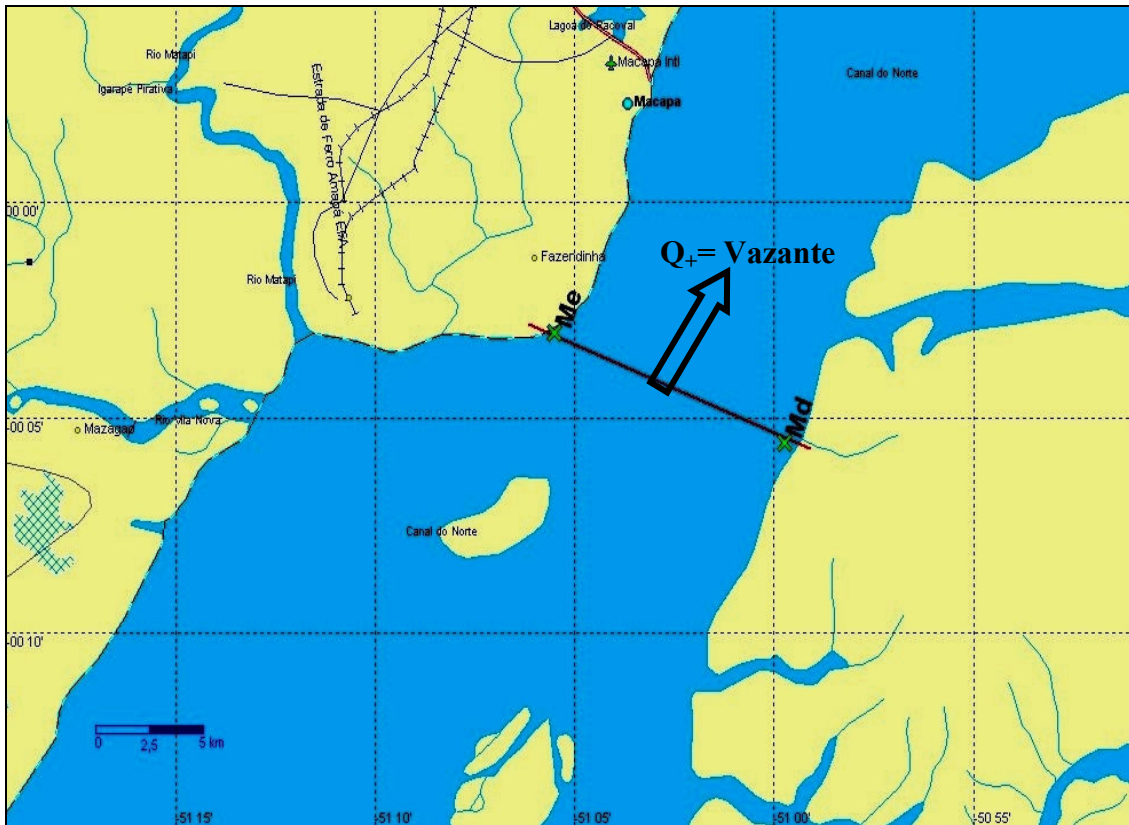


Figura 8: Representação da seção onde foram feitas as medições no canal em frente à cidade de Macapá (AP) (Canal Norte), com a identificação das margens adotadas: Md (margem direita) e Me (margem esquerda) e a indicação do sentido da vazão de vazante (Q_+), em direção ao Oceano.

A Tabela 5 mostra um resumo de algumas das principais características das seções, observadas durante as medições na época de cheia em 2007/2008 e seca em 2008, a partir dos dados fornecidos pelo ADCP.

Tabela 5: Resumo das principais características observadas nas seções durante as medições na época de cheia em 2007/2008 e seca 2008. EB (Estreito de Breves), CS (Canal Sul) e CN (Canal Norte).

Seções	EB	CS	CN
Cheia – 2007			
Distância Média Entre as Margens	~2.3 km	~12.2 km	~11.9 km
Duração Média	13h05min.	13h08min.	13h23min.
Nº de Travessias	29	11	14
Tempo Médio de Travessias	26min.	1h18min.	58min.
Cheia - 2008			
Duração Média	13h06min.	12h40min.	11h36min.
Nº de Travessias	42	10	10
Tempo Médio de Travessias	18min.	1h22min.	1h17min.
Seca - 2008			
Duração Média	13h14min.	15h30min.	12h15min.
Nº de Travessias	21	13	12
Tempo Médio de Travessias	38min.	1h15min.	1h05min.

3.3. Previsão de maré para o período das campanhas

Como referência para as medições, nas campanhas de 2007 e 2008 foi utilizada a previsão de maré para a estação de Ponta do Céu, na Barra Norte do Rio Amazonas, localizada na Ilha do Curuá, na latitude $0^{\circ} 5.6'N$ e longitude $50^{\circ} 06.8'W$. A Figura 9, Figura 10 e Figura 11, mostram a previsão de maré para o período das medições e as condições de maré em que elas foram realizadas. A campanha de 2007, na época de cheia, foi realizada em maré de quadratura, do dia 21 a 26 de junho. A campanha de 2008, também na época de cheia, foi realizada do dia 3 a 6 de junho em maré de sizígia. Já a campanha realizada na época da seca do rio Amazonas, do dia 30 de setembro a 3 de outubro de 2008, também ocorreu durante maré de sizígia.

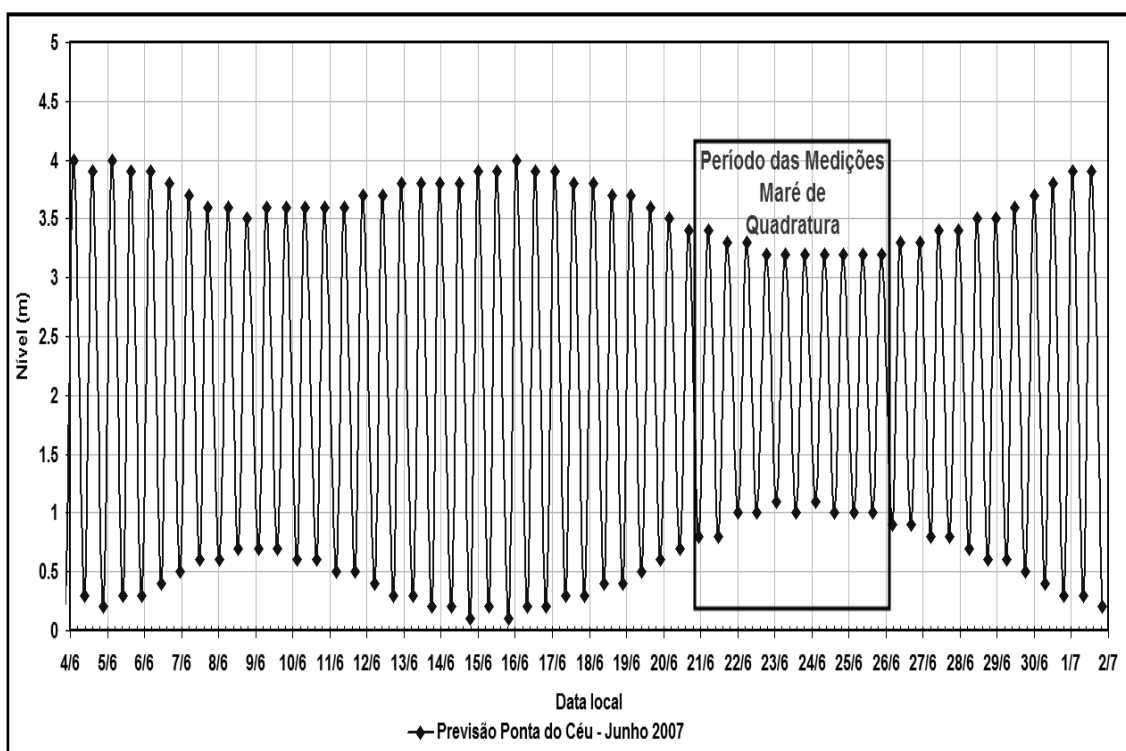


Figura 9: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu, na época de cheia do rio Amazonas, para o mês de jun/2007, em destaque o período em que foram realizadas as medições e as condições de maré.

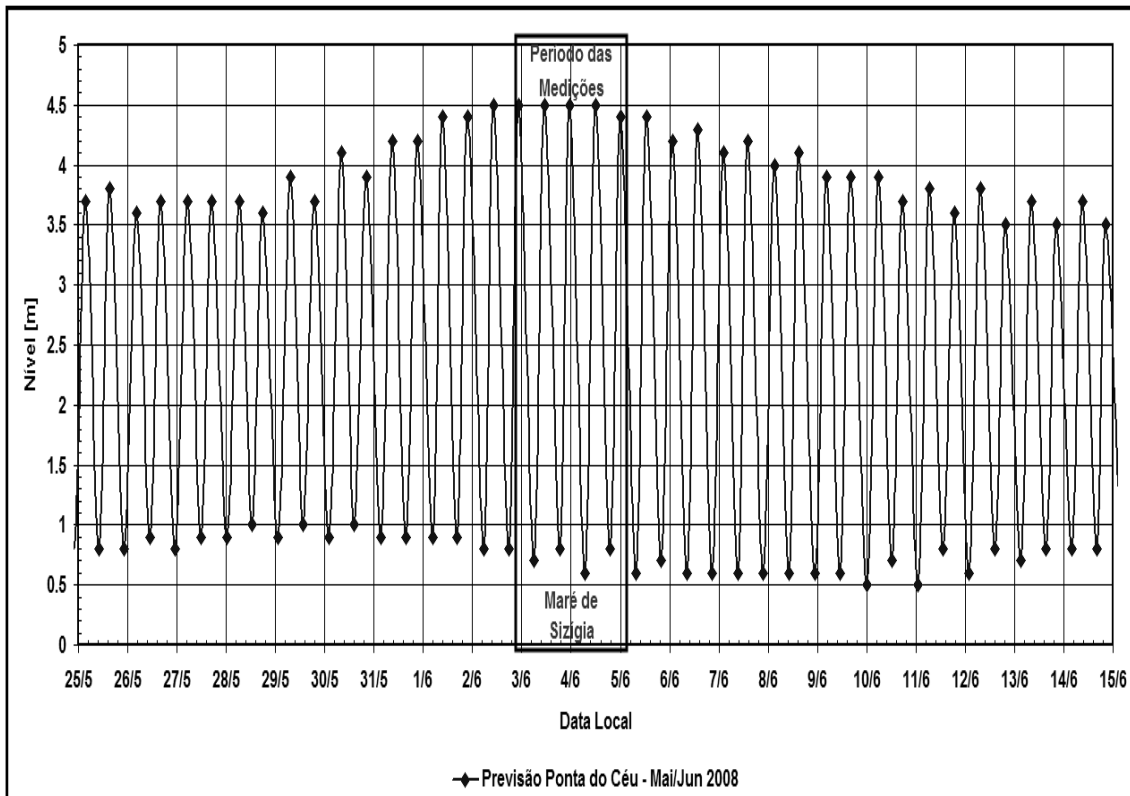


Figura 10: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu, na época de cheia do rio Amazonas, para o período de 25 de maio a 15 de junho de 2008, em destaque o período em que foram realizadas as medições e as condições de maré.

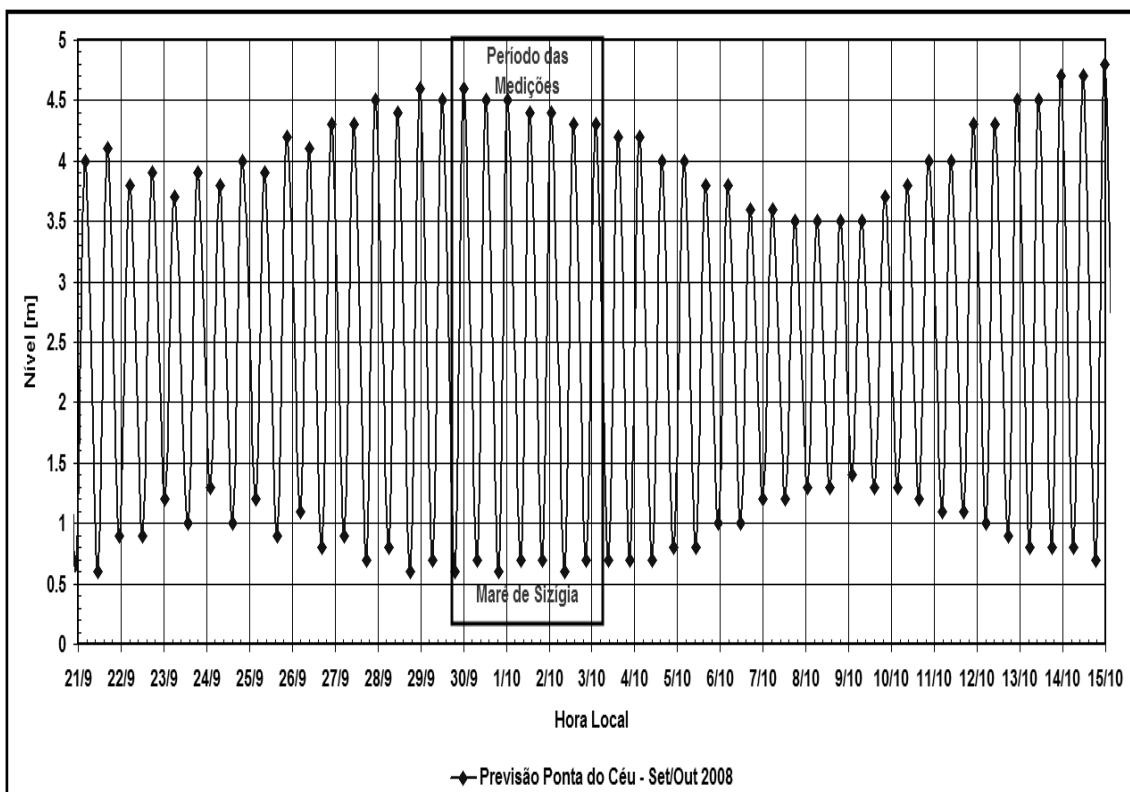


Figura 11: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu, na época de seca do rio Amazonas, no período de 21 de setembro a 15 de outubro de 2008, em destaque o período em que foram realizadas as medições e as condições de maré.

3.4. Metodologias empregadas na obtenção dos dados de vazões

As informações necessárias à caracterização da vazão residual em cada uma das seções de medição, ao longo da área de estudo, foram obtidas com base nos referidos levantamentos dos perfis transversais obtidos mediante a utilização conjunta do ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 600 kHz com um GPS (Global Positioning System), modelo XL12 e II Plus, da Garmin®. Sendo o primeiro um Correntômetro Acústico de Efeito Doppler², e o último equipamento destinado à obtenção de coordenadas através do geoposicionamento por satélite.

O software utilizado durante as medições foi o Winriver, configurado para a captura e o gerenciamento das informações recebidas de acordo com as condições observadas, tais como: armazenar, processar e exibir os dados registrados pelo ADCP que são mostrados em tempo real, fornecendo informações das diferentes velocidades nas seções verticais do rio e de outras variáveis, como vazão, vetor do fluxo, temperatura, profundidade, distância entre as margens, área da seção transversal, velocidade relativa do barco, rumo do barco, além de outros dados que podem ser utilizados para estimar a quantidade de sedimentos em suspensão (MUELLER, 2002; KOSTASCHUK, et al, 2004; RDI, 2007).

A Figura 12 mostra a interface do programa Winriver, na qual está sendo mostrado o resultado de uma travessia de uma margem à outra realizada no Canal Sul (Canal do Vieira Grande), no qual se registrou uma vazão média de 259546 m³/s para esta travessia.

² Trata-se da mudança na frequência observada de uma onda, quando a fonte ou o detector se move relativamente ao meio onde a mesma se propaga. No tocante ao princípio específico do ADCP, trata-se da mudança de frequência do sinal transmitido pelo sonar, causado pelo movimento relativo entre o instrumento e o material em suspensão na água, sob a ação do feixe de ondas sonoras.

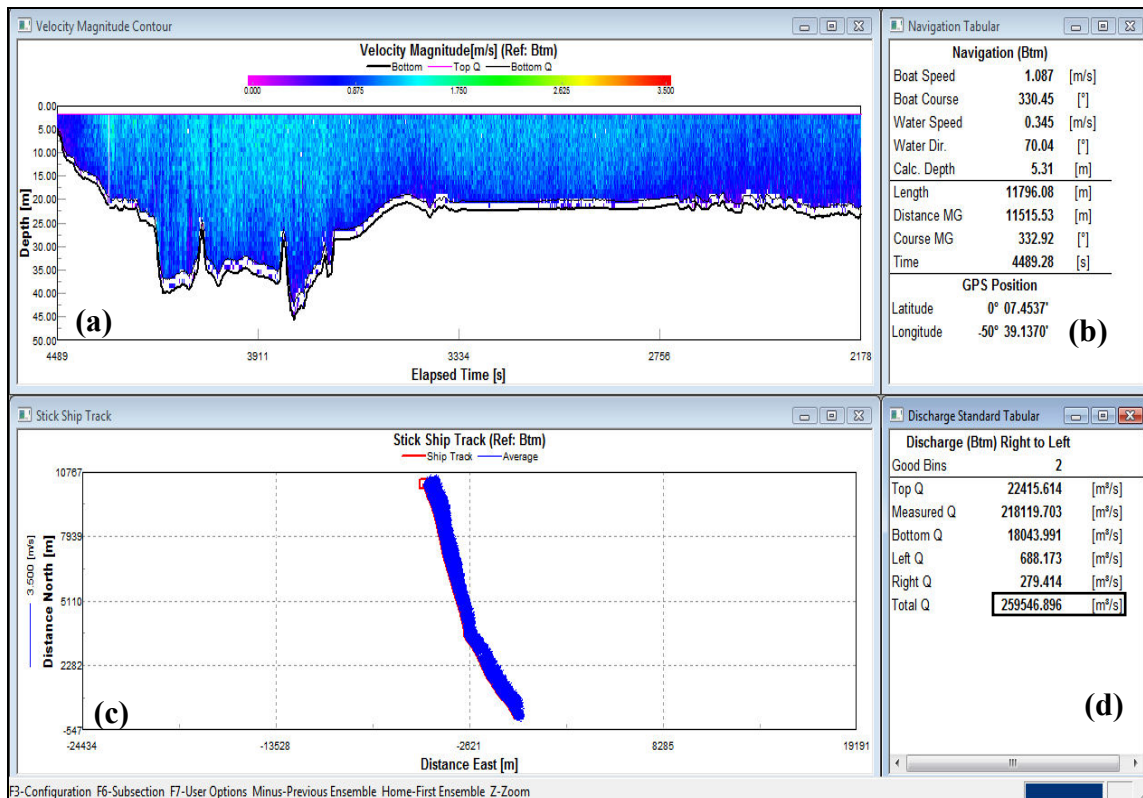


Figura 12: Interface do programa WinRiver utilizado para processar o sinal transmitido pelo ADCP. (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI Instruments).

Vale ressaltar que parte da vazão informada pelo ADCP resulta da estimativa para a faixa superficial e a próxima ao fundo do rio, onde o equipamento não consegue medir (GAMARO, 2007). Ao proceder à medição da vazão para uma dada seção transversal, fazem-se necessárias também estimativas das vazões referentes a cada uma das margens. Nesses casos, as vazões parciais são calculadas através de extrapolações dos perfis obtidos nas áreas medidas.

A Figura 13 mostra o posicionamento adotado para o equipamento, fixado na lateral da embarcação, durante as medições. A fixação do ADCP à embarcação foi realizada mediante a utilização de estrutura de suporte em alumínio, especialmente projetada para a finalidade.



Figura 13: Anteparo utilizado para afixar o ADCP, que está submerso, na lateral do barco.

3.4.1. Curvas de vazões da campanha de 2007, cheia do rio Amazonas

❖ Estreito de Breves – Canal do rio Jacaré

O ADCP nos dá como resultado, ao final de cada uma das travessias, um valor médio de vazão que é procedente da integração que o equipamento faz da área da seção entre o início e o fim da medição. As medições no Estreito de Breves (Canal do rio Jacaré) foram realizadas no período de cheia do rio Amazonas, no dia 21 de junho de 2007, com um total de 29 travessias utilizando o ADCP de 600 kHz. A largura média do canal é de ~2,3 km, as medições iniciaram-se às 5h55m39s e encerraram-se às 19h18m7s, obtendo um tempo total de medições de 13h22m24s, um pouco mais do que o previsto para um ciclo de maré (~13 horas).

As medições resultaram na curva de vazões apresentada na Figura 14. A Figura 15 mostra um exemplo do perfil de velocidades para uma das travessias que resultou numa vazão de 37622 m³/s, neste caso a vazão máxima registrada. A partir dos dados fornecidos pelo ADCP constatou-se uma vazão média de 1038 m³/s, no sentido do rio Amazonas ao rio Pará.

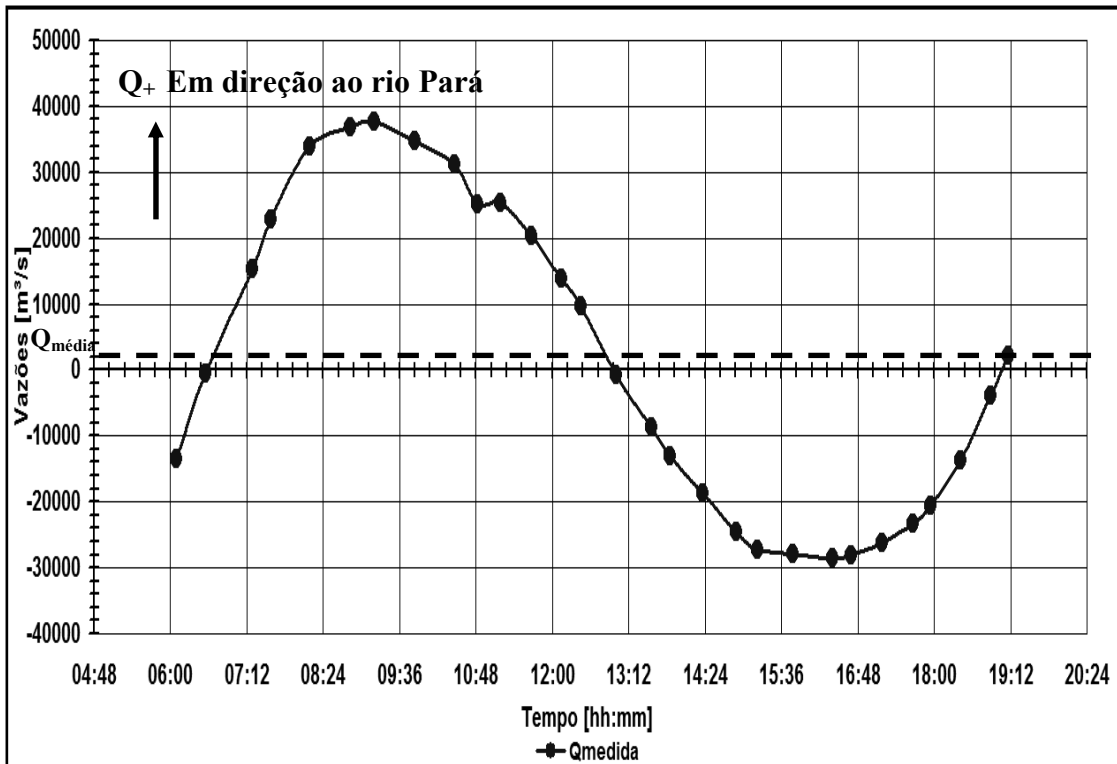


Figura 14: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves.), na época de cheia do rio Amazonas em 2007.

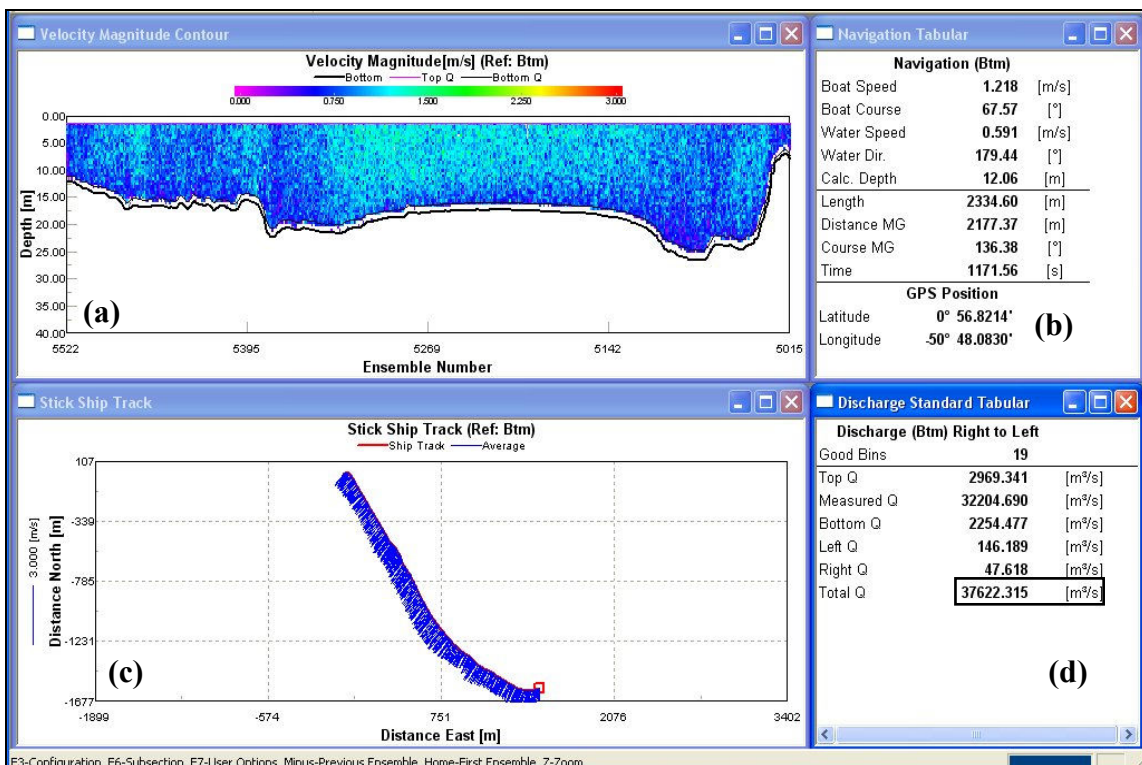


Figura 15: Seção transversal realizada no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves) em 19/06/2007. (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI Instruments).

❖ Canal Sul – Canal do Vieira Grande

A medição no Canal do Vieira Grande, realizada durante a época de cheia do rio Amazonas, aconteceu no dia 23 de junho de 2007. Nesta seção foram realizadas 11 travessias, devido à limitação de velocidade do barco (~3,0 m/s) e à extensão do canal (~12,2 km). Foi dado início às medições às 5h11m51s e encerrado às 19h37m33s, obtendo um total de tempo de medições constantes de 14h25m42s. As medições resultaram na curva de vazões apresentada na Figura 16, o que resultou em uma vazão média residual da ordem de $158117 \text{ m}^3/\text{s}$ em direção do oceano. A Figura 17 mostra um exemplo do perfil das velocidades para uma das travessias, que resultou numa vazão de $319178 \text{ m}^3/\text{s}$, a máxima registrada durante as medições entre os dois principais canais durante a campanha de 2007.

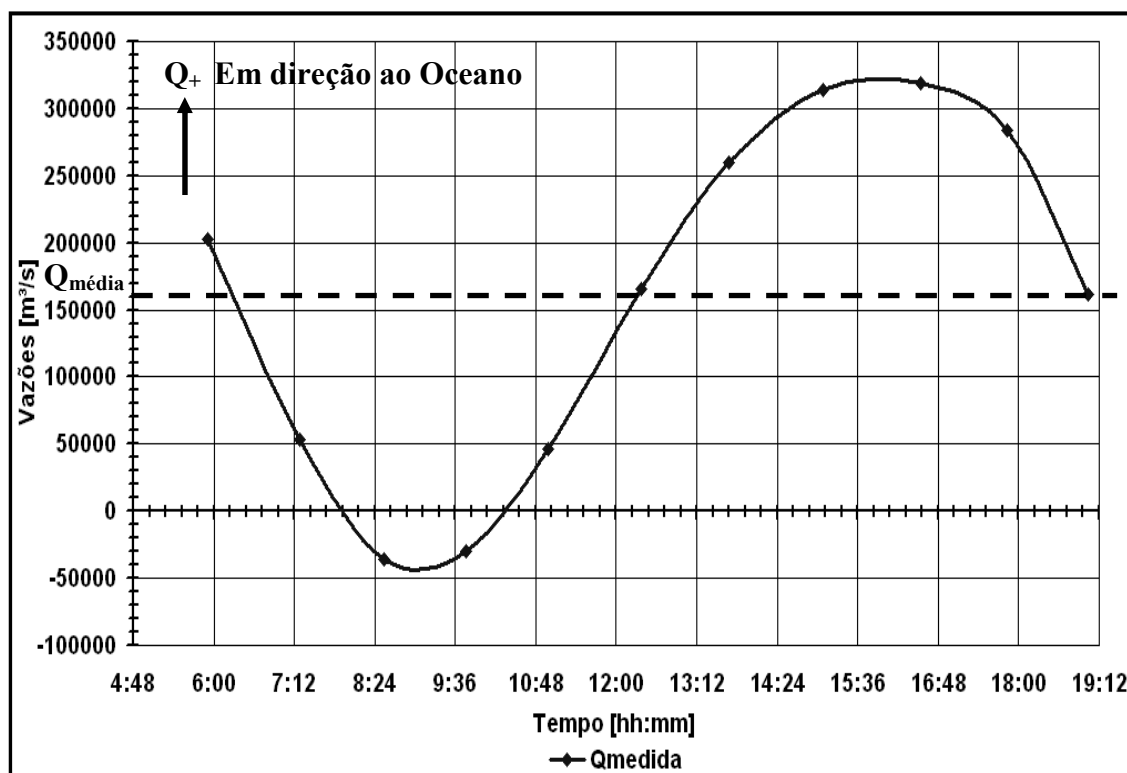


Figura 16: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do Vieira Grande – Canal Sul, na época de cheia do rio Amazonas em 2007.

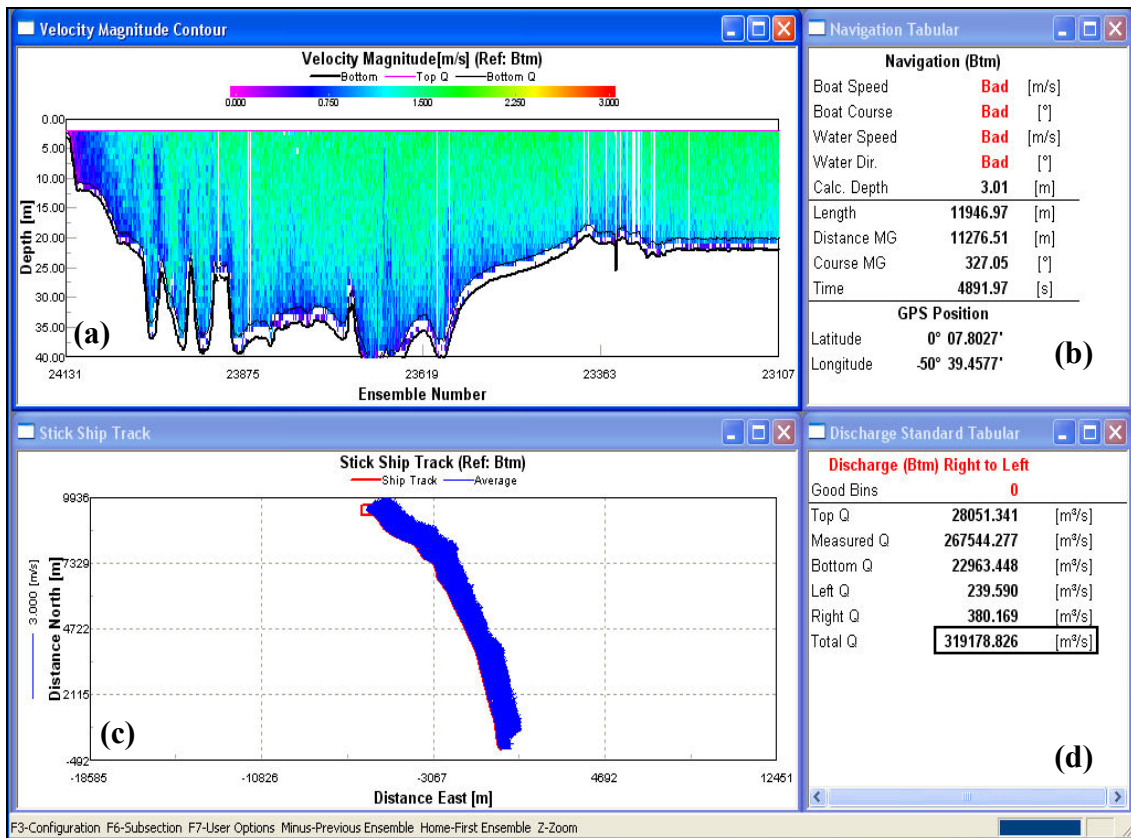


Figura 17: Seção transversal realizada no Canal do Vieira Grande; (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI Instruments).

❖ Canal Norte em frente à cidade de Macapá-AP

As medições no Canal Norte realizadas em frente à cidade de Macapá – AP, no dia 26 de junho de 2007, resultaram em um total de 14 travessias durante um ciclo de maré (~13 horas) em um canal que tem entre suas margens uma extensão de aproximadamente 11,9 km. As medições iniciaram-se às 5h31m34s e encerraram-se às 19h51m54s, com um tempo total de 14h20m20s. As medições nesta seção resultaram na curva de vazões apresentada na Figura 18. Na Figura 19 mostra-se um exemplo do perfil de velocidades para uma das travessias que resultou numa vazão de 206988 m³/s. A vazão média residual fornecida pelo ADCP foi de 114462 m³/s, no sentido do oceano.

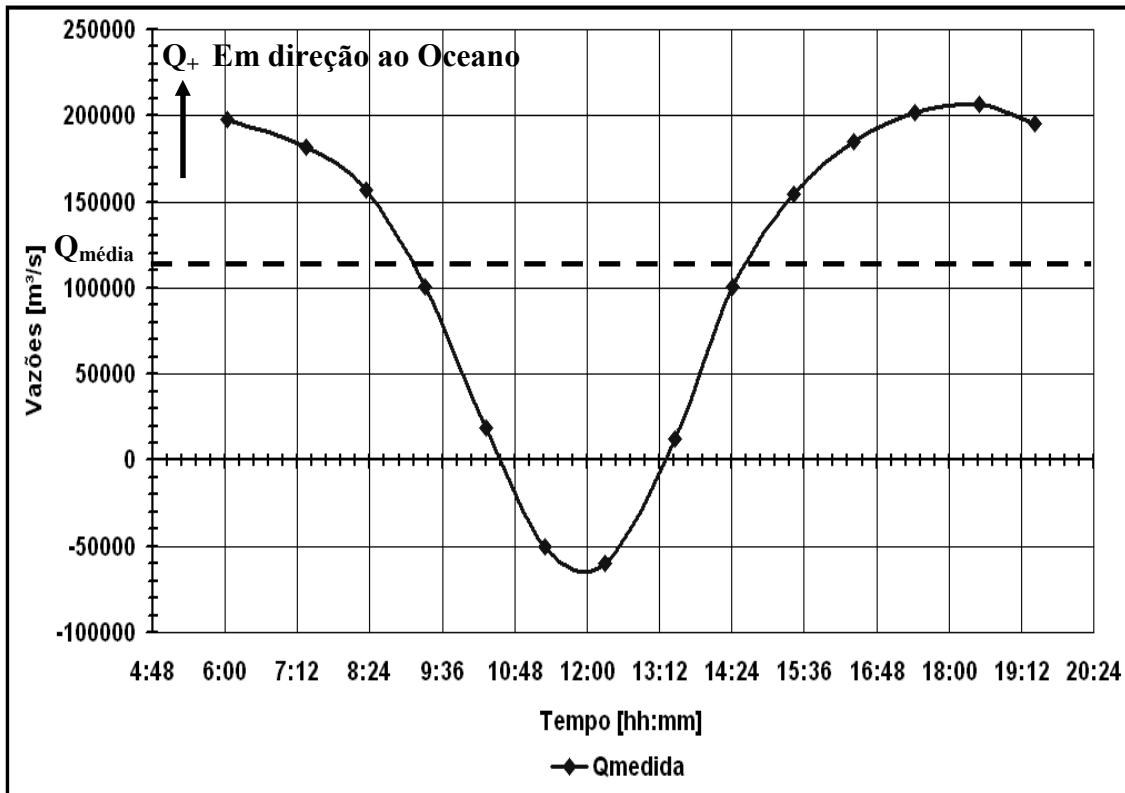


Figura 18: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal em frente à cidade de Macapá (AP) - Canal do Norte, na época de cheia do rio Amazonas em 2007.

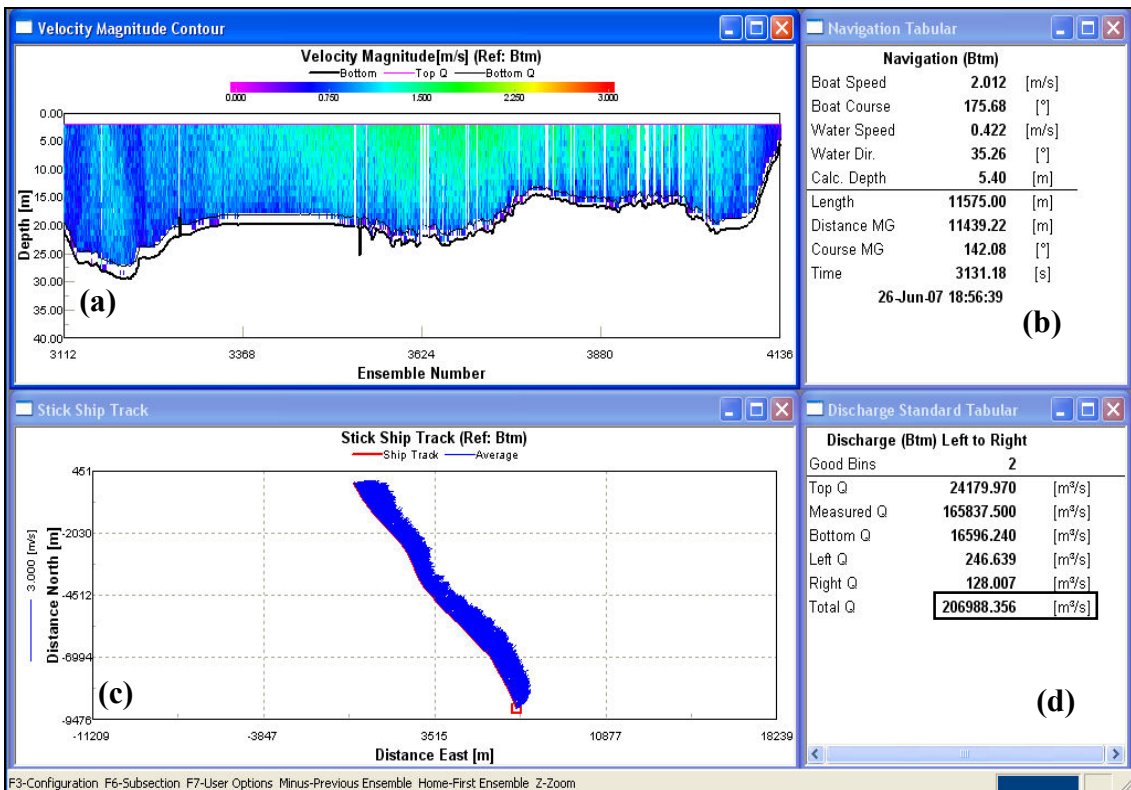


Figura 19: Seção transversal realizada no Canal em frente à cidade de Macapá (AP); (a) perfil da magnitude das velocidades e batimetria; (b) localização da seção transversal; (c) percurso do barco e as linhas de corrente; (d) resultados. (Fonte: Programa WinRiver - RDI Instruments).

3.4.2. Curvas de vazões da campanha de 2008, na época de cheia do rio Amazonas

❖ Estreito de Breves – Canal do rio Jacaré

As medições foram iniciadas na margem esquerda do canal às 7h09m29s e encerradas na direita às 19h51m54s, fazendo um tempo total de medições de 14h20m20s, um pouco mais do que o previsto para um ciclo de maré (~13 horas), com um total de 42 travessias e um tempo médio de aproximadamente 18 minutos entre elas. Com isso, a hora correspondente ao início da onda de vazão foi às 07h19m52s e a correspondente ao final foi às 20h15m09s, o que resultou em uma duração de 13h05m40s. As medições resultaram na curva de vazões, apresentada na Figura 20, sendo que a vazão máxima atingida em direção ao rio Amazonas foi de $-42855 \text{ m}^3/\text{s}$, e a máxima em direção ao rio Pará de $583131 \text{ m}^3/\text{s}$, com uma vazão residual de $3291 \text{ m}^3/\text{s}$ no sentido do rio Amazonas ao rio Pará.

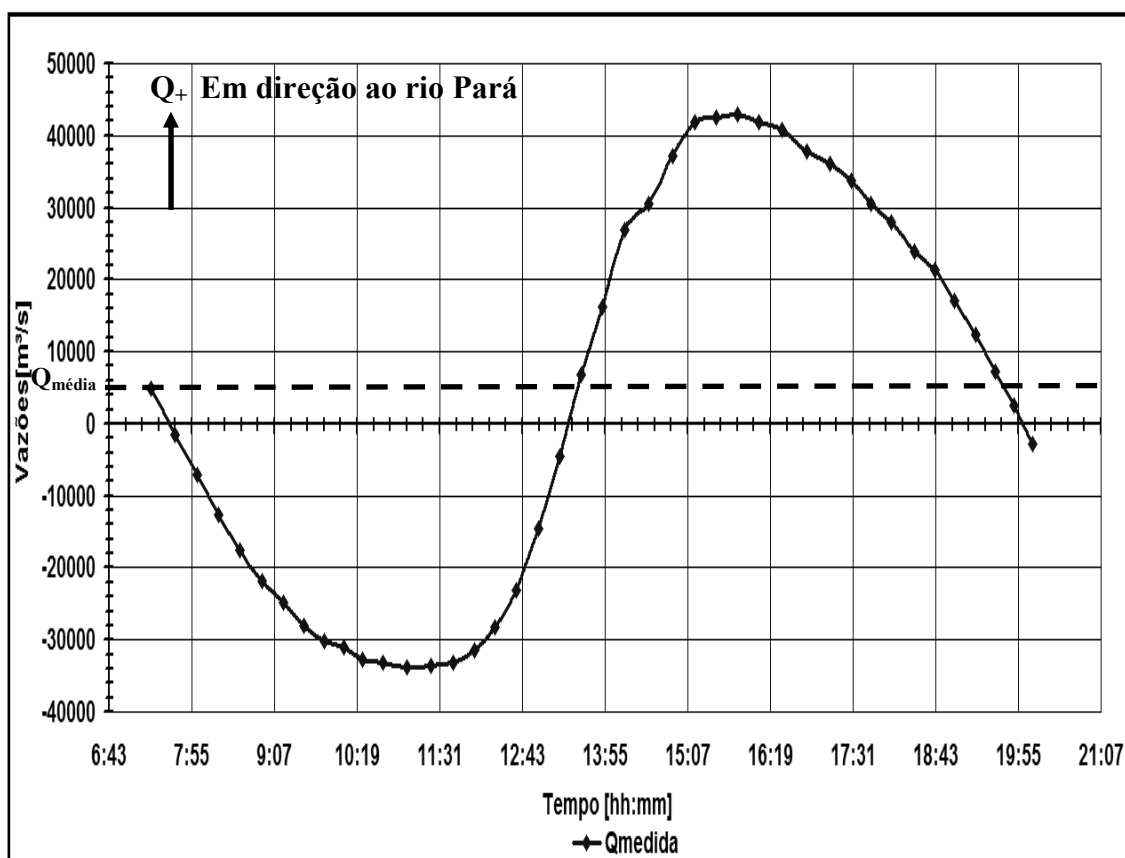


Figura 20: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do rio Jacaré – Estreito de Breves, na época de cheia do rio Amazonas em 2008.

❖ Canal Sul - Canal do Vieira Grande

As medições foram iniciadas na margem direita do canal às 7h40m45s e encerradas na esquerda às 21h58m59s, com um tempo total de medições de 14h18m14s em 10 travessias e um tempo médio de 1h22m entre elas. À hora média correspondente ao início da onda de vazão foi às 08h24m53s e a correspondente ao final foi às 21h05m05s, o que resultou em uma duração de 12h40m12s. A partir desses resultados gerou-se a curva da onda de vazão da Figura 21. A partir dos resultados das medições, constatou-se uma vazão máxima de $382 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ na direção do oceano, com uma vazão residual de $154 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, também no sentido do Oceano.

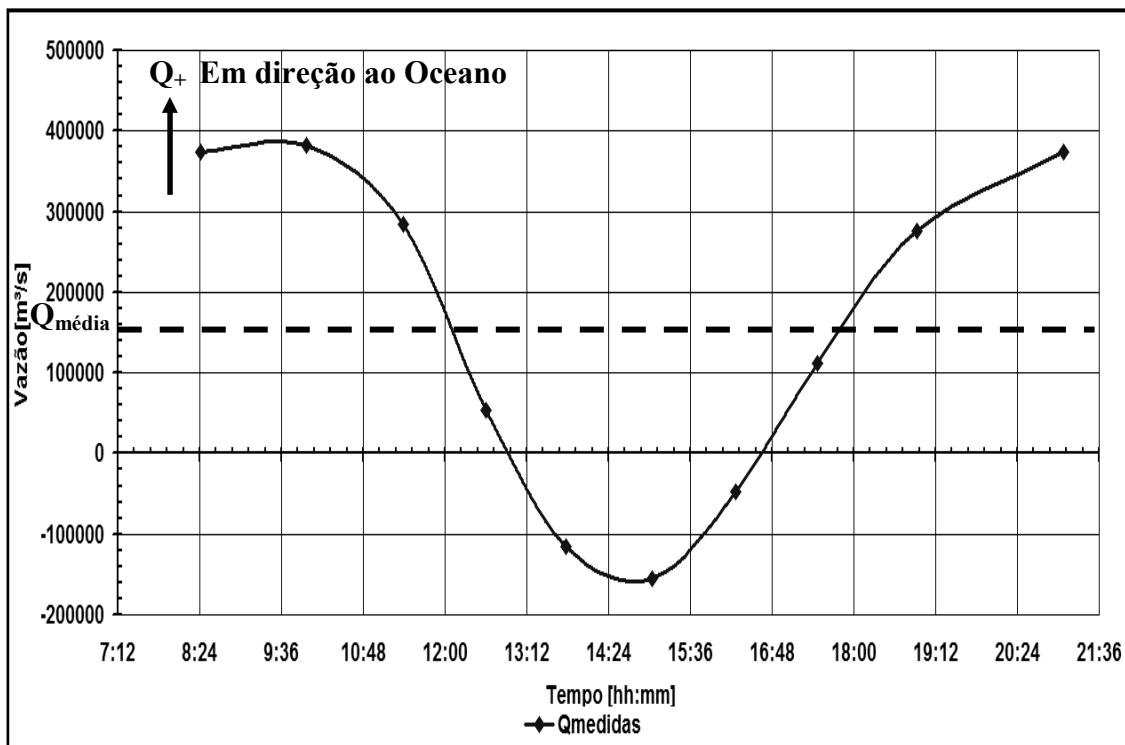


Figura 21: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do Vieira Grande - Canal Sul do rio Amazonas, na época de cheia do rio. Amazonas em 2008.

❖ Canal Norte em frente à cidade de Macapá (AP)

As medições iniciaram-se na margem direita do canal às 8h18m36s e o término na margem esquerda às 21h22m54s, com um tempo total de medições de 13h04m21s, um pouco mais do que um ciclo de maré (~13 horas), com um total de 10 travessias e um tempo médio de aproximadamente 1h17m22s entre elas.

Então, a partir do tempo médio entre as travessias, assume-se que a hora correspondente ao início da onda de vazão foi às 09h03m22s e a final da onda foi às 20h39m41s, o que resultou em uma duração de 11h36m29s. A partir desses resultados das medições, gerou-se a curva da onda de vazão apresentada na Figura 22, constatando-se uma vazão máxima de $256 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ em direção ao oceano e a vazão residual foi de $100875 \text{ m}^3/\text{s}$, também no sentido em direção ao oceano.

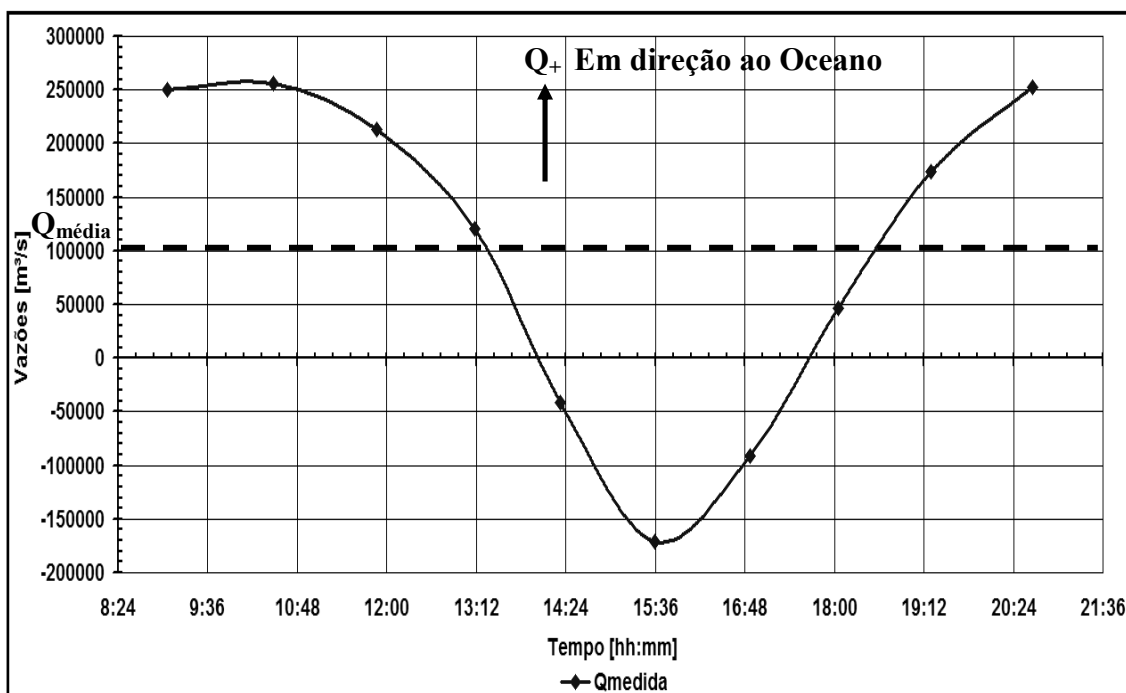


Figura 22: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal em frente à cidade de Macapá-AP (canal do Norte), na época de cheia do rio Amazonas em 2008.

3.4.3. Curva de vazões da campanha de 2008, na época de seca do rio Amazonas

❖ Estreito de Breves – Canal do rio Jacaré

A primeira travessia começou na margem esquerda do canal às 7h27m e a última foi finalizada na direita às 21h07m59s, com um tempo total de 13h40m59s, um total de 21 travessias e um tempo médio entre elas 38m07s. À hora média correspondente ao início da onda de vazão foi às 07h40m24s e a correspondente ao final foi às 20h54m39s, o que resultou em uma duração de 13h14m14s. As medições resultaram na curva das vazões apresentada na Figura 23, e constatou-se uma vazão máxima de $38 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ rumo ao rio Pará e uma vazão residual de $1517 \text{ m}^3/\text{s}$ no sentido do rio Amazonas ao rio Pará.

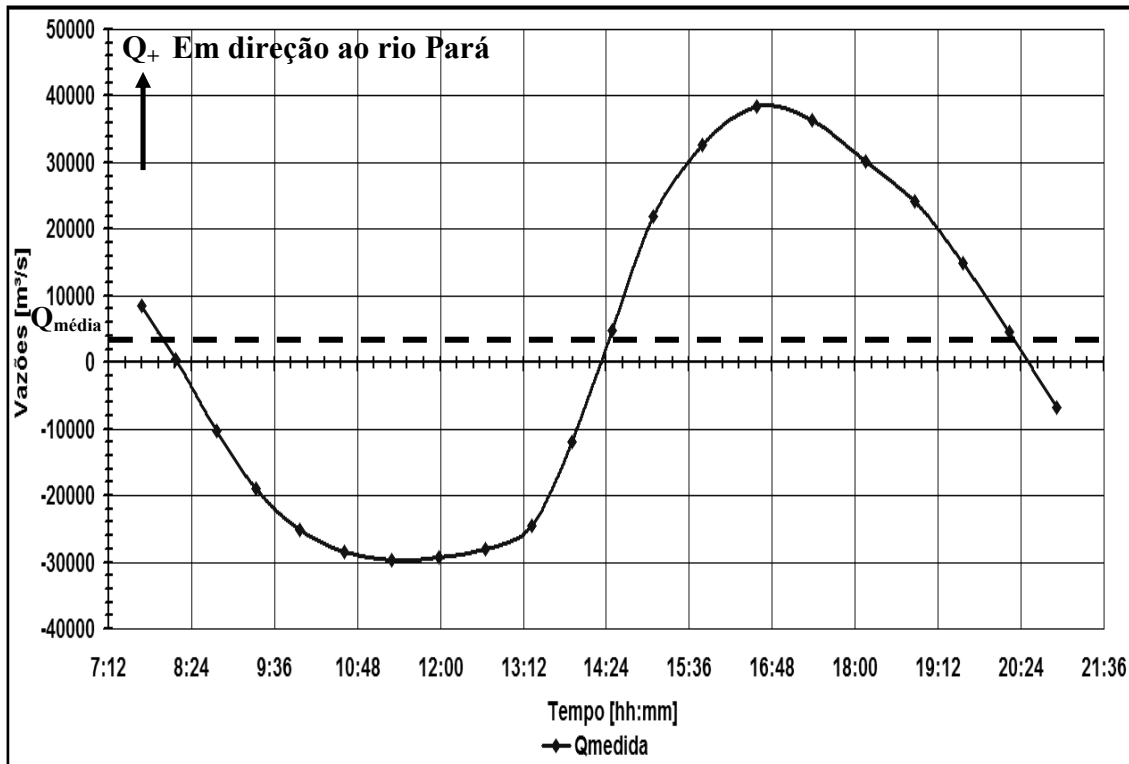


Figura 23: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do rio Jacaré (Estreito de Breves), na época de seca do rio Amazonas em 2008.

❖ Canal Sul – Canal do Vieira Grande

As medições realizadas no Canal Sul durante o período de seca do rio Amazonas foram feitas em duas etapas, em consequência de as medições terem iniciado às 10h01m15s e encerrarem às 20h40m04s do dia 01/10/2008, pelo fato de a distância entre as margens ser de aproximadamente 12,2 km, fazendo um total de apenas 10h38m49s, não sendo fechado um ciclo de maré no mesmo dia (~13 horas). As medições foram retomadas no dia 02/10/2008 às 5h09m27s e encerradas às 10h47m30s de modo a completar o ciclo de maré.

Porém, para obter a vazão residual é preciso fazer a integração da curva gerada a partir dos valores de vazões medidos pelo ADCP, foi preciso fazer um ajuste nos dados coletados no dia 02 de outubro. Para isso foram realizadas as seguintes considerações: a) a amplitude da maré não se modificou; b) foi considerada a diferença de fase apenas para a componente principal M_2 , de 51 minutos. A Figura 24 mostra a curva de vazões obtida a partir dos ajustes, sendo que a curva pontilhada é o resultado da extrapolação feita para os dados do dia 02 de outubro, de modo que eles fossem equivalentes a terem sido medidos no dia 01 de outubro.

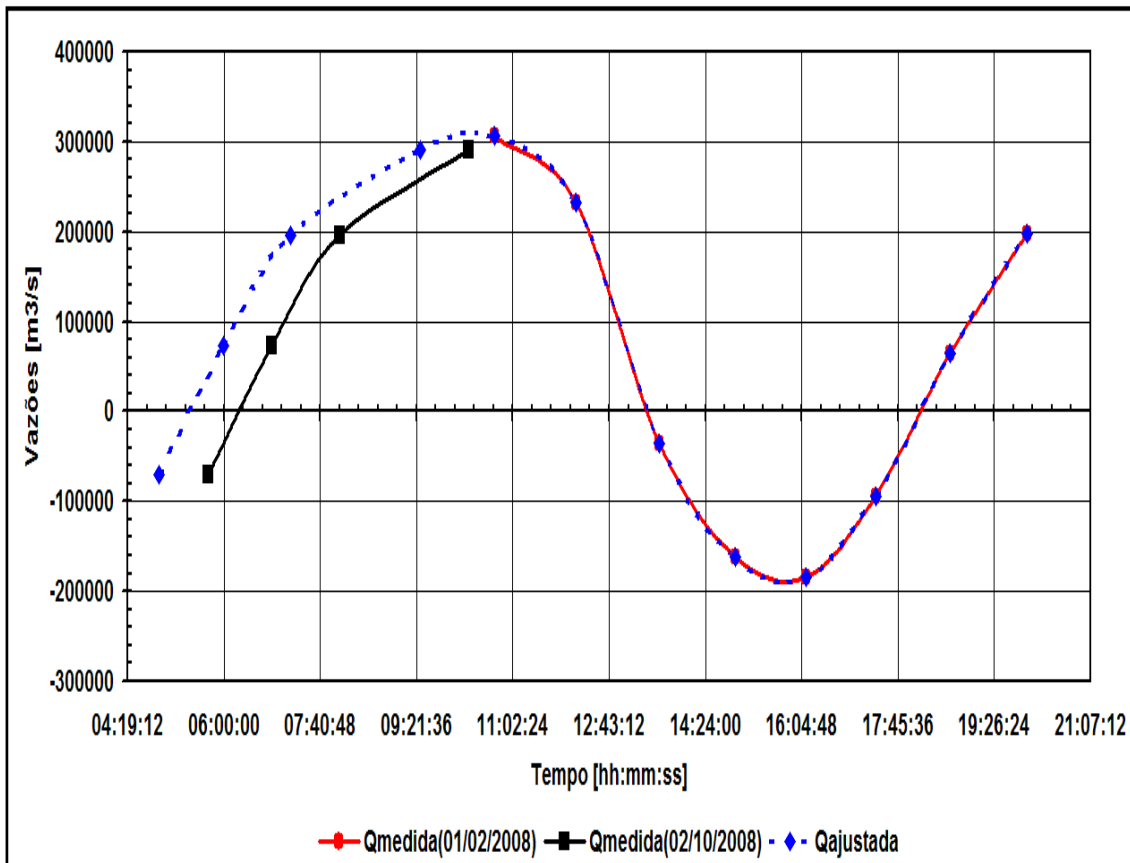


Figura 24: Resultado (linha pontilhada em azul) do ajuste feito para a curva de vazões medidas para o Canal do Sul, a curva resultante das medições no dia 01/10/2008 (em vermelho) e a curva resultante das medições no dia 02/10/2008 (em preto).

As medições iniciaram-se na margem direita do Canal Sul (Canal do Vieira Grande), às 5h09m27s e encerraram-se na esquerda às 20h40m04s, com um tempo total de medições de 15h30m37s atingido em 12 travessias com um tempo médio de 1h15m30s entre elas. Então, a hora correspondente ao início da onda de vazão foi às 05h43m07s e a final foi às 20h00m58s, o que resultou em uma duração de 14h17m51s. As medições resultaram na curva da onda de vazão apresentada na Figura 25 e, a partir dos dados, constatou-se uma vazão máxima de $307 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ em direção ao oceano e uma vazão média de $68 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ no sentido do oceano.

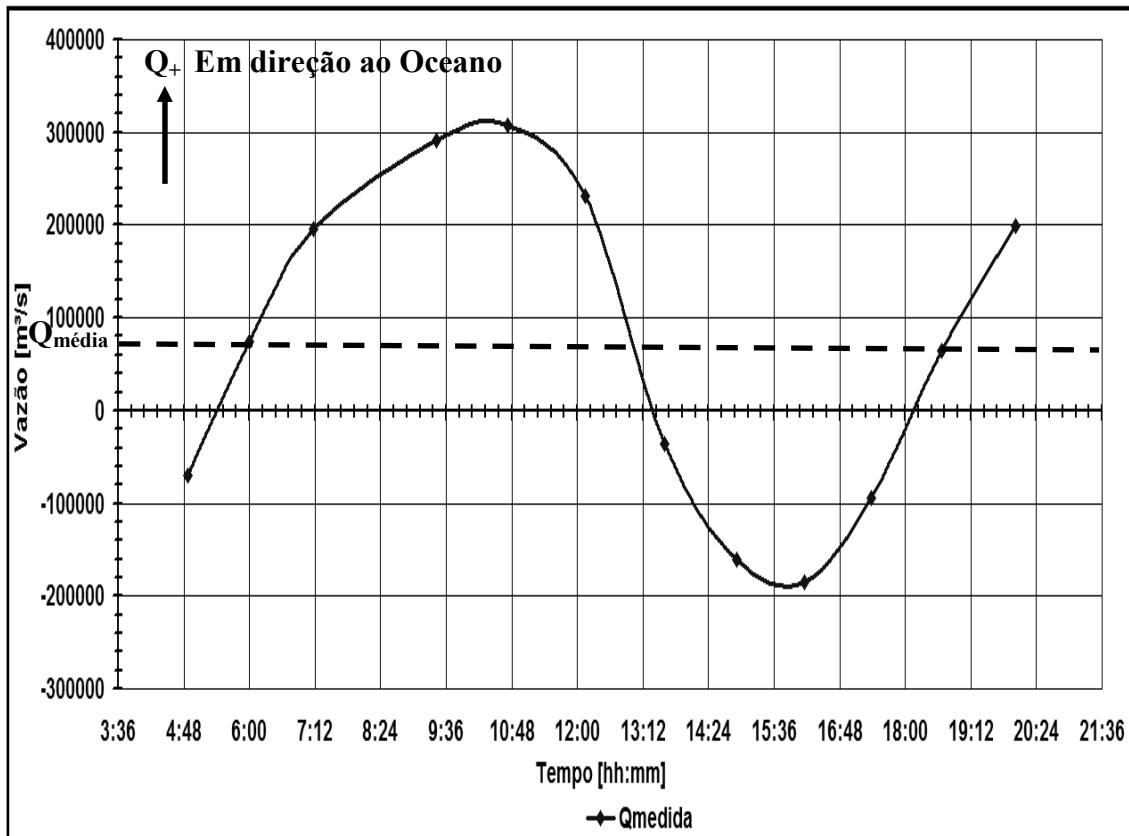


Figura 25: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal do Vieira Grande – Canal Sul do rio Amazonas, na época de seca do rio Amazonas em 2008.

❖ Canal Norte em frente à cidade de Macapá (AP)

As medições foram iniciadas na margem esquerda do canal às 6h15m13s e encerradas na direita às 19h29m15s, com um tempo total de 13h14m02s e 12 travessias, sendo duas a mais que no período de cheia de 2008, e um tempo médio de aproximadamente 1h04m04s entre elas. A hora correspondente ao início da medição foi às 07h00m34s e a correspondente ao final foi às 19h15m53s, o que resultou em uma duração de 12h15m19s, resultando em um tempo menor do que o previsto para um ciclo de maré (~13 horas). As medições resultaram na curva de vazões apresentada na Figura 26, sendo que, através dos dados de vazões, observou-se uma vazão máxima de 177×10^3 m³/s em direção ao oceano e uma vazão média residual de 51×10^3 m³/s, também em direção ao oceano.

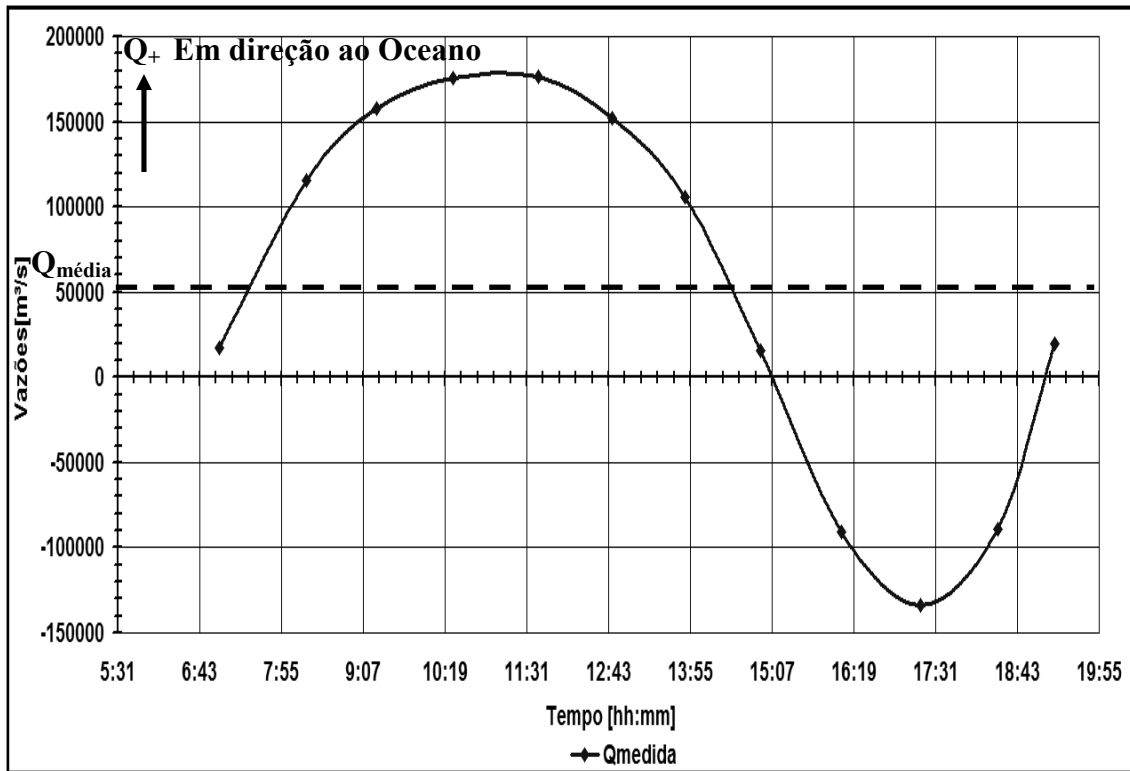


Figura 26: Curva gerada a partir das vazões medidas durante um ciclo de maré no Canal em frente à cidade de Macapá-AP (Canal Norte), na época de seca do rio Amazonas em 2008.

4. METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA VAZÃO RESIDUAL

4.1. Conceitos utilizados nas análises

De acordo com a metodologia utilizada pelos pesquisadores da ANA (Agência Nacional das Águas) nos cálculos de vazões, conforme Nota Técnica Conjunta nº 1/2008/NHI/SAR, Documento nº 15.847/2008: Resultados das Medições de Vazão Realizadas com ADCP na Foz do Amazonas em junho de 2008, são definidos:

- a) **Vazão** é o volume de água que passa por uma determinada seção de um rio dividido por um intervalo de tempo.
- b) **Duração total da medição:** A duração total da medição é determinada pela diferença entre a hora inicial e final da medição. Essa duração é utilizada nos cálculos de vazões provenientes dos dados do ADCP.
- c) **Identificação dos tempos inicial e final da onda de vazão:** Considerando que a onda decorrente do ciclo de maré pode ser representada por uma onda periódica, os tempos iniciais e finais são obtidos pelas abscissas correspondentes aos pontos de interseção da curva vazão x tempo com uma reta paralela ao eixo “x” que intercepta a curva $Q \times t$ em dois pontos cuja derivada primeira apresenta o mesmo sinal, ou seja, em pontos em que a curva seja crescente (derivada positiva) ou decrescente (derivada negativa) (Figura 27).

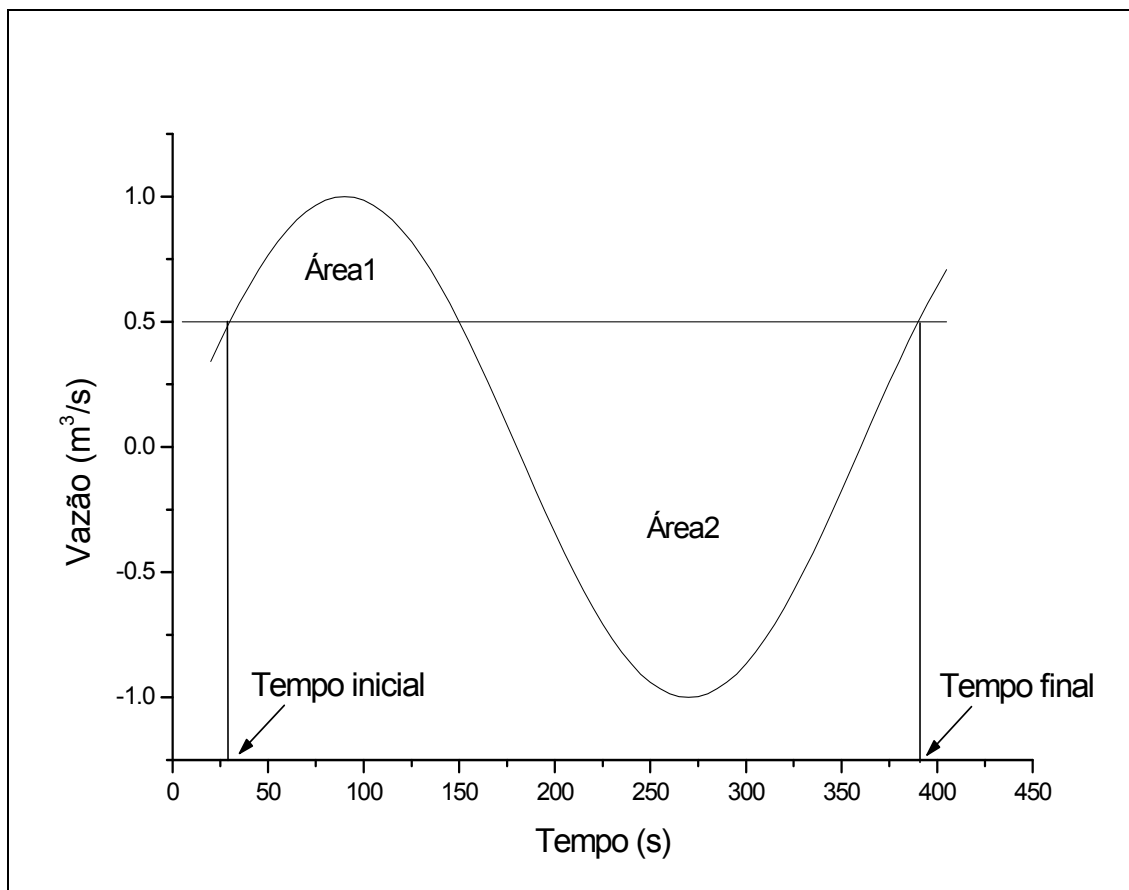


Figura 27: Determinação do tempo de inicial e final da onda de vazão. (modificada de: Nota Técnica Conjunta nº 1/2008/NHI/SAR. Da Agência Nacional das Águas – ANA).

No caso em que o ciclo de maré não foi completado durante as medições uma solução foi considerada, representando a curva de vazões a partir da soma de funções seno e cosseno de forma a completar o ciclo de maré. Esta parametrização também permitiu a translação temporal de modo a representar a curva de vazões simultaneamente (simular medições ao mesmo tempo) em todas as seções de medição.

4.2. Metodologias aplicadas nos cálculos das vazões

4.2.1. Vazões residuais a partir dos dados do ADCP

Ao final de cada travessia na seção de medição com o ADCP, o programa que gerencia as informações fornece o valor da vazão média da travessia, e encerrando-se as medições ao completar o ciclo de maré, ele fornece um relatório com valores médios de todas as variáveis medidas de todas as travessias e o valor da vazão residual na seção.

4.2.2. Cálculo da vazão residual a partir dos dados medidos

O cálculo da vazão em cada seção é feito determinando-se a área sob a curva $Q \times t$, que corresponde ao volume total de água passando pela seção de medição durante o período da onda de vazão. Para o cálculo das áreas foi feita a integração numérica das duas partes da curva, sendo que a parte inferior representa vazão negativa, ou seja, em sentido contrário àquele definido como o sentido de escoamento de vazante (de acordo com as definições de margem direita e esquerda).

4.2.3. Cálculo das vazões utilizando a interpolação dos dados medidos

Para diminuir os erros, que podem decorrer de se utilizar os valores médios de vazões fornecidos pelo ADCP, consequências da duração das medições no caso de travessias longas, devido à grande distância entre as margens, ajustou-se uma curva através de uma planilha desenvolvida no Excel. Interpolando pontos com intervalos de tempo de 15 em 15 minutos entre os valores medidos, de modo a determinar novos pares $Q \times t$ para o cálculo do volume. Este procedimento propicia que os tempos iniciais e finais da integração possam ser determinados mais precisamente. O método utilizado para o cálculo das vazões interpoladas (SILVA, *et al.*, 2003) a partir dos dados obtidos pelo ADCP, consistiu em:

- i) Interpolar a evolução temporal da vazão na base dessas medições, em períodos constantes de 15 em 15 minutos;
- ii) Integrar os valores da curva interpolada no ciclo da maré, determinando-se a área sob a curva $Q \times t$, que corresponde ao volume total que passou na seção, para obter, a partir destes resultados, a vazão residual.

A Figura 28, a Figura 29 e a Figura 30 mostram as curvas resultantes da interpolação geradas a partir das curvas dos dados oriundos da campanha realizada durante a época de cheia em junho de 2007.

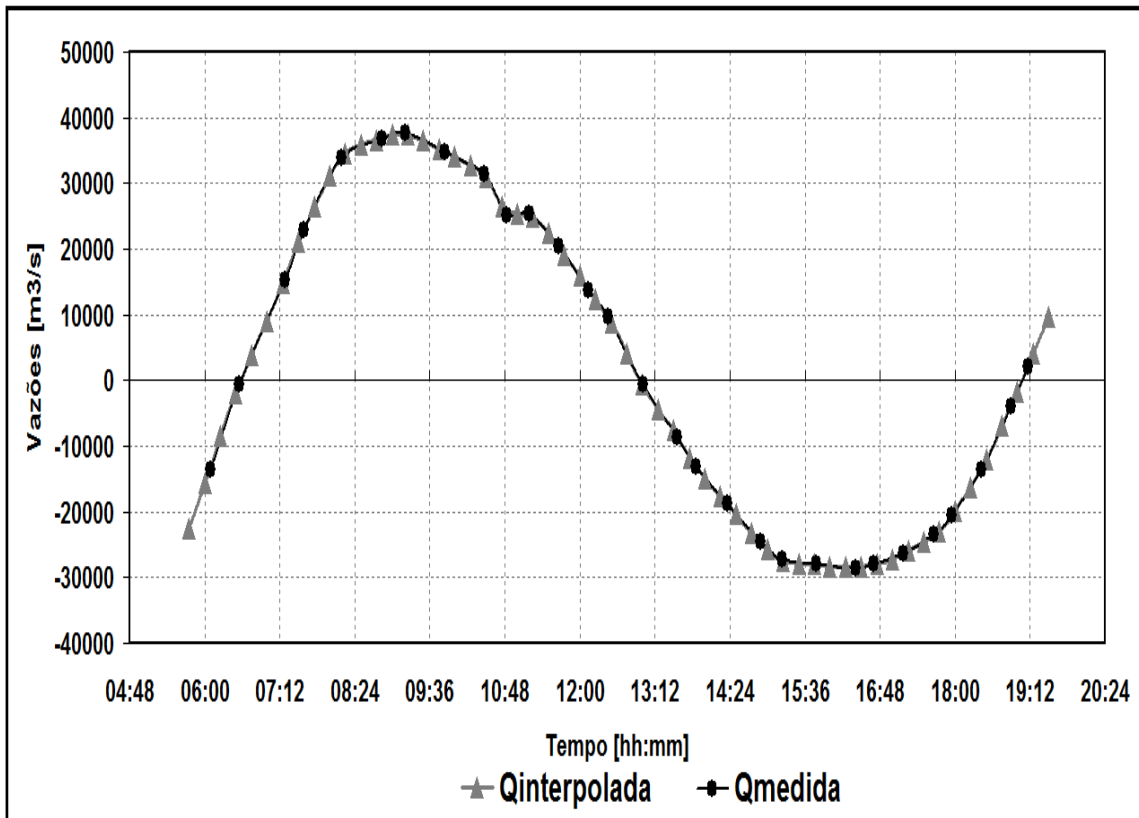


Figura 28: Comparação entre a curva das vazões medidas com a das vazões interpoladas durante um ciclo de maré para a seção no Estreito de Breves, resultante das medições feitas em 2007.

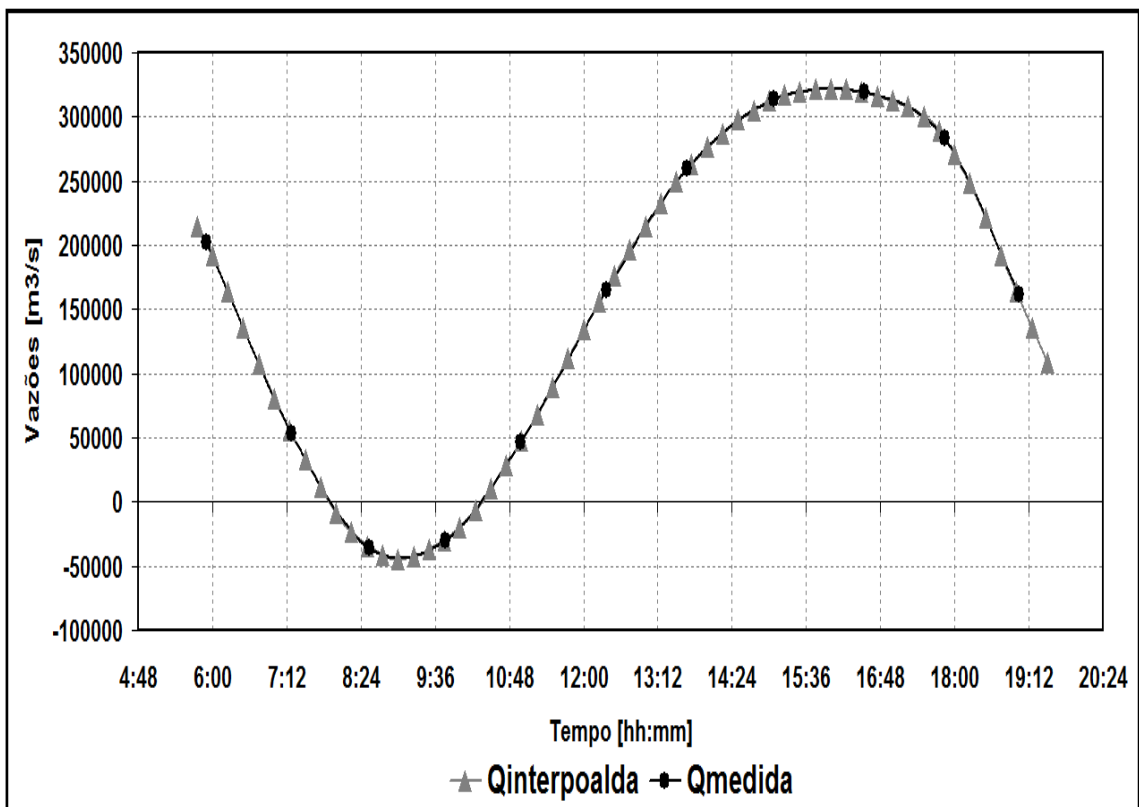


Figura 29: Comparação entre a curva das vazões medidas com a das vazões interpoladas durante um ciclo de maré para a seção no Canal do Sul, resultante das medições feitas em 2007.

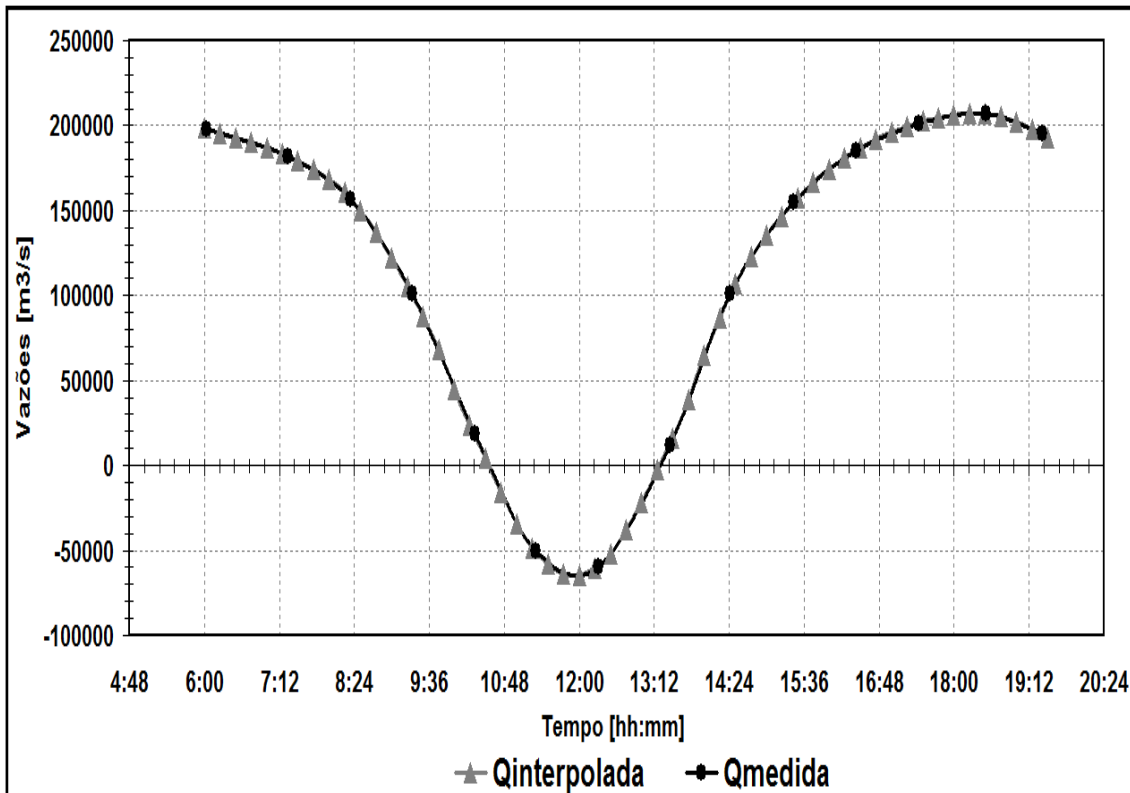


Figura 30: Comparação entre a curva das vazões medidas com a das vazões interpoladas durante um ciclo de maré para a seção no Canal Norte, resultante das medições feitas em 2007.

4.2.4. Interpolação de funções para representar a variação de vazões no ciclo de maré

Com o objetivo de obter a simultaneidade das vazões adotou-se a parametrização da curva resultante dos dados medidos pelo ADCP, através da qual será feita a extrapolação do registro para cada uma das seções medidas durante as campanhas realizadas nos períodos de cheia em 2007 e 2008 e na época de seca em 2008. Para isso foi utilizada uma combinação de funções seno e cosseno.

O método consistiu primeiramente na confecção dos hidrograma de vazões para cada uma das seções e, em seguida, com base no valor médio das vazões e nas amplitudes das curvas, definiu-se a combinação das variáveis a ser utilizada na parametrização e a função matemática mais adequada para ajustar os parâmetros. Então, podemos expressar a equação do movimento periódico utilizada para fazer a parametrização das curvas de vazões resultantes das medições como sendo a seguinte:

$$Q(t) = Q_m + A_1 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{T_1} t + \theta_1 \right) + A_2 \operatorname{cos} \left(\frac{2\pi}{T_2} t + \theta_2 \right)$$

- Q_m , corresponde à vazão média;
- A_1 e A_2 correspondem às amplitudes das componentes harmônicas M_2 e M_4 ;
- T_1 e T_2 correspondem aos períodos das componentes harmônicas utilizadas M_2 e M_4 , com períodos de:
 - ✓ $T_1=44714$ s ou aproximadamente 12h42m;
 - ✓ $T_2=22357$ s ou aproximadamente 6h21m;
- t corresponde ao tempo total de travessia para cada uma das seções, variando de inicial ao final no intervalo de integração;
- θ_1 e θ_2 correspondem à diferença de fases utilizadas, variando de 0 (zero) a 2π .

Foi desenvolvida uma planilha para ajustar a curva parametrizada a partir da curva resultante dos dados medidos. O tempo total das medições foi dividido em intervalos variando de 15 em 15 minutos, adotou-se como valor fixo as constantes harmônicas M_2 e M_4 e as demais variáveis (Q_m , A_1 e A_2) foram manipuladas, como pode ser visto na Figura 31. As diferenças de fase (θ_1 e θ_2) foram variadas dentro de um intervalo de zero a 2π , até atingir o melhor ajuste possível com a curva dos dados medidos.

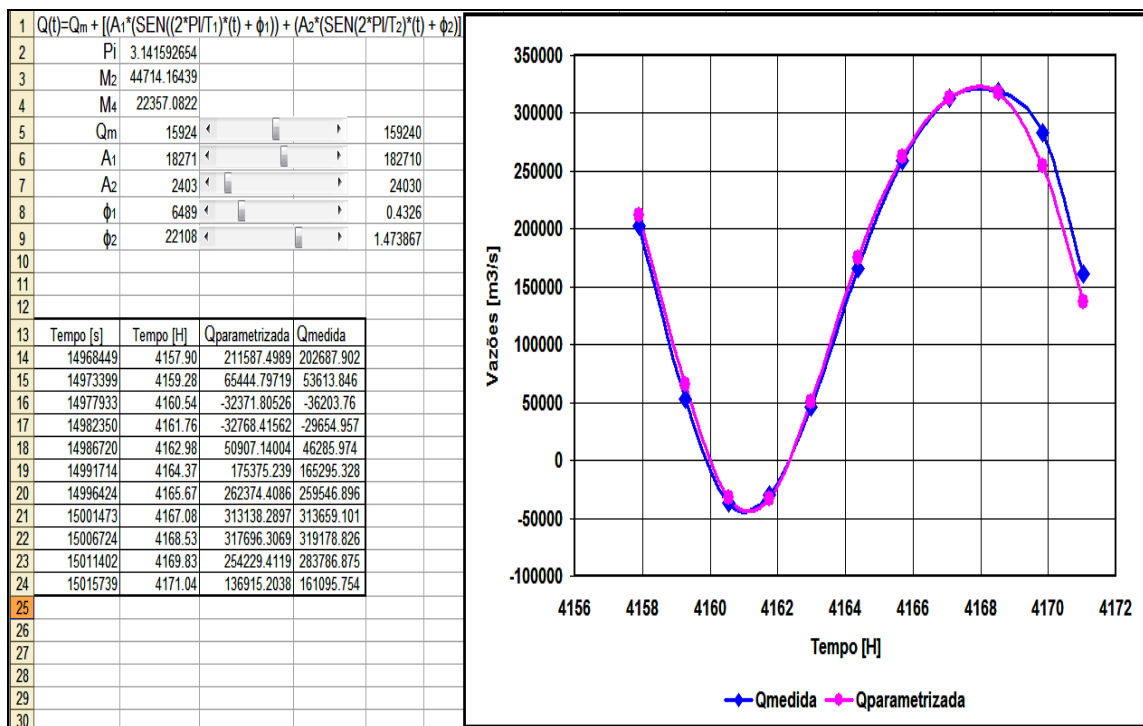


Figura 31: Exemplo da planilha desenvolvida no Excel para a parametrização das curvas de vazões empregando a função $Q(t)$.

A integração da função foi feita com o uso do *software Origin®*, versão 5.0, da *Microcal™ software, In.* O resultado corresponde à medida da área limitada pela curva da vazão e pelo eixo do tempo, o que fornece o volume total escoado, de uma margem para a outra, conforme a expressão a seguir:

$$V = \int_{t_f}^{t_i} Q(t) dt,$$

Onde:

- V é o volume de água escoado no período compreendido entre um tempo inicial e final.

Sendo a vazão residual:

$$\langle Q \rangle = \frac{V}{t_f - t_i}$$

- $\langle Q \rangle$ é a vazão média naquela seção;
- t_f e t_i são os tempos final e inicial do ciclo de maré.

Em algumas das observações, especialmente no Estreito de Breves, não foi obtido um ajuste tão acurado, possivelmente como consequência de se ter utilizado na parametrização somente as componentes harmônicas M_2 e M_4 , na função $Q(t)$. Nesta região a onda de maré sofre influência de outras componentes, como mostrado em GALLO, 2004.

Na Figura 32 são mostrados os resultados das medições feitas na seção do Estreito de Breves (Canal do rio Jacaré), na época de cheia em 2007, na Figura 35 para o período de cheia de 2008 e na Figura 38 para o período de seca de 2008. As curvas correspondentes às seções medidas no Canal do Vieira Grande durante a época de cheia (2007 e 2008) e seca (2008), são mostradas na Figura 33, na Figura 36 e na Figura 39. As curvas resultantes para a seção do Canal Norte podem ser vistas na Figura 34, na Figura 37 e na Figura 40, respectivamente, para os períodos de cheia em 2007/2008 e seca em 2008.

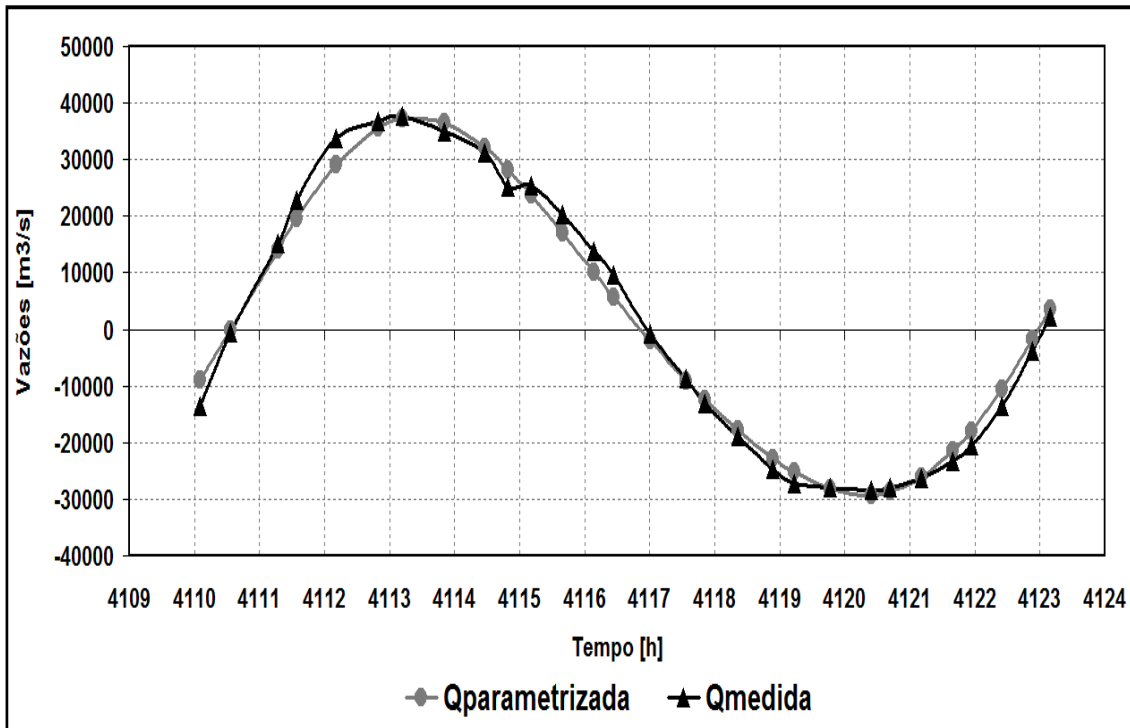


Figura 32: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 19/06/2007, no Estreito de Breves, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia – 2007.

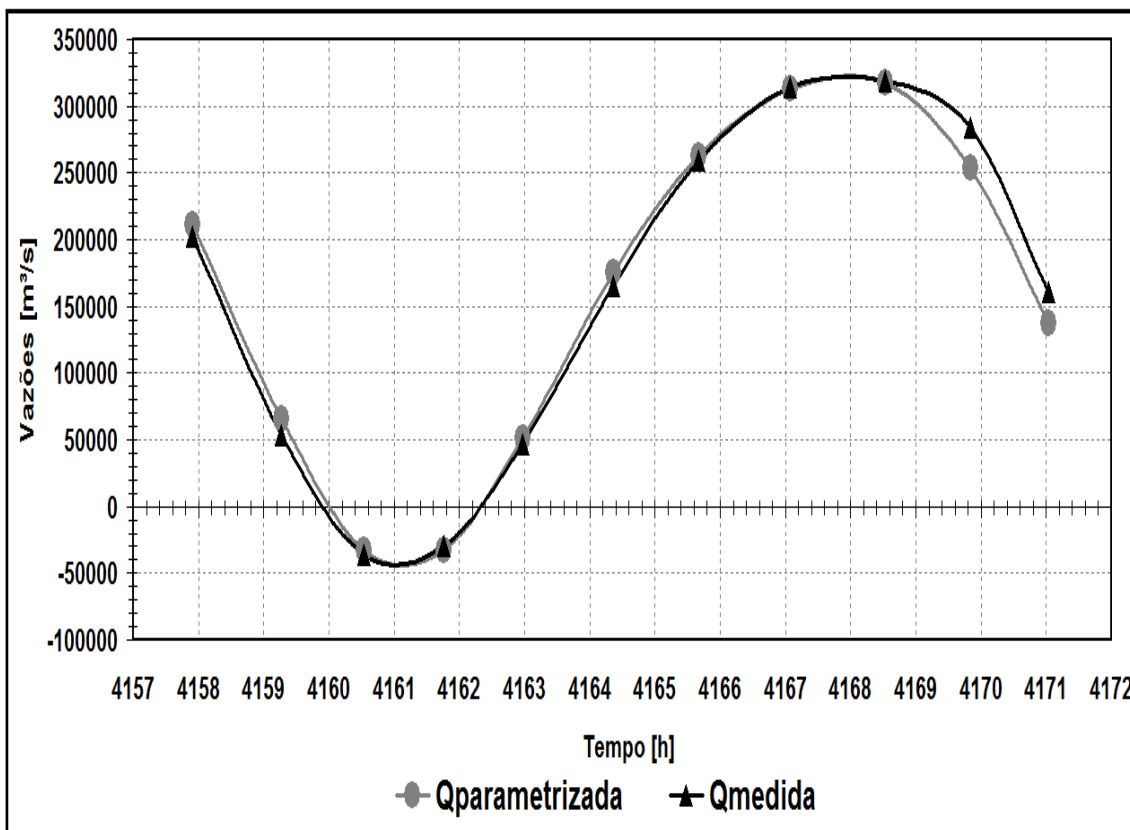


Figura 33: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 23/06/2007, no Canal Sul, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia - 2007.

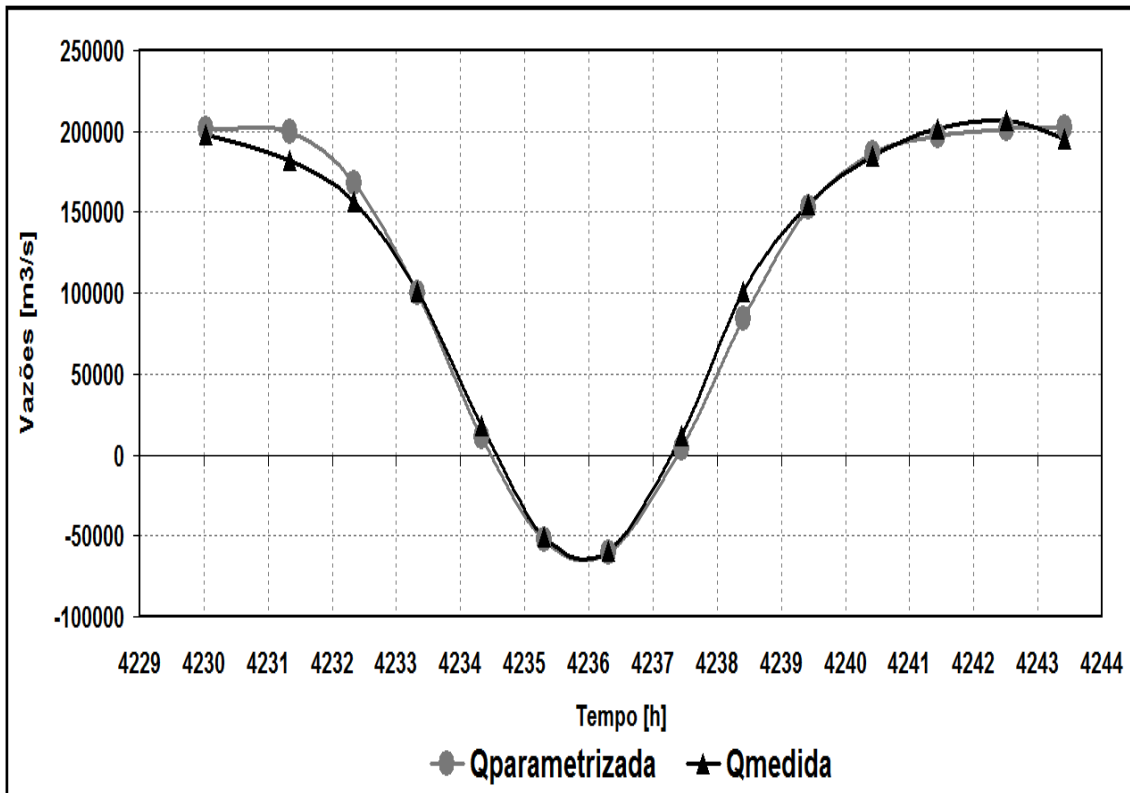


Figura 34: Comparação entre as curvas das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 26/06/2007, no Canal Norte, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia – 2007.

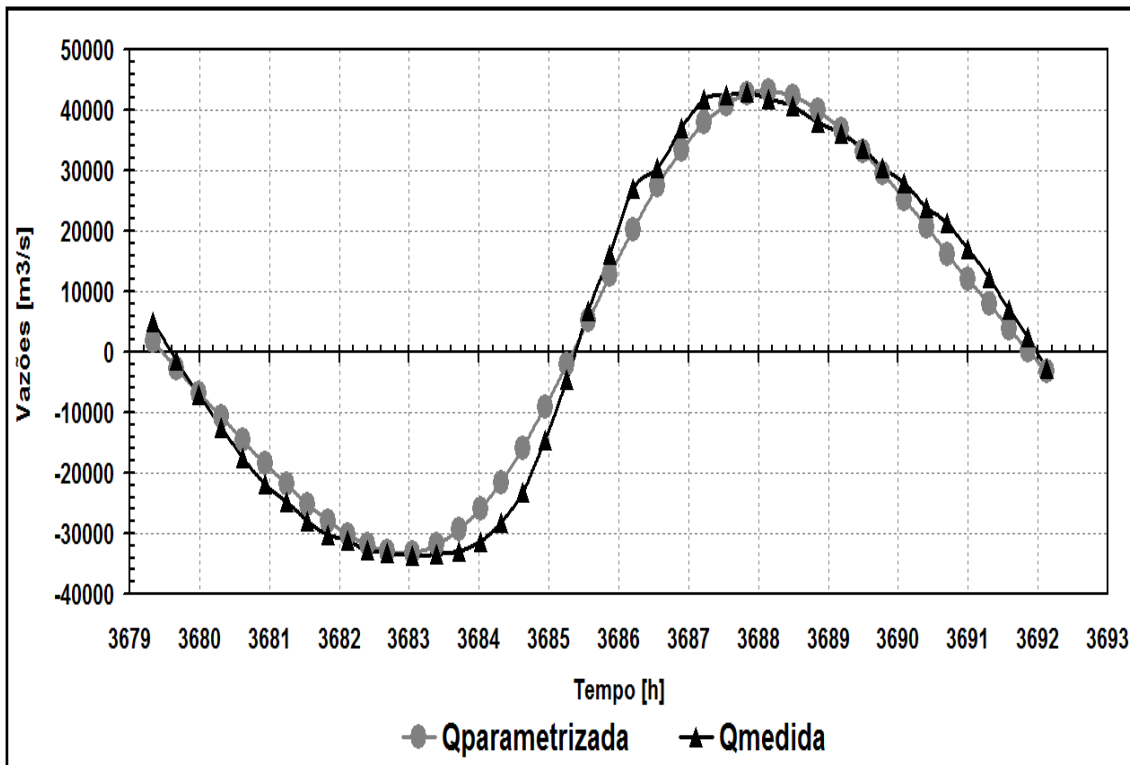


Figura 35: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 03/06/2008, no Estreito de Breves, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia de 2008.

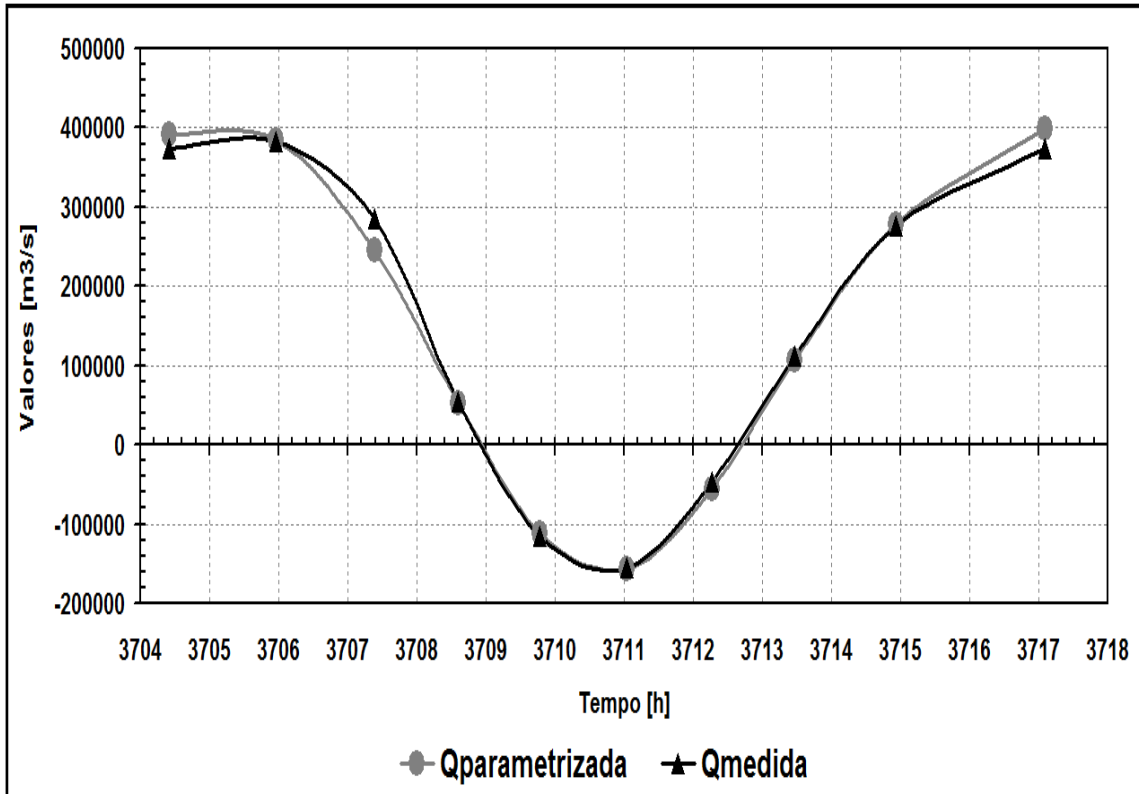


Figura 36: Comparação entre as curvas das vazões medidas com resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 04/06/2008, no Canal Sul, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia de 2008.

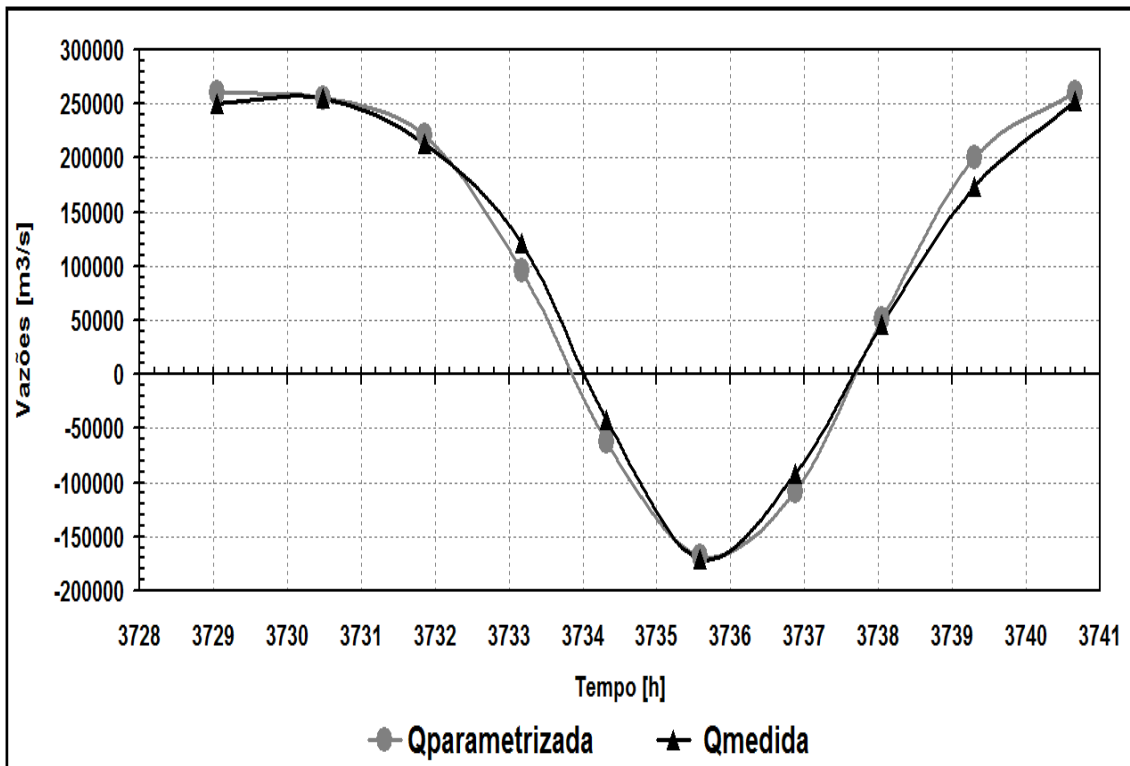


Figura 37: Comparação entre as curvas das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 05/06/2008, no Canal Norte, durante o período de cheia do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de cheia de 2008.

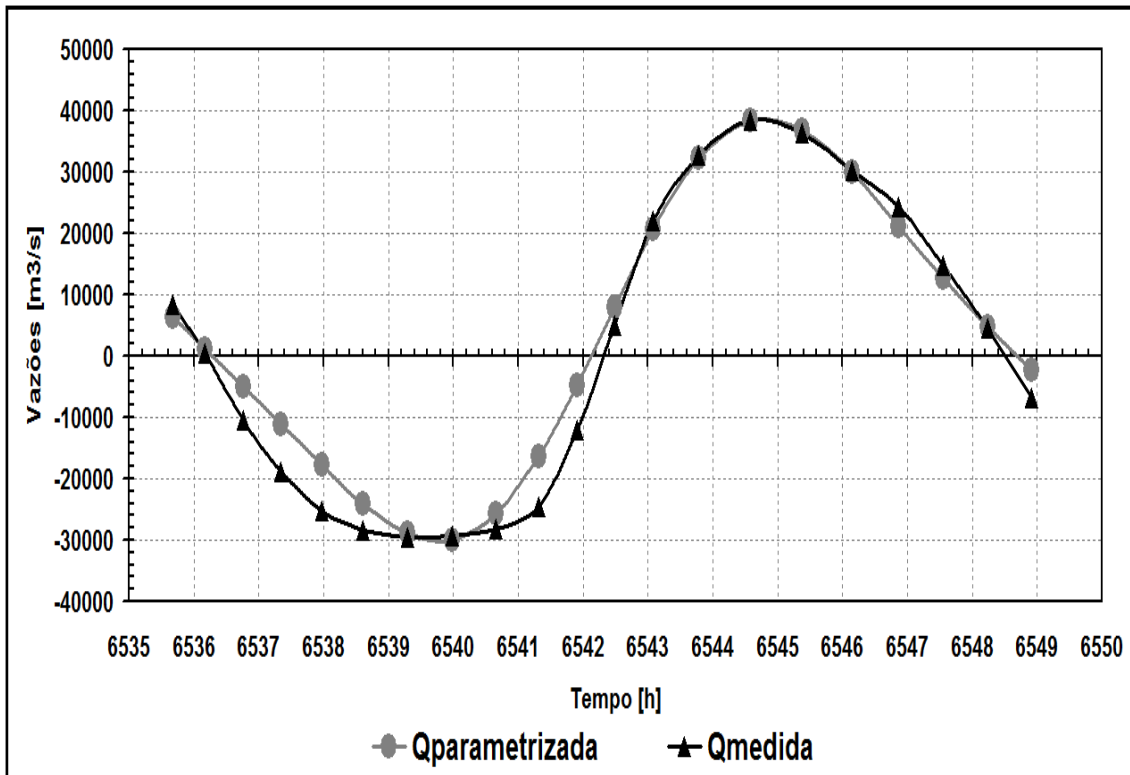


Figura 38: Comparação entre as curvas das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 30/09/2008, no Estreito de Breves, durante o período de seca do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de seca de 2008.

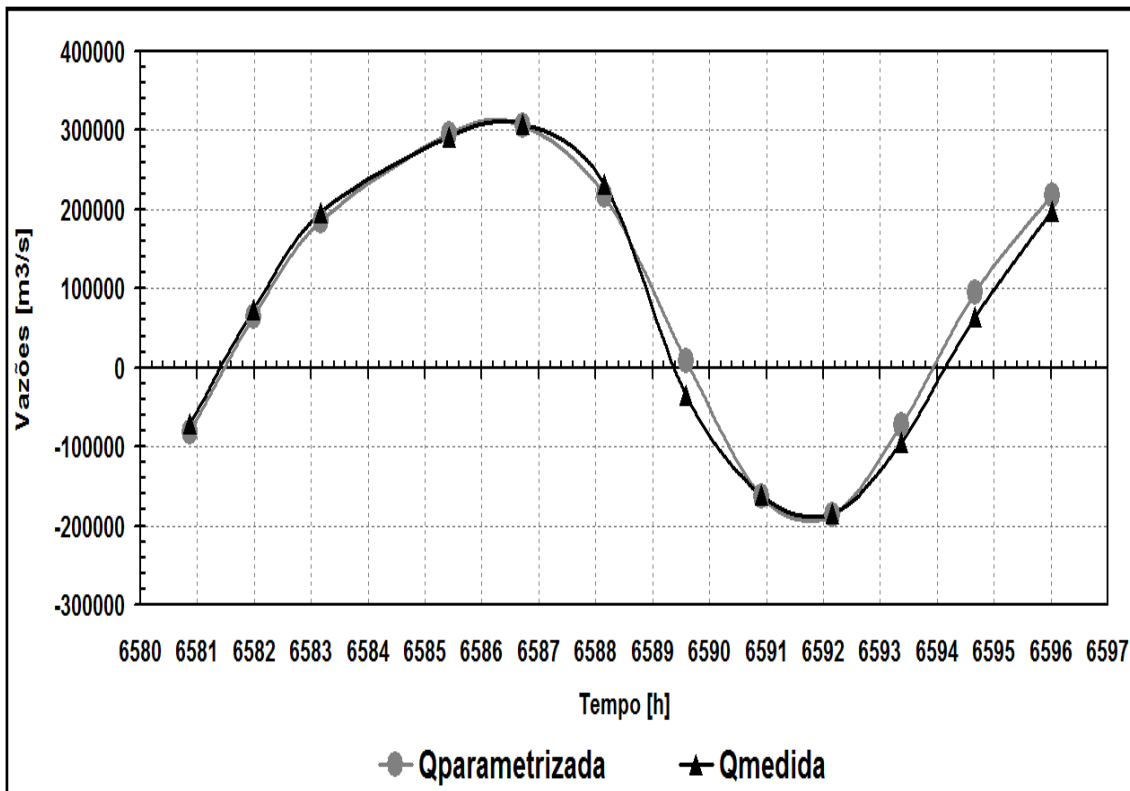


Figura 39: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 02/10/2008, no Canal Sul, durante o período de seca do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de seca de 2008.

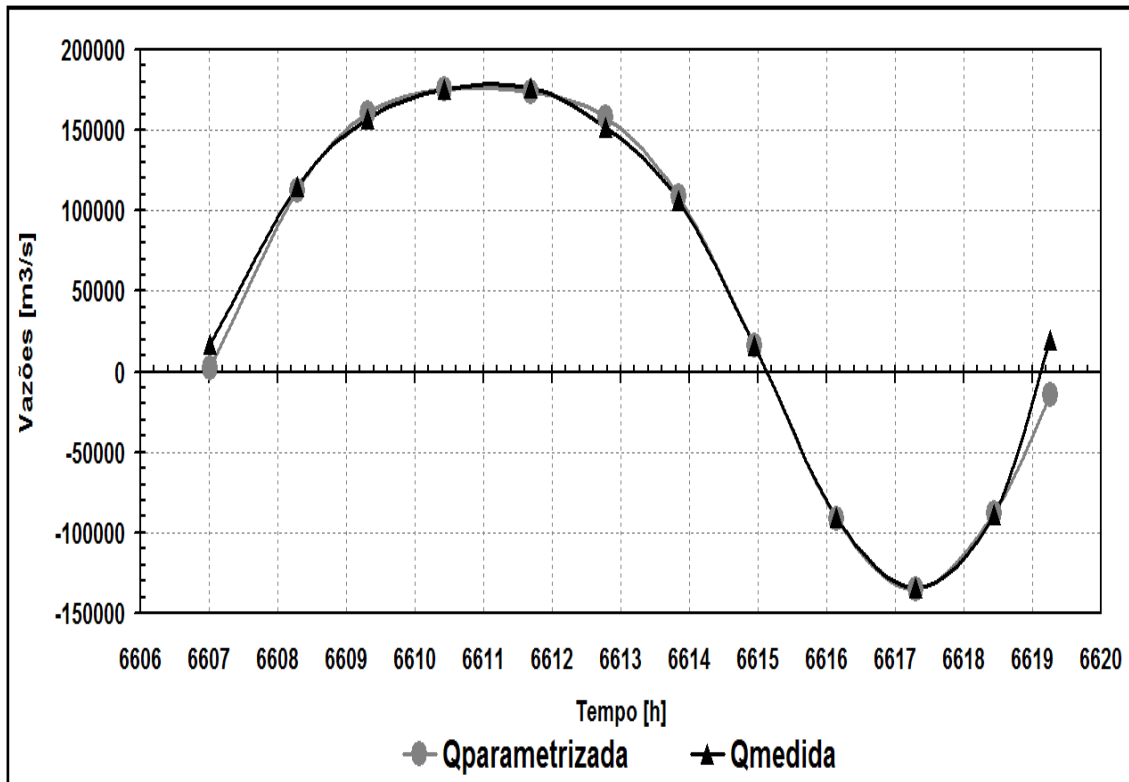


Figura 40: Comparação entre a curva das vazões medidas com a resultante da parametrização, correspondendo às medições feitas no dia 03/10/2008, no Canal Norte, durante o período de seca do rio Amazonas em um ciclo de maré. Período de seca de 2008.

4.3. Extrapolação das curvas parametrizadas

A partir das curvas parametrizadas, feitas para cada uma das seções onde foram realizadas medições nos períodos de cheias e de seca do rio Amazonas, buscou-se fazer a extrapolação temporal dos dados simulando um período maior de medições. A extrapolação foi utilizada com o objetivo de obter dados simultâneos nas seções medidas, a partir das curvas resultantes das medições, os quais foram obtidos em forma sequencial, em até no máximo 6 dias, equivalente ao período de duração da campanha de vazões de 2007.

A Figura 41, a Figura 42 e a Figura 43 mostram as comparações entre as curvas medidas e as extrapoladas. Em destaque, dentro das elipses, as curvas dos dados medidos nas três campanhas. Nas figuras o eixo do tempo está variando de 12 em 12 horas. Na Figura 41, correspondente a campanha na época de cheia de 2007, este se inicia na zero hora do dia 20 e termina na zero hora do dia 26 de junho de 2007, com um total de 6 dias. Já na Figura 42, para a campanha de 2008 na época de cheia, inicia-se às 12 horas do dia 02 e termina às 12 horas do dia 6 de junho e, para a campanha no

período de seca em 2008 (Figura 43), o eixo do tempo se inicia às 12 horas do dia 29 de setembro e termina no dia 04 de outubro às 12 horas.

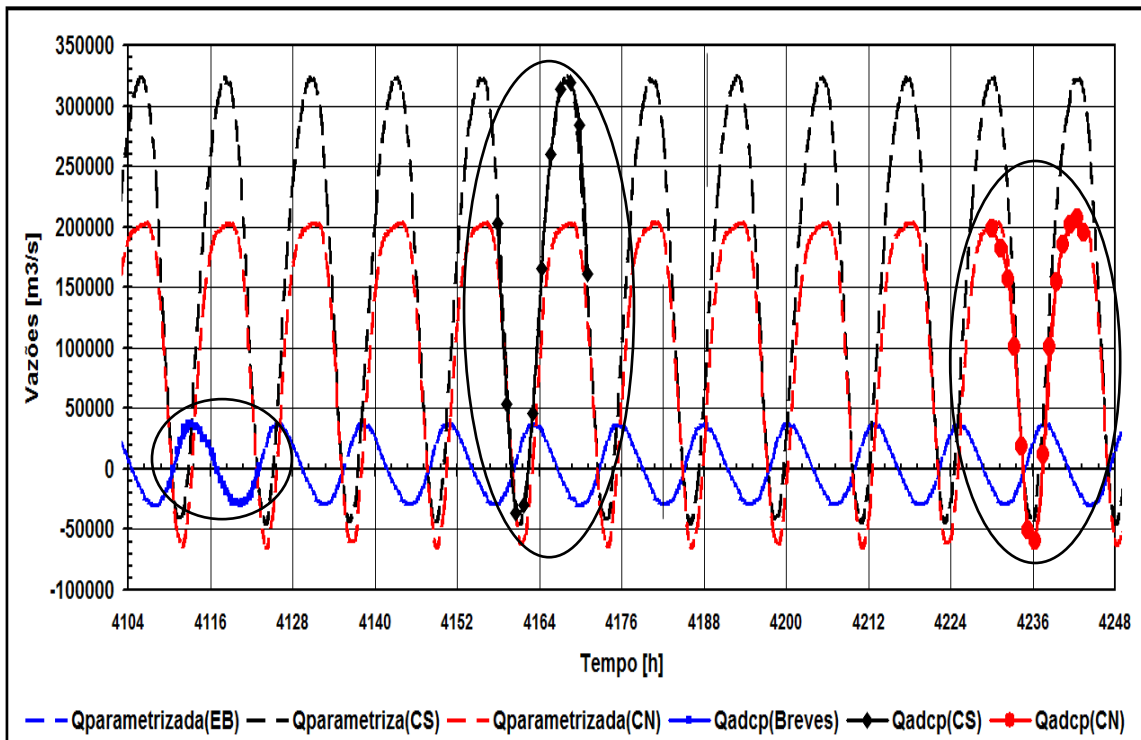


Figura 41: Vazões obtidas a partir das extrapolações das curvas parametrizadas, compreendendo o período de duração da medição durante o período de cheia em 2007.

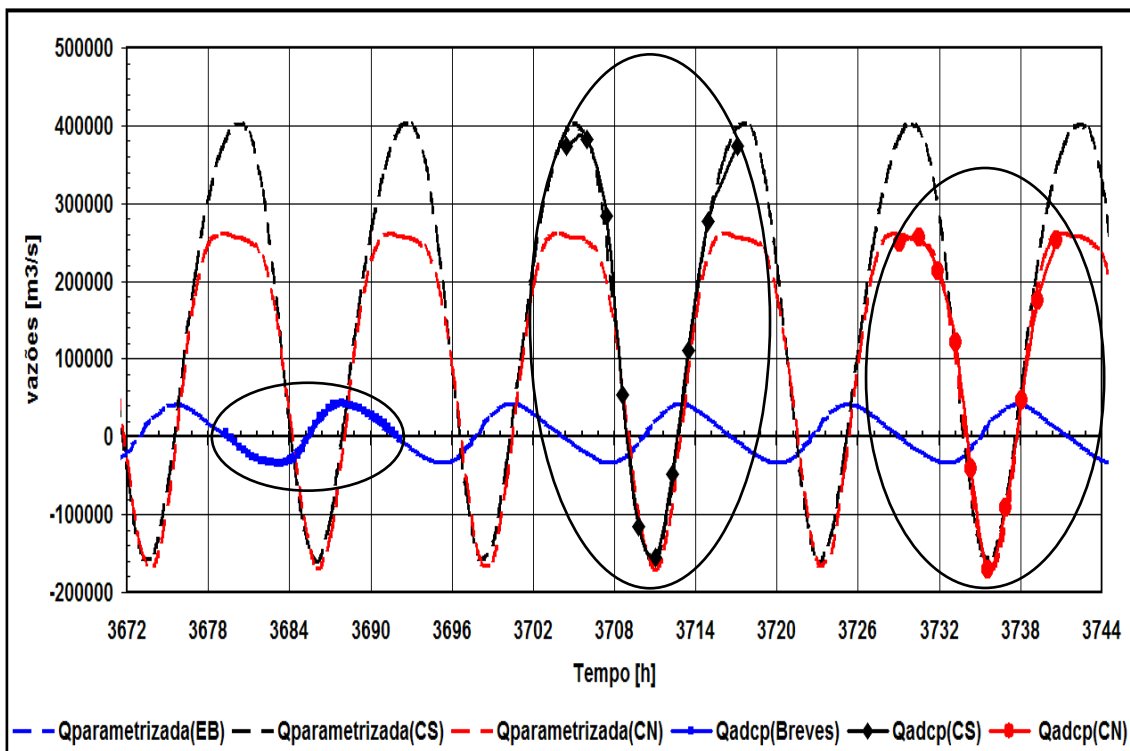


Figura 42: Vazões obtidas a partir das extrapolações das curvas parametrizadas, compreendendo o período de duração das medições durante o período de cheia em 2008.

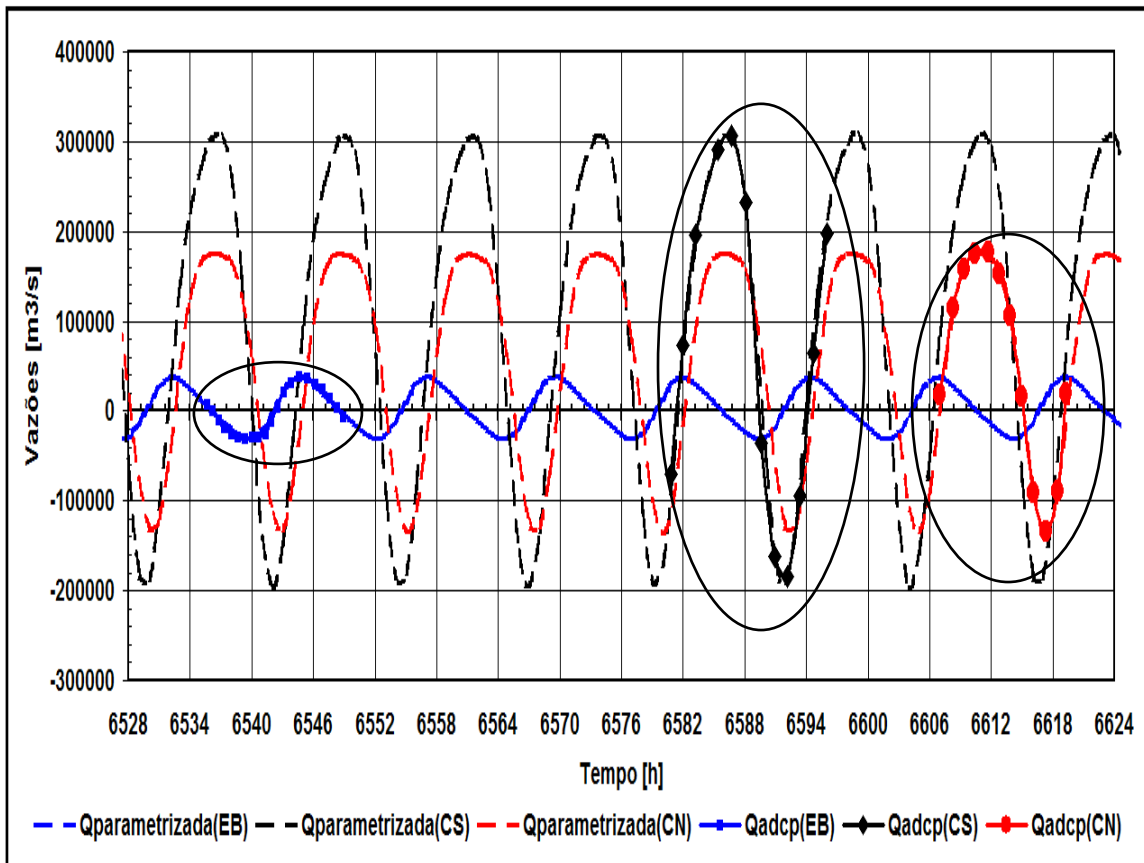


Figura 43: Vazões obtidas a partir das extrapolações das curvas parametrizadas, compreendendo o período de duração das medições durante o período de seca em 2008.

A Figura 44 está mostrando a previsão de maré na estação Ponta do Céu (AP), situada na ilha do Curuá, para as épocas em que foram feitas as medições. Em destaque os períodos durante os quais foram realizadas as medições nas seções. Nota-se que há pouca variação na maré durante as medições realizadas na maré de quadratura, na cheia de 2007. Para as campanhas realizadas na época de cheia e seca em 2008, verifica-se que as medições foram feitas em ocorrência de maré de sizígia com variações de nível e amplitudes semelhantes. Devido a esta variação da maré ao longo do período de medições, nestes casos (cheia e seca de 2008), a extrapolação realizada pode ser menos representativa.

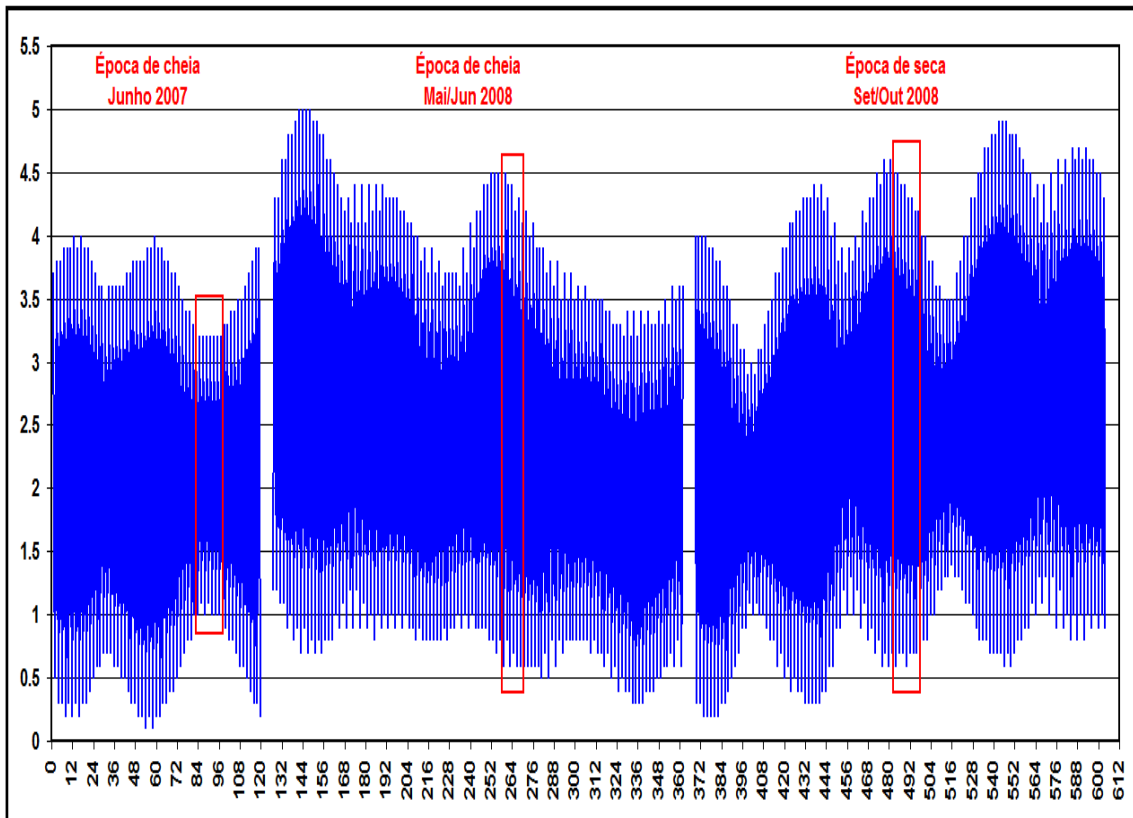


Figura 44: Previsão de maré para a estação Ponta do Céu (na foz do estuário), para a época das campanhas de vazões, no mês de junho de 2007, de maio a junho de 2008 e de setembro a outubro de 2008.

Somando-se as vazões das seções no Canal do Norte (em frente à cidade de Macapá-AP), Canal Sul (Canal do Vieira Grande) e Estreito de Breves (Canal do rio Jacaré) a partir dos calculados para as três campanhas realizadas, obtêm-se os resultados mostrados na Figura 45. Observa-se que, para a cheia de 2007, a máxima vazão na vazante chegou a aproximadamente $550 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e a máxima vazão na enchente a $130 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, com uma vazão residual da ordem de $257 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o período de cheia em 2008 a vazão máxima de vazante alcançada foi de $670 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e a máxima vazão na enchente de $347 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, com uma vazão residual de $245 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o período de seca a máxima vazão na vazante foi de $490 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, a máxima vazão na enchente de $325 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e a média foi próximo de $144 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. É interessante notar a influência da maré nas vazões máximas de enchente e vazante. Com vazões residuais semelhantes nas medições da cheia de 2007 e 2008, mas com marés de quadratura e sizígia, respectivamente, observa-se uma redução da vazão máxima na maré de vazante de $120 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, porém uma redução da vazão máxima na maré enchente de $217 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. A diferença entre as vazões residuais de ambas as campanhas foi de $12 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Por outro lado, nas medições durante a seca, com mais de $100 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ de diferença na

vazão residual, as vazões máximas de enchente permaneceram próximas à máxima de enchente observada durante a cheia numa maré de sizígia semelhante (diferença de $22 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$). Nota-se também uma redução da vazão máxima de vazante da ordem de $180 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, bem maior que a diferença observada na vazão residual, indicando substancial diferença nos tempos de enchente e vazante entre cheia e seca.

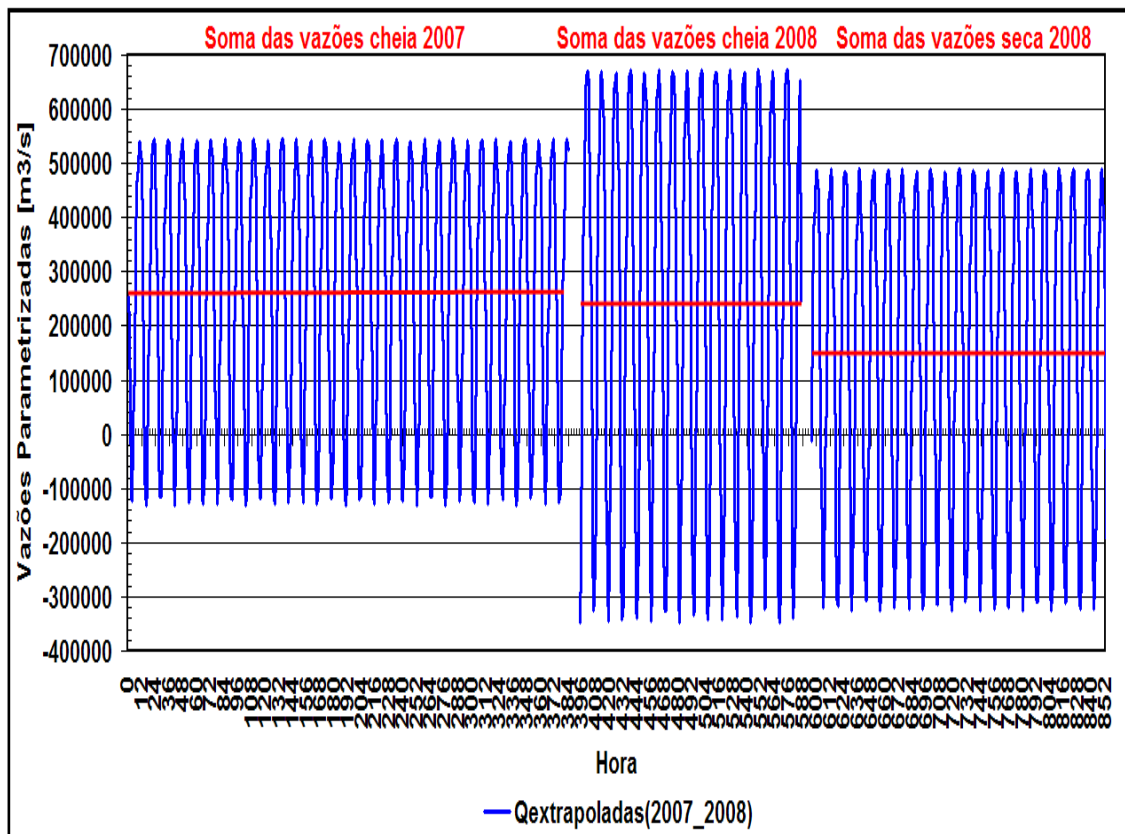


Figura 45: Soma das vazões extrapoladas através das curvas parametrizadas para as seções onde foram realizadas as medições nas campanhas de 2007 e 2008.

4.4. Vazões residuais nas seções medidas

Na Tabela 6 constam os valores médios de vazões obtidas a partir dos dados do ADCP das três campanhas de vazões utilizados neste trabalho. Estes valores são os dados de saída do equipamento, fornecidos pelo Software WinRiver, através de um relatório ao final das medições em que todos os dados medidos durante as travessias são informados, incluindo o valor da vazão residual para a seção ao final da medição.

Tabela 6: Vazões médias fornecidas pelo ADCP para todas as seções feitas durante as campanhas realizadas nos períodos de cheia e seca do rio Amazonas, durante um ciclo de maré.

CAMPANHA: PERÍODO DE CHEIA 2007	Vazões [m ³ /s]
CANAL NORTE	114462
CANAL SUL	158117
ESTREITO DE BREVES	1038
Q _{total}	273617
CAMPANHA: PERÍODO DE CHEIA 2008	Vazões [m ³ /s]
CANAL DO NORTE	100875
CANAL SUL	153905
ESTREITO DE BREVES	3291
Q _{total}	258072
CAMPANHA: PERÍODO DE SECA - 2008	Vazões [m ³ /s]
CANAL DO NORTE	51827
CANAL SUL	68244
ESTREITO DE BREVES	188
Q _{total}	120260

A vazão residual do rio Amazonas, a partir dos dados medidos nas épocas de cheia e seca, foi obtida somando-se os resultados para as três seções onde foram feitas as medições, a primeira foi feita entre os dias 21 e 26 de junho de 2007, na época de cheia, e registrou-se uma vazão da ordem de $273 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Enquanto que, para o período de cheia de 2008, com medições entre os dias 3 e 5 de junho, registrou-se uma vazão residual da ordem de $258 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ e, para o período de seca, de 30 de setembro a 3 de outubro de 2008, com uma vazão residual registrada de $120 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os resultados dos cálculos utilizando a integração das curvas geradas a partir dos métodos descritos (Tabela 7) estão classificados de acordo com os métodos utilizados, o período hidrológico e o ano em que foram feitas as medições durante um ciclo de maré e a vazão total, que representa a vazão residual do rio Amazonas na foz.

Tabela 7: Resultados das vazões residuais nas seções medidas durante as campanhas, segundo as diferentes metodologias e valor da vazão residual.

RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CÁLCULOS DA VAZÃO RESIDUAL			
Período/Ano	Seções	Q _{residual} [m ³ /s]	% da Q _{total}
Integração direta da curva dos dados			
Cheia/2007	Estreito de Breves	2369	0.9%
	Canal Norte	108889	40.1%
	Canal Sul	160243	59.0%
Q _{total}		271502	
Cheia/2008	Estreito de Breves	3766	1.5%
	Canal Norte	90414	36.4%
	Canal Sul	154396	62.1%
Q _{total}		248576	
Seca/2008	Estreito de Breves	1517	1.1%
	Canal Norte	55932	39.5%
	Canal Sul	84149	59.4%
Q _{total}		141600	
Integração da curva Interpolada			
<i>Cheia/2007</i>	<i>Estreito de Breves</i>	<i>2767</i>	<i>1%</i>
	<i>Canal Norte</i>	<i>106136</i>	<i>39.5%</i>
	<i>Canal Sul</i>	<i>159689</i>	<i>59.5%</i>
<i>Q_{total}</i>		<i>268592</i>	
<i>Cheia/2008</i>	<i>Estreito de Breves</i>	<i>3844</i>	<i>1.5%</i>
	<i>Canal Norte</i>	<i>91882</i>	<i>37.0%</i>
	<i>Canal Sul</i>	<i>152314</i>	<i>61.5%</i>
<i>Q_{total}</i>		<i>248040</i>	
<i>Seca/2008</i>	<i>Estreito de Breves</i>	<i>1621</i>	<i>1.1%</i>
	<i>Canal Norte</i>	<i>56143</i>	<i>38.9%</i>
	<i>Canal Sul</i>	<i>86991</i>	<i>60.0%</i>
<i>Q_{total}</i>		<i>144756</i>	
Integração da curva Parametrizada			
Cheia/2007	Estreito de Breves	2454	0.9%
	Canal Norte	101541	38.5%
	Canal Sul	159912	60.6%
Q _{total}		263908	
Cheia/2008	Estreito de Breves	3918	1.5%
	Canal Norte	101923	39.6%
	Canal Sul	152040	58.9%
Q _{total}		257882	
Seca/2008	Estreito de Breves	3502	2.2%
	Canal Norte	56143	37.0%
	Canal Sul	92623	60.8%
Q _{total}		152269	

Para a comparação entre os métodos de cálculo optou-se por adotar os valores obtidos a partir da integração das curvas resultantes da interpolação (método B) como parâmetro de comparação com os obtidos através dos outros dois métodos (A e C). Utilizando os valores da Tabela 7 foram calculadas as diferenças entre os métodos (B-A e B-C) e o percentual que estas diferenças representam mostrados na Tabela 8. Constatou-se que há discrepância entre os resultados dos diferentes métodos de cálculo, em particular quando a parametrização da curva é utilizada, como no caso do estreito de Breves em 2008.

Tabela 8: Resultados das diferenças entre os métodos utilizados para os cálculos das vazões residuais e a equivalência percentual entre os métodos.

Diferenças e percentagem entre os métodos usados nos cálculos das vazões						
	Vazões [m ³ /s]	(%)	Vazões [m ³ /s]	(%)	Vazões [m ³ /s]	(%)
Métodos	Breves - Cheia 2007		Breves - Cheia 2008		Breves - Seca 2008	
B-A	64	2.8	78	2.0	104	6.4
B-C	150	6.5	75	1.9	1881	46.3
	Canal Norte - Cheia 2007		Canal Norte - Cheia 2008		Canal Norte - Seca 2008	
B-A	2753	2.5	1468	1.6	211	0.4
B-C	4595	4.3	10041	9.9	0	0.0
	Canal Sul - Cheia 2007		Canal Sul - Cheia 2008		Canal Sul - Seca 2008	
B-A	1502	0.9	2082	1.3	2841	3.3
B-C	1170	0.7	273	0.2	5632	6.1
	Q _{total} - Cheia 2007		Q _{total} - Cheia 2008		Q _{total} - Seca 2008	
B-A	43199	1.6	537	0.2	3156	2.2
C-A	7594	2.8	9306	3.6	10669	7.0
B-C	3275	1.2	9843	3.8	7513	4.9

Métodos utilizados: A - Integração direta da curva dos dados do ADCP; B - Integração da curva interpolada e C - Integração da curva parametrizada.

Na Figura 85 mostra-se uma representação dos resultados (Tabela 7) obtidos empregando os métodos utilizados para os cálculos das vazões residuais. O objetivo é facilitar a comparação entre os valores de acordo com a campanha e o ano em que foram realizadas as medições (cheia e seca) e a metodologia empregada nos cálculos (A, B e C).

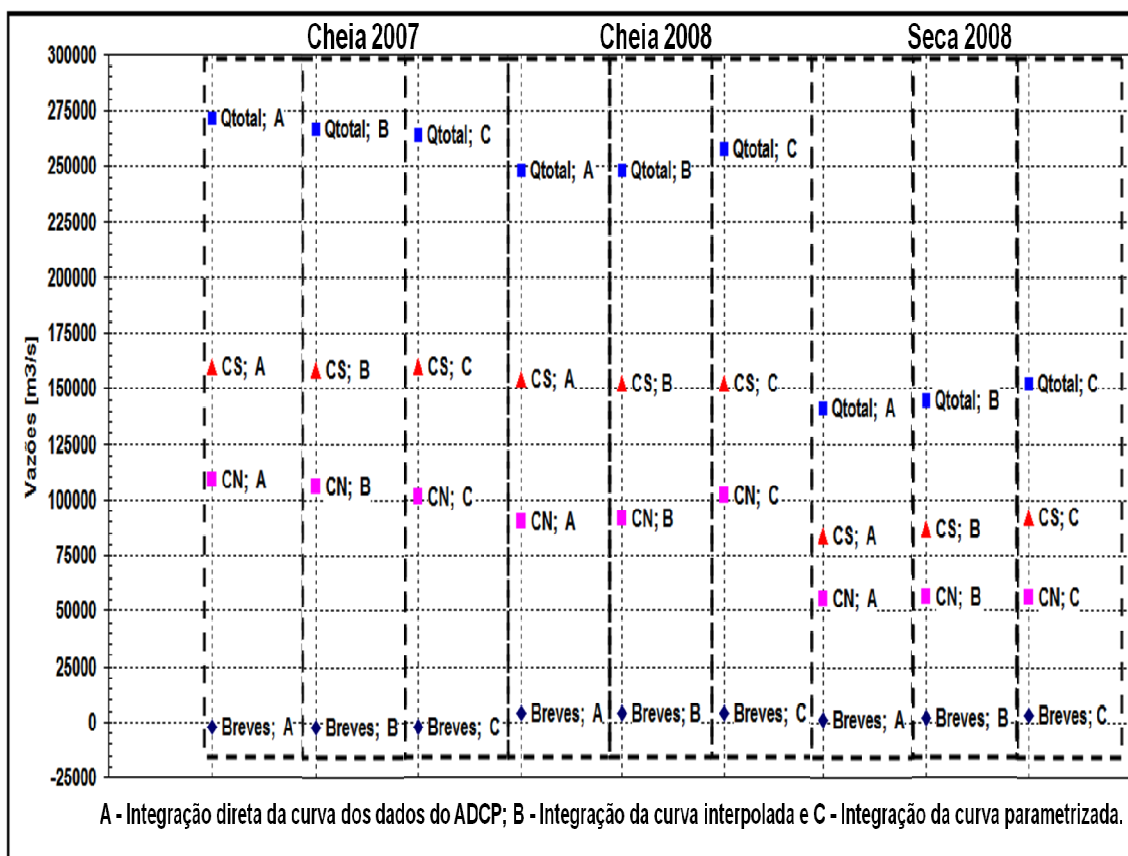


Figura 46: Representação dos resultados apresentados na Tabela 5, a partir das metodologias adotadas para obter os valores residuais de vazões, de acordo com o ano e o período hidrológico das medições.

A Tabela 9 mostra os valores calculados para a vazão residual do rio Amazonas, obtidos a partir da soma das vazões residuais das seções onde foram realizadas as medições durante as três campanhas, na época de cheia e seca, e cujos dados foram analisados neste estudo. Estes valores são provenientes dos resultados obtidos a partir da integração da curva interpolada (método B) com base na curva resultante dos dados medidos.

Tabela 9: Resultado da soma das vazões residuais das três seções onde foram feitas as medições nas campanhas de cheia (2007 e 2008) e seca (2008), sendo este o valor da vazão residual do rio Amazonas para a época das medições de acordo com o período hidrológico.

Campanha	Período Hidrológico	Ano	Q_{total} [m^3/s]
1 ^a	Cheia	2007	268592
2 ^a	Cheia	2008	248040
3 ^a	Seca	2008	144756

Na Tabela 10 constam os valores das vazões observados, para os dias em que foram realizadas as medições durante as campanhas, nas estações fluviométricas onde se faz o registro dos dados cota/vazão, para: rio Amazonas - estação Óbidos (170500001), rio Tapajós – estação Acará do Tapajós (176500002) e rio Xingu – estação Altamira (188500000) (fonte: ANA – Agência Nacional das Águas, 2009; – HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas; <http://hidroweb.ana.gov.br/>). Foram utilizados no cálculo os valores diários para Óbidos e Tapajós, no ano de 2007. Para o ano de 2008 e para o rio Xingu só foi possível utilizar a média mensal, pois não havia dados disponíveis de vazões/cotas diárias.

Tabela 10: Valores das vazões para a época das campanhas realizadas nos períodos de cheia (2007 e 2008) e seca (2008) do rio Amazonas.

Campanha cheia 2007				
Data	Óbidos [m ³ /s]	Tapajós [m ³ /s]	Xingu [m ³ /s]	Qttotal [m ³ /s]
21/06/2007	236391	6010	5151	247551
23/06/2007	234977	5647	5151	245774
26/06/2007	232522	5590	5151	243263
Campanha cheia 2008				
Data	Óbidos [m ³ /s]	Tapajós [m ³ /s]	Xingu [m ³ /s]	Qttotal [m ³ /s]
Junho de 2008	246531	10769	7044	264343
Campanha seca 2008				
Data	Óbidos [m ³ /s]	Tapajós [m ³ /s]	Xingu [m ³ /s]	Qttotal [m ³ /s]
Outubro de 2008	105476	3912	1292	110681

Observam-se diferenças de +9% e -6% entre a vazão medida no estuário e as vazões em Óbidos e tributários, sendo sobreestimada no período de cheia no ano de 2007/2008 e subestimada no período de seca em 2008. A falta de dados diários no ano de 2008 não permite uma análise mais aprofundada, mas as diferenças observadas estão dentro da margem de erro da própria determinação das vazões, a partir da curva chave. A Figura 47 mostra os dados de cota e vazão medida em Óbidos a partir dos quais a curva chave é determinada.

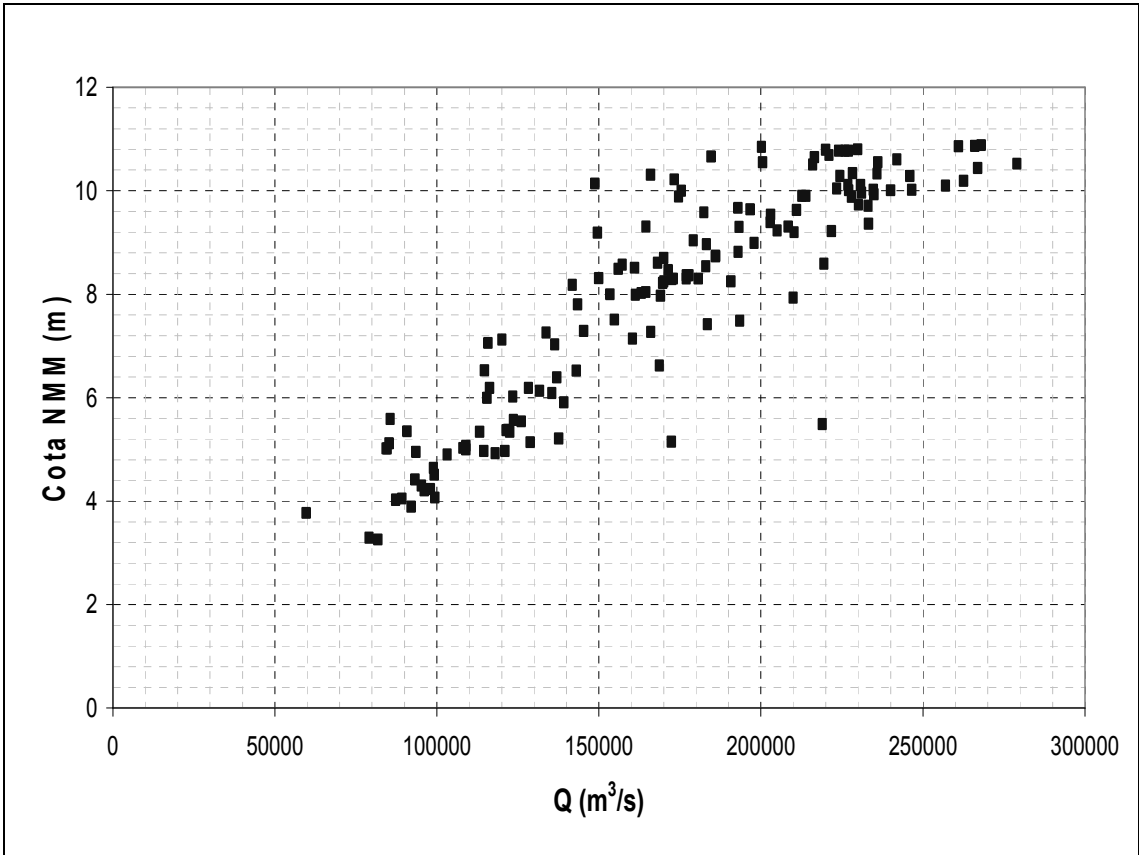


Figura 47: Dados de vazão medidos em Óbidos, a partir dos quais é determinada a curva chave.

5. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

5.1. Implementação do Modelo Numérico no domínio de estudo

Neste capítulo é apresentado o estudo numérico no estuário do rio Amazonas visando avaliar e quantificar a distribuição da vazão fluvial pela rede de canais, levando em consideração a influência da maré. Para o desenvolvimento deste estudo fez-se uso dos resultados³ do modelo Hidrodinâmico Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC, HAMRICK, 1994, 1996). Primeiramente foi realizada uma comparação dos resultados do modelo com os dados medidos em campo para poder avaliar o quanto o modelo representa a principal característica física do fenômeno estudado, que é a distribuição da vazão fluvial pelos diversos canais. Os resultados foram, então, analisados para um ciclo anual (ano de 2007) com o objetivo de observar o comportamento da distribuição de vazões durante o período de cheia e seca do rio Amazonas em marés de sizígia e quadratura.

5.1.1. Malha de elementos finitos

A malha do modelo é mostrada na Figura 48, abrangendo uma área compreendida entre os paralelos 3°S e 4°N e os meridianos 56° e 46° W, e é formada pela plataforma oceânica e o estuário do rio Amazonas até aproximadamente a cidade de Óbidos, cerca de 850 km da foz. O contorno externo da plataforma possui elementos de aproximadamente 30x30 km, na foz do estuário, com um tamanho médio de 5x5 km, enquanto que o interior dele está discretizado com duas fileiras de elementos de 4x2 km, em um total de 4004 o número de nós de cálculo.

³ O modelo numérico utilizado foi previamente calibrado em trabalhos anteriores (Gallo, 2004, 2009).

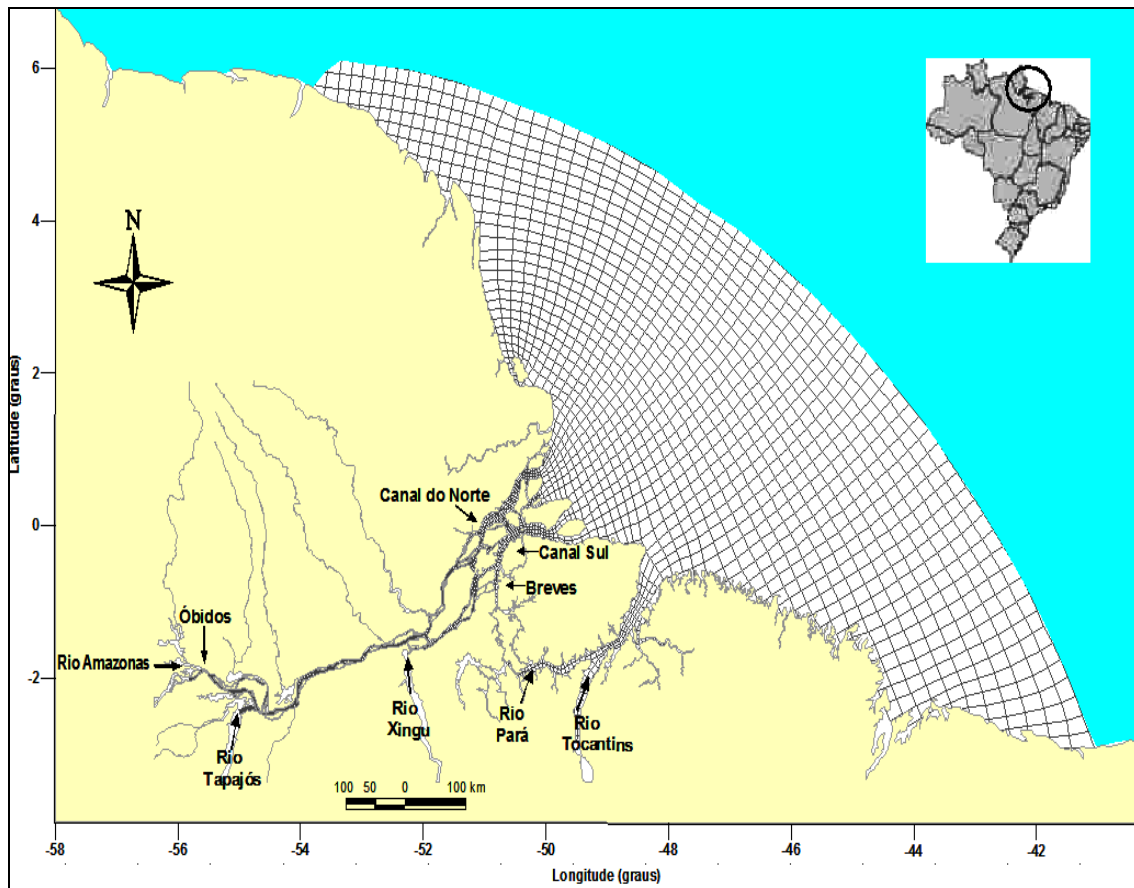


Figura 48: Mapa com a malha da região modelada destacando os seus principais tributários e os canais próximos à foz (canais Norte e Sul).

5.1.2. Condição de contorno fluvial e oceânica

Como condição de contorno na seção de entrada do rio Amazonas utilizou-se o hidrograma de vazões para a estação de Óbidos do ano de 2007 (Figura 49), obtido junto à Agência Nacional de Águas (ANA). A Tabela 11 mostra as vazões máximas, mínimas e médias calculadas a partir deste hidrograma. Com relação aos tributários no trecho estuarino, foram considerados os rios Tapajós e Xingu, indicados na Figura 48, e tem-se também o rio Tocantins, que deságua no rio Pará. Em cada um dos rios mencionados foram selecionadas estações de medição que possuíam séries temporais de cotas e a curva chave correspondente, para determinar as suas principais características hidrológicas. Assim, a partir de um período de oito anos (2000 a 2007) de cotas diárias (fonte: ANA, 2007), foram calculadas as vazões médias anuais para os rios Tapajós (estação Jatobá), Xingu (estação Altamira) e Tocantins (estação Tucuruí). A Tabela 12 mostra os dados de entrada no modelo, as vazões médias anuais para os principais tributários: os rios Tapajós, Xingu e Tocantins.

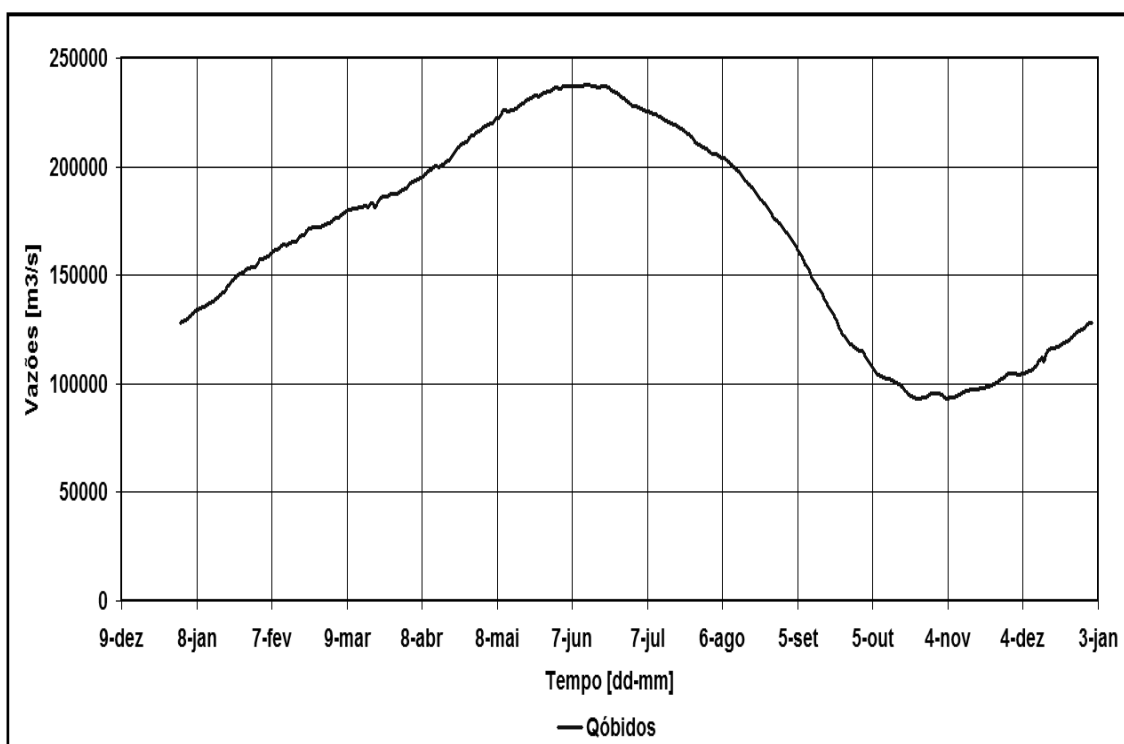


Figura 49: Hidrograma de vazões registradas na estação de Óbidos para o ano de 2007, utilizado como dado de entrada do modelo numérico. Fonte: ANA - Agência Nacional das Águas.

Tabela 11: Vazão máxima, mínima e a média anual registrada na estação de Óbidos em 2007.

<i>Estação de Óbidos - Hidrograma de Vazões de 2007</i>	
$Q_{máxima}$	237813 [m ³ /s]
$Q_{média}$	168091 [m ³ /s]
$Q_{mínima}$	92989 [m ³ /s]

Tabela 12: valores médios anuais de vazão utilizados como dado de entrada no modelo numérico.

<i>Dados de entrada no modelo</i>	
<i>Óbidos (ANA)</i>	<i>Hidrograma de Vazões</i>
<i>RIO</i>	$Q_{média}$ [m ³ /s]
<i>Tapajós</i>	11000
<i>Xingu</i>	9000
<i>Tocantins</i>	11000

Para a condição de contorno externa (elevação da superfície na fronteira aberta, com um total de 70 nós), foram prescritas as elevações do nível d'água para o ano da simulação (2007). As séries de níveis foram obtidas através de previsão harmônica. A previsão harmônica para cada nó da fronteira foi realizada empregando 8 constantes astronômicas (M_2 , N_2 , S_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1) extraídas do modelo global FES 99 (LEFEBVRE *et al.*, 2002).

5.2. Seções onde foram calculadas as vazões

A saída de resultados do modelo pode ser analisada utilizando o Software Water Quality Analysis Simulation Program (WASP 6.0), programa de pós-processamento do EFDC. Os dados utilizados nesse trabalho foram obtidos com base nos vetores de velocidade u_i e v_j , a profundidade média local e a variação de nível em cada um dos elementos em cada uma das seções analisadas.

A Figura 50 apresenta a malha com a identificação das seções escolhidas para analisar a distribuição da vazão fluvial pelos canais.

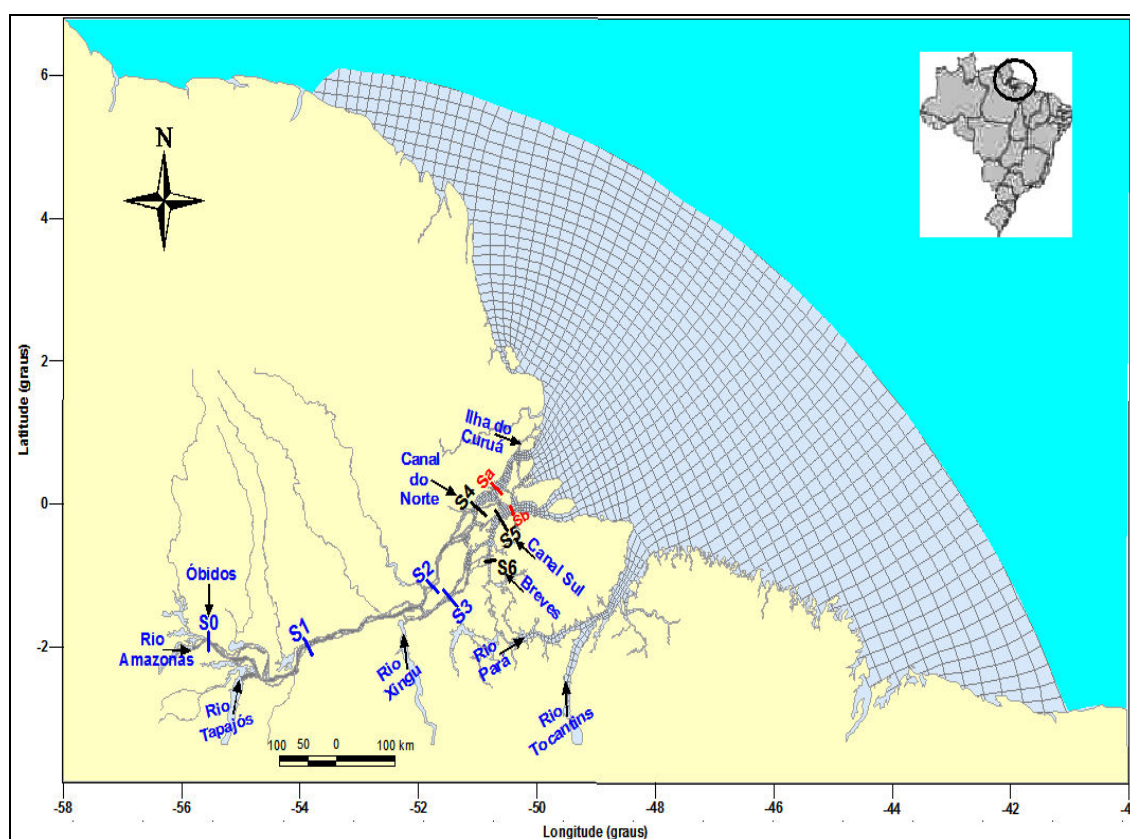


Figura 50: Mapa da região modelada. Em azul e vermelho, as seções pré-determinadas para o estudo da distribuição de vazões; em preto, são as seções feitas na campanha de vazões realizada em junho/2007; incluindo os dois principais canais, o norte e o sul.

Estas seções foram escolhidas com o objetivo de caracterizar a distribuição da vazão fluvial ao longo da rede de canais que formam o estuário do rio Amazonas. A primeira seção, denominada de S_0 , foi escolhida por ser próxima à estação de Óbidos e da seção onde se prescreveram os dados de entrada, localizada aproximadamente a 800 km da foz. A seção S_1 foi escolhida para acompanhar o hidrograma numa região

influenciada pela maré, porém em um único canal. A S_2 e a S_3 são duas seções localizadas após a primeira grande bifurcação, antes da Ilha de Gurupá. As seções S_4 , S_5 e S_6 correspondem às seções medidas, as quais serão utilizadas para caracterizar as vazões no Canal Norte (S_4), Canal Sul (S_5) e Estreito de Breves (S_6). O Estreito de Breves é uma seção importante porque representa a conexão entre o rio Amazonas e o rio Pará. Devido à magnitude do domínio modelado e ao tamanho dos canais do rio principal, neste trabalho não foram representadas as conexões naturais entre o rio Jacaré e a Baía das Bocas, adotando-se apenas uma conexão entre os dois, de modo a representar o fluxo entre o rio Amazonas e o rio Pará.

Entre as seções S_4 e S_5 e os Canais Norte e Sul, propriamente ditos, há uma conexão chamada de Canal Perigoso ou da Caviana (Figura 51). Portanto, foram acrescentadas as seções S_a e S_b para verificar como esta distribuição de vazões, das seções S_4 e S_5 vão continuar ao longo dos canais Norte e Sul, em direção à foz do rio Amazonas.

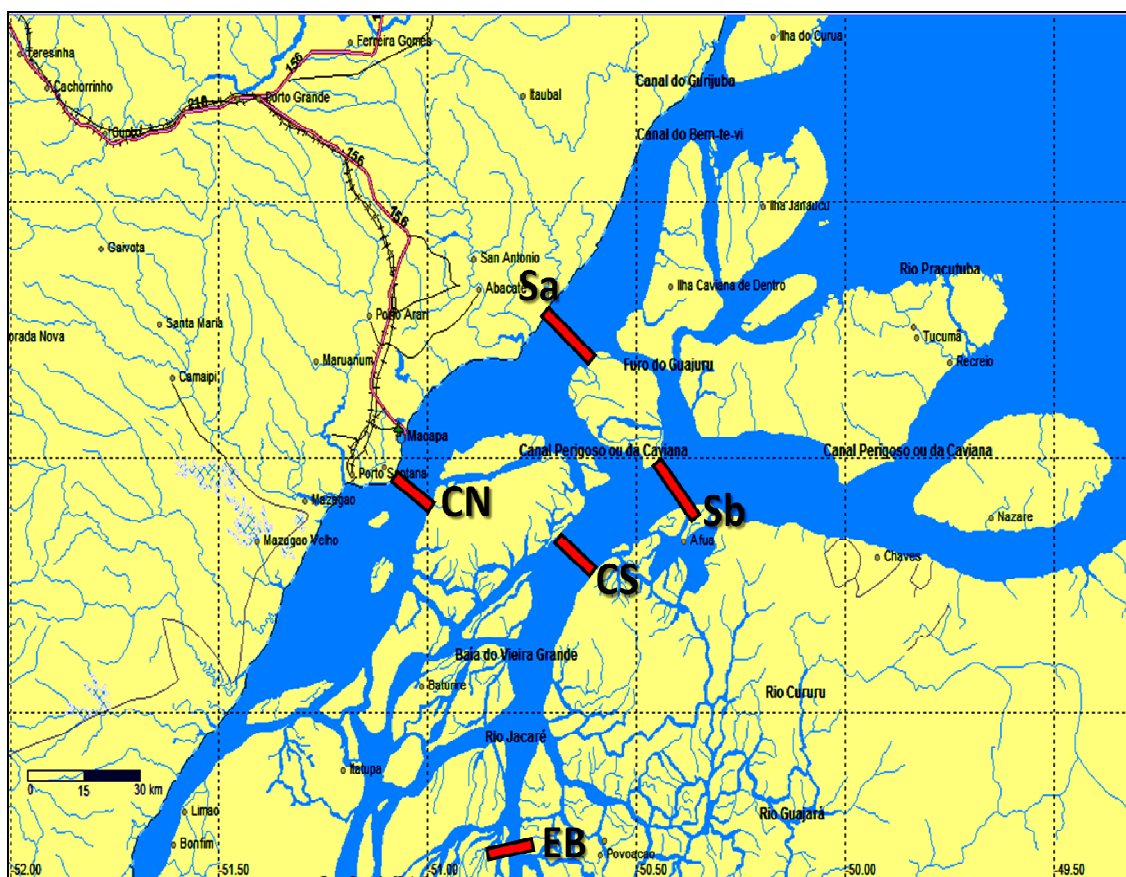


Figura 51: Localização e identificação das seções S_a e S_b , utilizadas para contabilizar a distribuição da vazão fluvial que se dirige aos Canais do Norte e Sul, propriamente ditos, passando pelas seções CN (S_4 – Canal Norte), CS (S_5 – Canal Sul) e EB (S_6 – Estreito de Breves).

5.2.1. Metodologias utilizadas nos cálculos das vazões do modelo numérico

As curvas de vazões foram obtidas, para as nove seções selecionadas ao longo da rede de canais que formam o estuário do rio Amazonas, utilizando os resultados gerados pelo modelo numérico (EFDC) implementado para a região do estudo.

Para cada uma das seções escolhidas foi obtida a identificação de cada elemento da seção transversal a partir dos vetores i e j , que identificam o nó central do elemento. Neste elemento é identificada, assim, a largura, a profundidade referida ao nível médio, o nível d'água e as componentes de velocidades (u_i e v_j), sendo estas componentes referidas à **coordenada local** da malha. Com base nesses dados foi possível calcular o valor de vazão para cada instante de tempo. A soma das vazões de cada elemento que compõe a seção dará a vazão total na mesma. A Figura 52 é uma ilustra da definição adotada para o cálculo realizado.

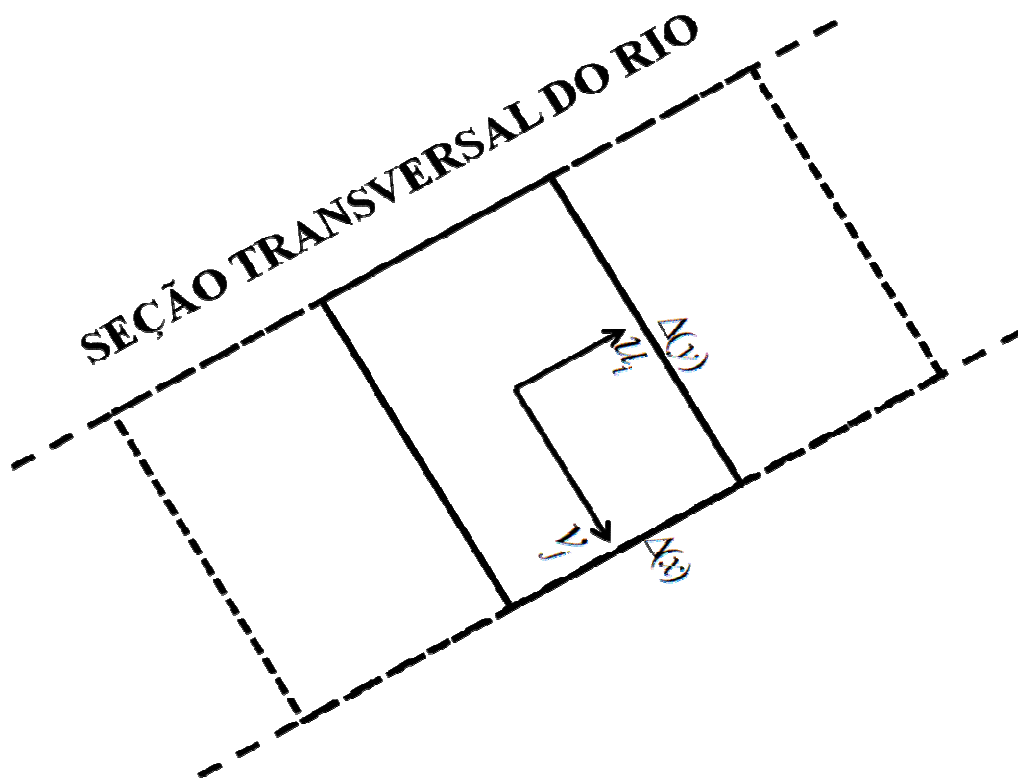


Figura 52: Seção transversal, idealizada para ilustrar a definição adotada para obter a equação utilizada nos cálculos de vazões do modelo numérico.

Então, a equação utilizada nos cálculos é representada da seguinte forma:

$$Q = v_j (\eta + h) \Delta x$$

Sendo:

- ✓ v_j a componente de velocidade perpendicular à seção transversal;
- ✓ η a variação de nível, referenciada ao nível médio;
- ✓ h a profundidade local, também referenciada ao nível médio;
- ✓ Δx tamanho da seção transversal.

Com os resultados definidos a partir desta equação, foi possível acompanhar a distribuição das vazões pela rede de canais do estuário do rio Amazonas, através das nove seções escolhidas.

5.3. Vazões instantâneas nas seções do modelo numérico

Os dados do modelo numérico foram analisados de modo a se obterem curvas de vazões para cada uma das seções escolhidas, para serem comparadas com o hidrograma de vazões da estação de Óbidos, acrescido das vazões dos rios Tapajós e Xingu, quando pertinente. Assim, foram somadas as vazões instantâneas da seção S_2 e S_3 , as vazões das seções S_4 , S_5 e S_6 , e das seções S_a , S_b e S_6 .

A Figura 53 mostra o hidrograma de vazões para a estação de Óbidos (dado de entrada do modelo), comparado com o resultado das vazões na seção S_0 , provenientes do modelo numérico. É possível observar que a curva de vazão chega nesta seção com uma amplitude menor quando comparada com o hidrograma de Óbidos, ou seja, a partir da seção de entrada do dado até a seção S_0 constatou-se que o modelo apresentou um decréscimo de vazão da ordem de $5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na Figura 54 mostra-se o hidrograma de vazões para a seção S_1 , e verifica-se que já é perceptível a presença da maré nesse trecho do rio Amazonas, principalmente durante o período de seca, que é característico a partir do mês de setembro até novembro.

Os resultados para as somas das vazões das seções S_2 e S_3 ; S_4 , S_5 e S_6 ; e das seções S_a , S_b e S_6 estão mostrados na Figura 55, 56 e 57, respectivamente.

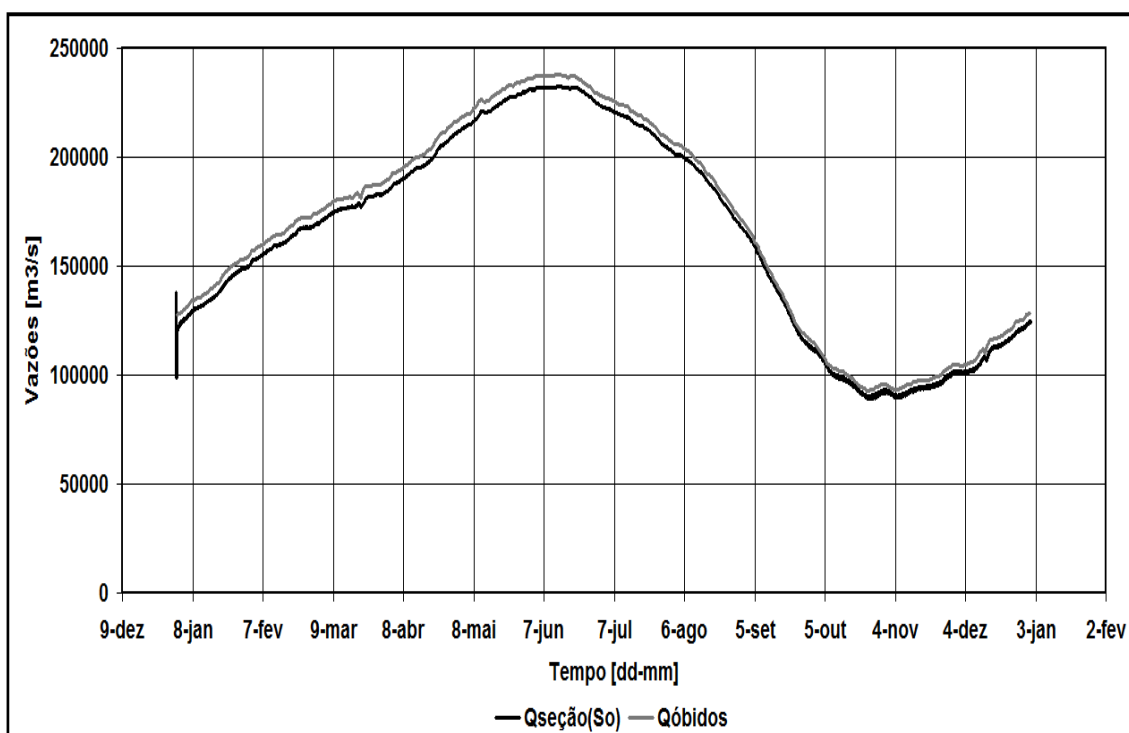


Figura 53: Comparação entre a curva das vazões do modelo numérico da seção S_0 com a curva do hidrograma de vazões da estação de Óbidos. (Fonte: ANA-2007).

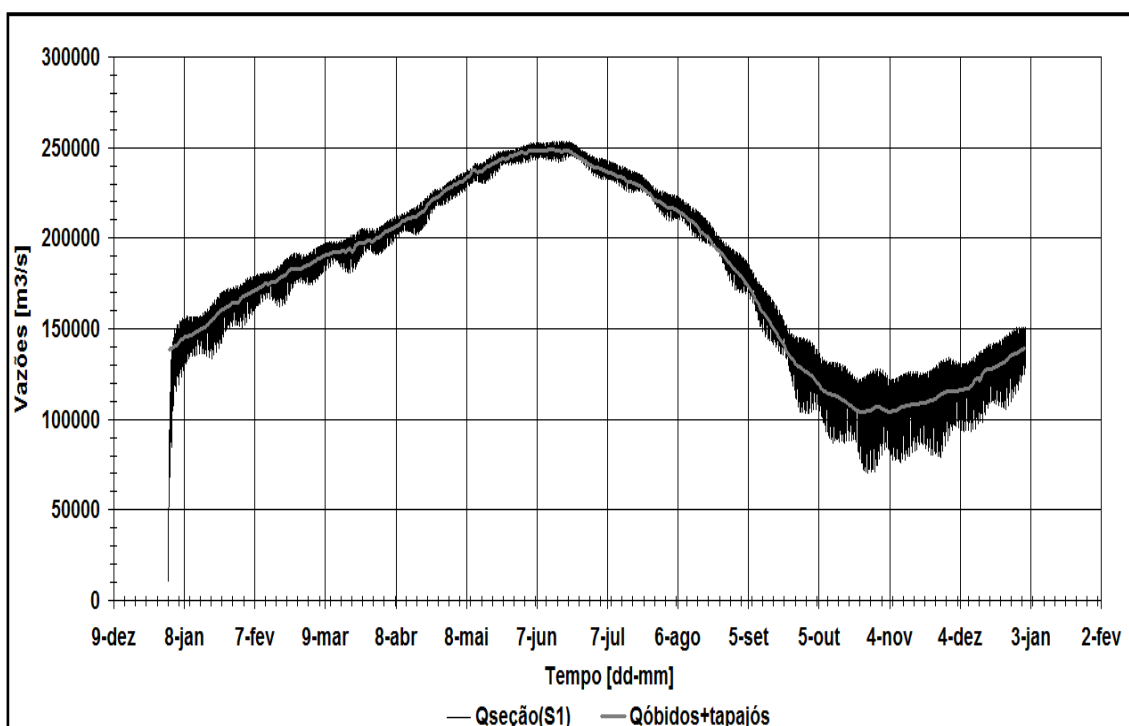


Figura 54: Hidrograma das vazões modeladas para a seção S_1 (preto) comparada com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (cinza) acrescida da vazão média do rio Tapajós.

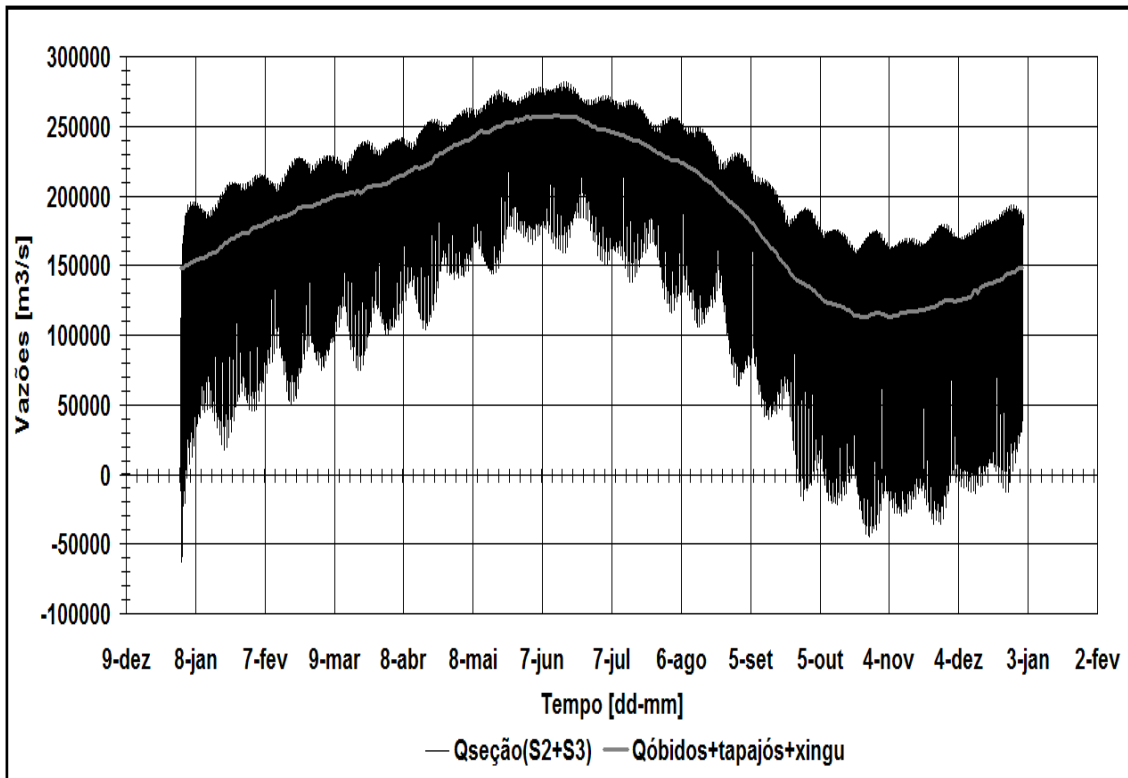


Figura 55: Hidrograma resultante da soma das vazões instantâneas da seção S_2 com a S_3 (preto), comparado com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (cinza) acrescida da vazão média dos rios Tapajós e Xingu.

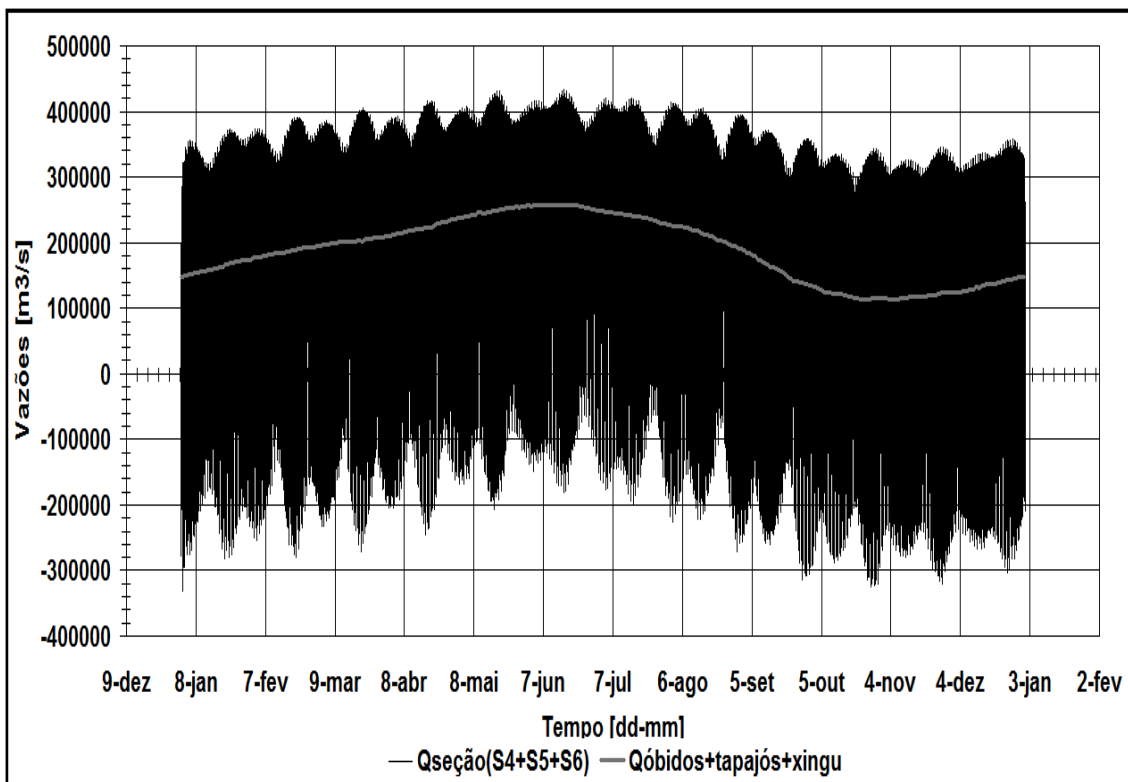


Figura 56: Hidrograma resultante da soma das vazões instantâneas das seções S_4 , S_5 e S_6 (preto), as mesmas onde foram feitas as medições no Canal Norte, Canal Sul e Estreito de Breves, respectivamente. Comparado com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (cinza), acrescida da vazão média dos rios Tapajós e Xingu.

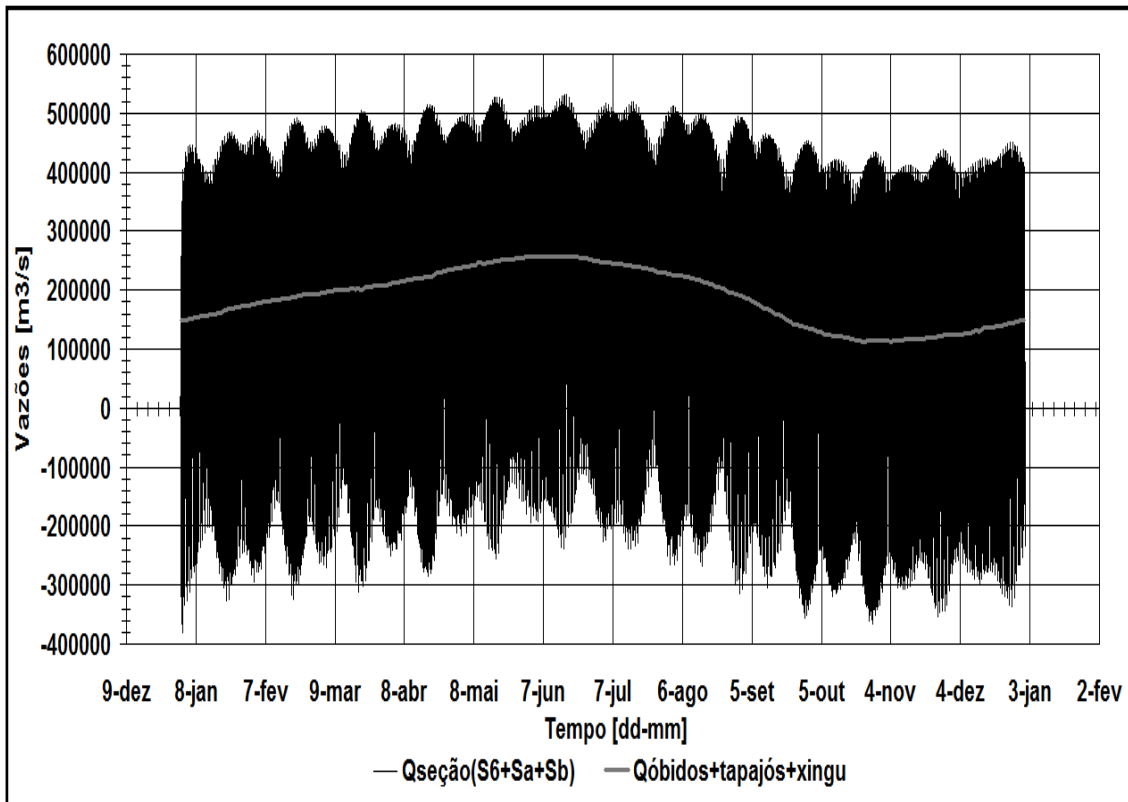


Figura 57: Hidrograma resultante da soma das vazões instantâneas das seções S_6 (Estreito de Breves), S_a e S_b (em preto), à jusante das seções S_4 e S_5 . Comparado com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos (em cinza) acrescida da vazão média dos rios Tapajós e Xingu.

5.4. Filtragem da maré nas vazões modeladas

Para poder filtrar a maré nas vazões modeladas, foi adotado uma média móvel com o objetivo de filtrar as principais componentes harmônicas de maré observadas: M_2 , M_4 e M_{sf} . Para isso, adotou-se uma média móvel de 30 dias centralizada em 15 dias, o que corresponde a filtrar as primeiras 360 horas de dados no modelo, ou seja, isto significa que foram desconsiderados os 15 dias iniciais e os 15 finais da série anual utilizada. As curvas dos resultados obtidos com a média móvel foram comparadas com a curva do hidrograma de vazões da estação de Óbidos acrescida das vazões médias anuais dos principais tributários (Tapajós e Xingu), da mesma forma que na comparação anterior.

A Figura 58 mostra a curva das vazões modelada para a seca S_0 , a resultante da média móvel para e o hidrograma em Óbidos. Nota-se uma boa correspondência entre a vazão instantânea e a filtrada, sem induzir diferenças de fase. Nesta seção é observada uma pequena influência da maré, principalmente no período de seca

A Figura 59 apresenta o hidrograma obtido através da filtragem da maré dos dados do modelo para a seção S_1 , comparado com o hidrograma em Óbidos acrescido da vazão do rio Tapajós. A Figura 60 mostra o resultado correspondente obtido para a soma das vazões das seções S_2 e S_3 ; a Figura 61 o resultado referente à soma das vazões das seções S_4 , S_5 e S_6 e a Figura 62, das seções S_a , S_b e S_6 . A partir da comparação com a curva do hidrograma das vazões da estação de Óbidos, nota-se que sempre há diferenças de amplitude seja no período de máximas ou mínimas vazões ou em ambos (período de cheia e seca) e diferenças de fase.

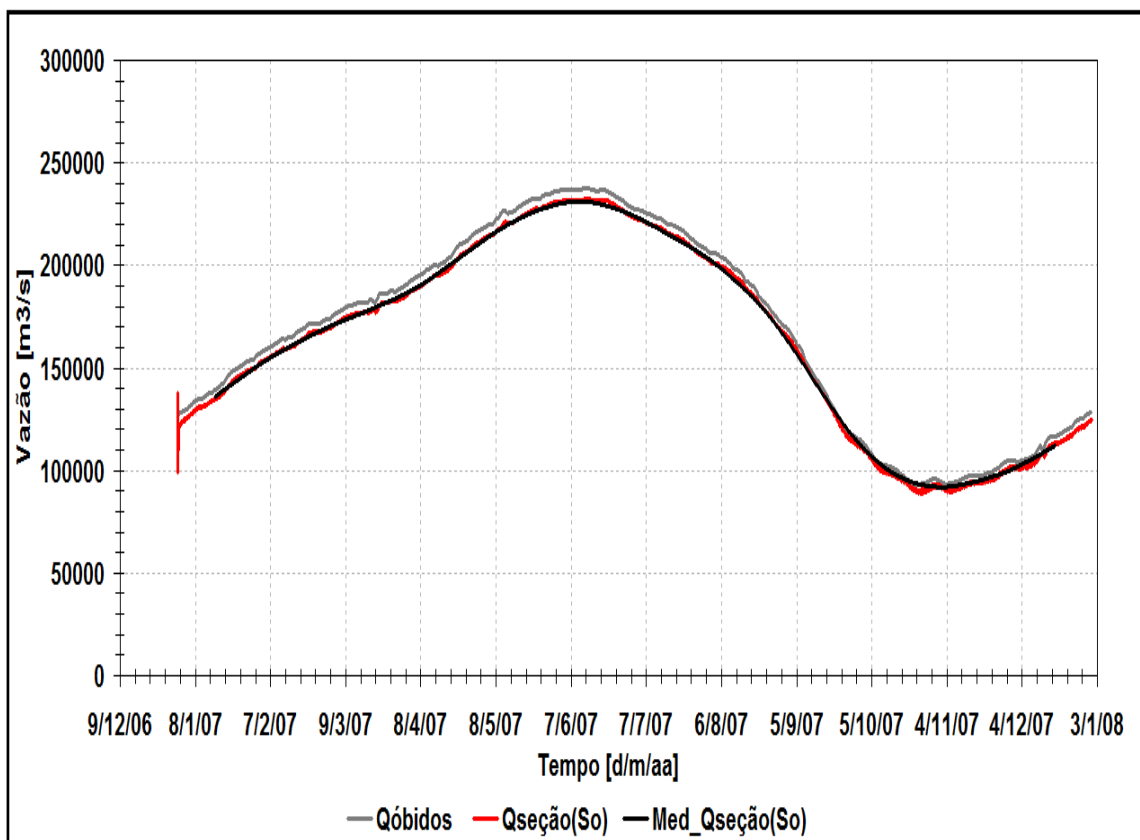


Figura 58: Comparação entre a curva das vazões instantâneas da seção S_0 com a curva resultante da média móvel para filtragem da maré, comparadas com o hidrograma da estação de Óbidos.

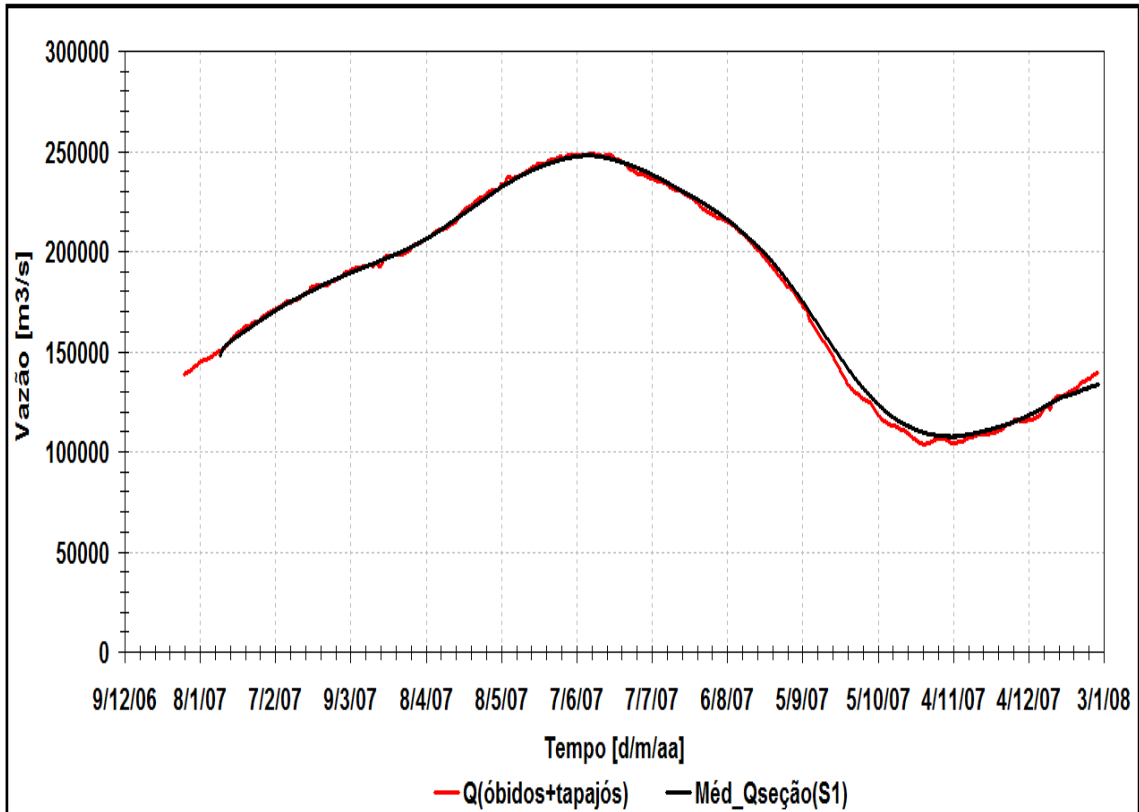


Figura 59: Comparação entre a curva das vazões filtradas da seção S₁ com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média do rio Tapajós.

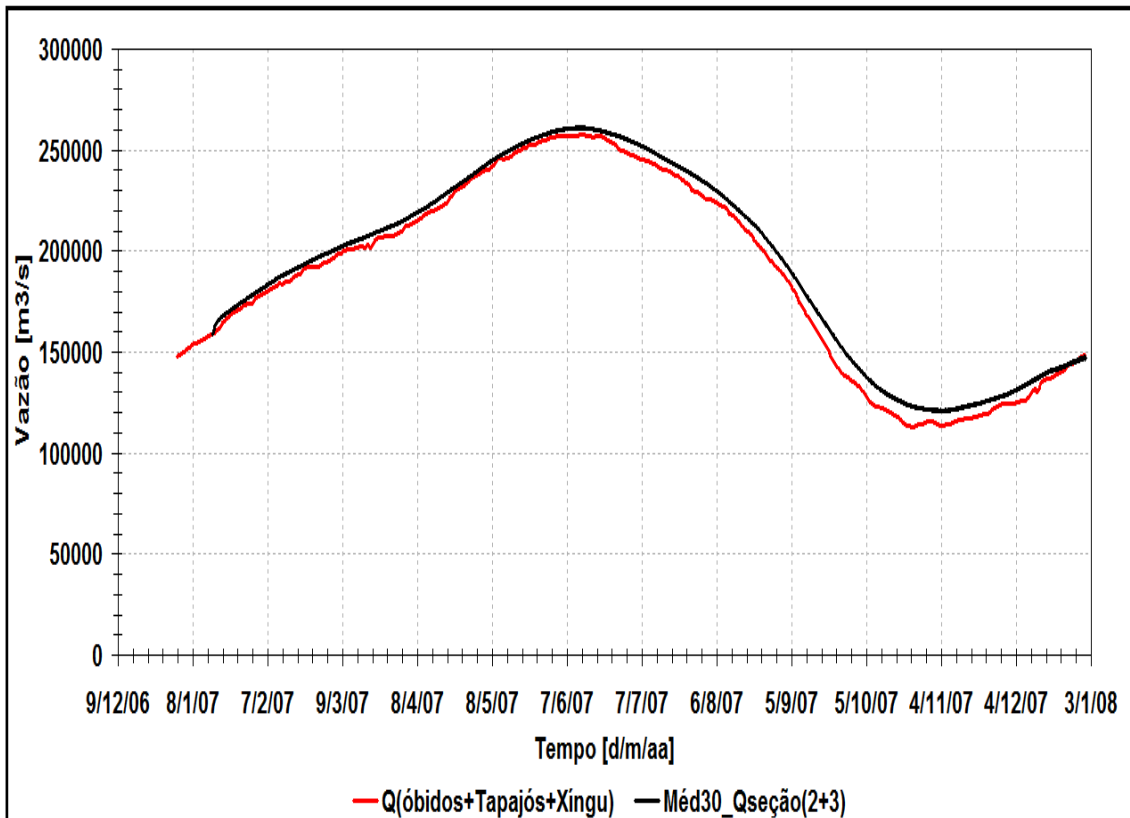


Figura 60: Comparação entre a curva das vazões filtradas das seções S₂ e S₃ com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média dos rios Tapajós e Xingu.

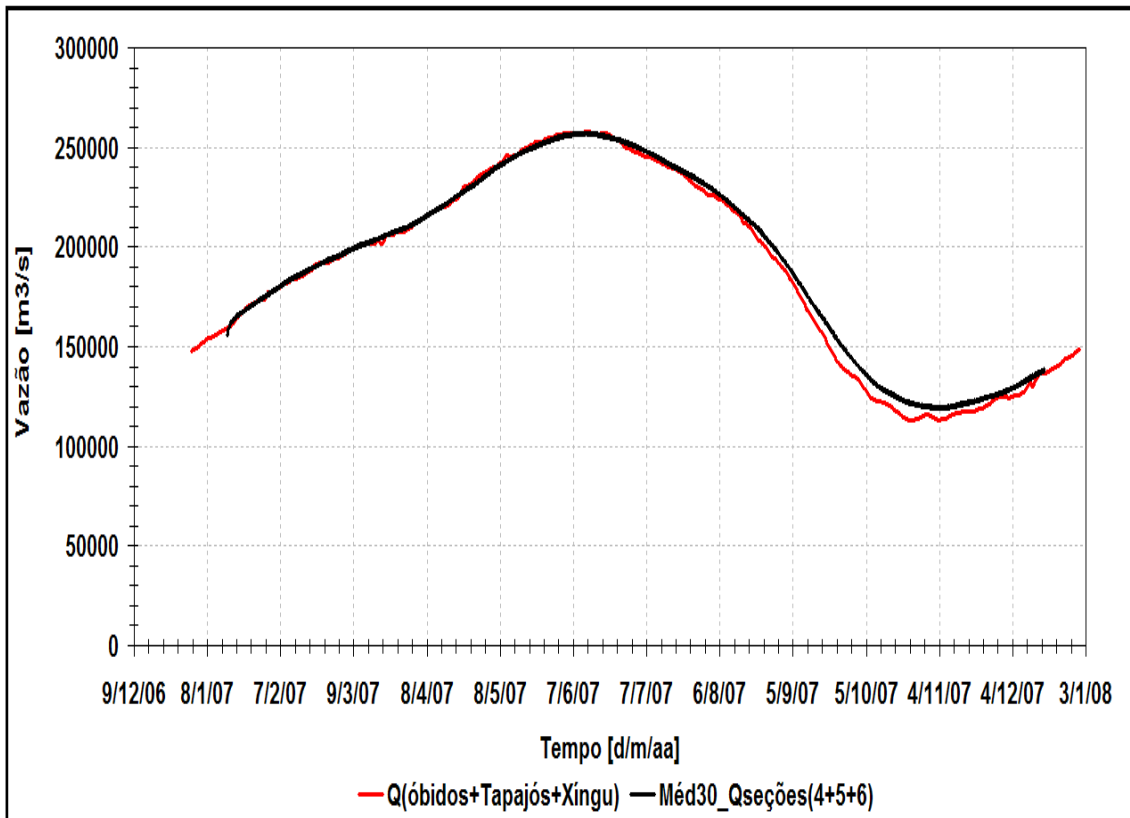


Figura 61: Comparação entre a curva das vazões filtradas das seções S₄, S₅ e S₆ com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média dos rios Tapajós e Xingu.

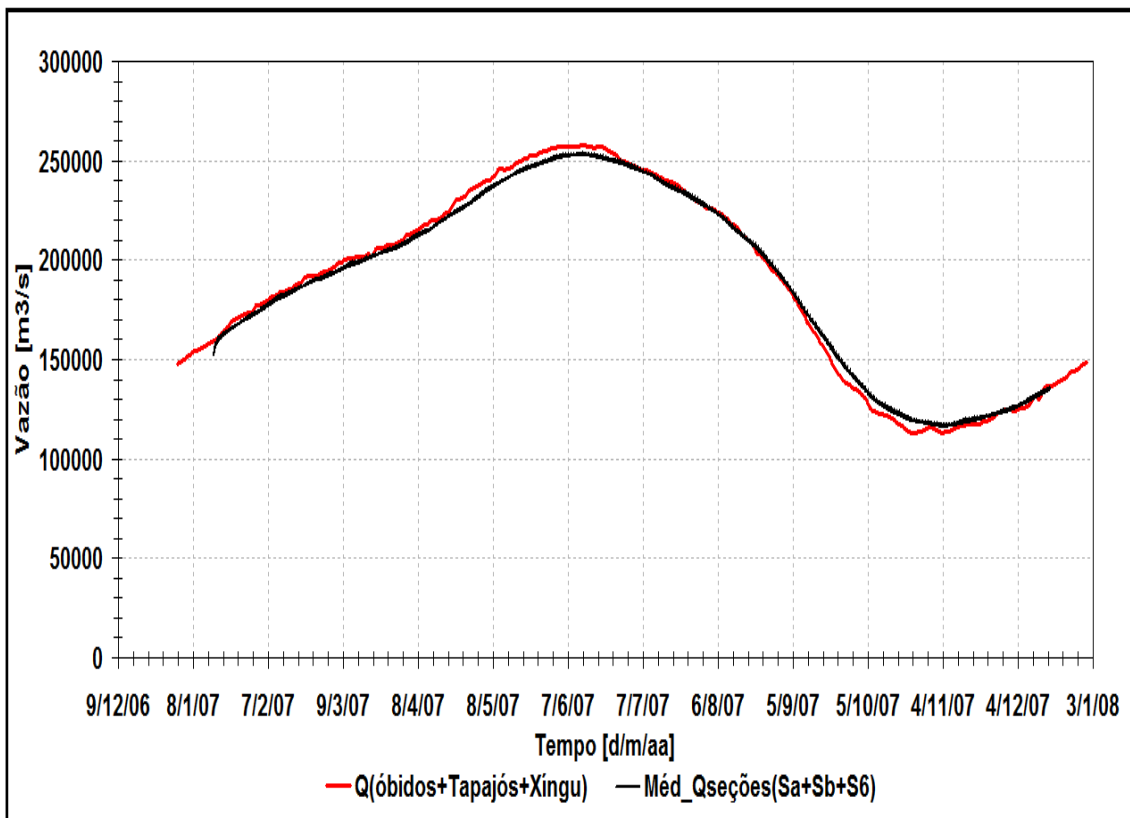


Figura 62: Comparação entre a curva das vazões filtradas das seções S_a, S_b e S₆ com o hidrograma da estação de Óbidos, somada com a vazão média dos rios Tapajós e Xingu.

5.4.1. Vazões médias anuais nas seções analisadas

A Tabela 13 esta mostrando as comparações das vazões médias anuais obtidas com simulação numérica nas diferentes seções e em suas respectivas composições, de acordo com as seções de interesse. Observam-se diferenças máximas da ordem de 10%.

Tabela 13: Vazões médias anuais nas diferentes seções modeladas e vazões médias anuais ingressadas ao modelo nas condições de contorno.

<i>Seções</i>	<i>Q_{média} [m³/s]</i>	<i>Q_{Óbidos+tributários}</i>	<i>Soma das Seções</i>	<i>Q_{média} [m³/s]</i>
<i>*Q_{Óbidos}</i>	168091	100%	S_2+S_3	172966
S_0	163830	97,5%	$S_4+S_5+S_6$	169853
S_1	168809	94,3%	$S_a+S_b+S_6$	180249
S_2	60712	35,1%		
S_3	112254	64,9%	RIOS	<i>Q_{média} [m³/s]</i>
S_4	67139	39,5%	<i>Tapajós</i>	11000
S_5	95743	56,4%	<i>Xingu</i>	9000
S_6	6970	4,1%	Soma (Q_{rio}+Q_{Óbidos})	<i>Q_{média} [m³/s]</i>
S_a	70446	39,1%	$Q_{Óbidos} + Tapajós$	179091
S_b	102831	57%	$Q_{Óbidos} + Tapajós + Xingu$	188091
S_6	6970	3,9%		
CÁLCULOS			Resultado [(m³/s)]	Erro relativo (%)
$Q_{Óbidos} - S_0$			4261	2.5
$(Q_{Óbidos} + Tapajós) - S_1$			10282	5.7
$(Q_{Óbidos} + Tapajós + Xingu) - (S_2 + S_3)$			15124	8.0
$(Q_{Óbidos} + Tapajós + Xingu) - (S_4 + S_5 + S_6)$			18237	9.7
$(Q_{Óbidos} + Tapajós + Xingu) - (S_a + S_b + S_6)$			7842	4.0

* $Q_{Óbidos}$ representa o valor da vazão média calculado a partir do hidrograma de vazões utilizado como dado de entrada no modelo.

5.5. Comparação das vazões modeladas e medidas no ciclo de maré

Foram comparados os dados medidos, apresentados no Capítulo 2, com o resultado do modelo para o período correspondente à campanha de vazões realizada no período de cheia do rio Amazonas, de 19 a 26 de junho de 2007. As comparações foram feitas entre as curvas resultantes para as seções S_4 , S_5 e S_6 , que são as correspondentes às seções medidas, denominadas Canal Norte (em frente à cidade de Macapá-AP), Canal Sul (Canal do Vieira Grande) e Estreito de Breves (Canal do rio Jacaré). Os dados provenientes das outras campanhas não foram comparados com resultados modelados, já que o modelo foi implementado apenas para o ano de 2007.

O modelo numérico EFDC tem sua saída temporal referenciada ao Meridiano de Greenwich (tomado como origem do tempo universal, e que passa pela antiga sede do observatório de Greenwich, na Inglaterra). Portanto, os resultados foram corrigidos e expressos na hora local, com diferença de 3 horas.

As Figuras 63, 64 e 65 mostram os resultados da comparação entre as curvas dos dados de vazões medidas com as modeladas. Observa-se que o modelo atenua a onda de maré, preservando a fase nas seções dos canais principais, e com diferença de aproximadamente de 2h05min na baixa-mar e 2h48min na preamar, entre a curva medida e a modelada no Estreito de Breves. Como será visto mais adiante, na apresentação dos resultados numéricos, a diferença de fase entre a o Estreito de Breves e os canais principais apresenta variações significativas ao longo do ano.

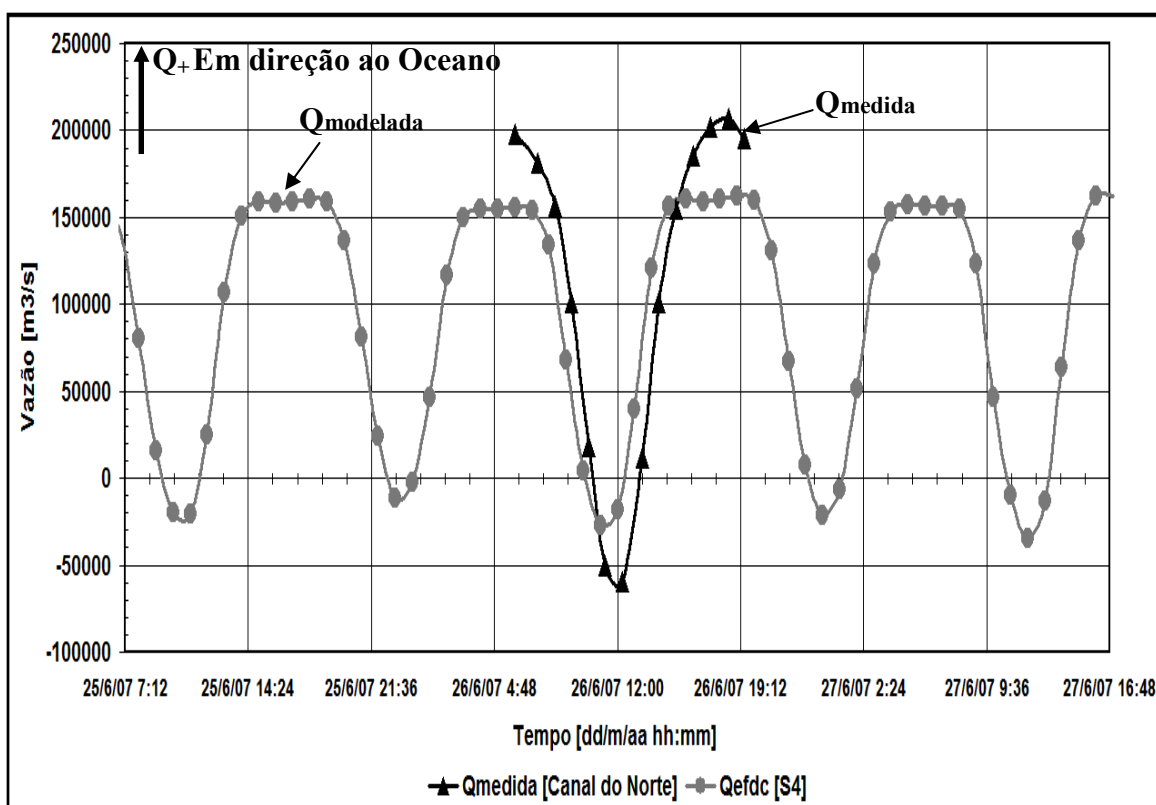


Figura 63: Comparação entre a curva das vazões medida com a de vazões modeladas da seção S₄, que é a equivalente à seção onde foram feitas as medições de vazões no Canal Norte, na época de cheia em 2007.

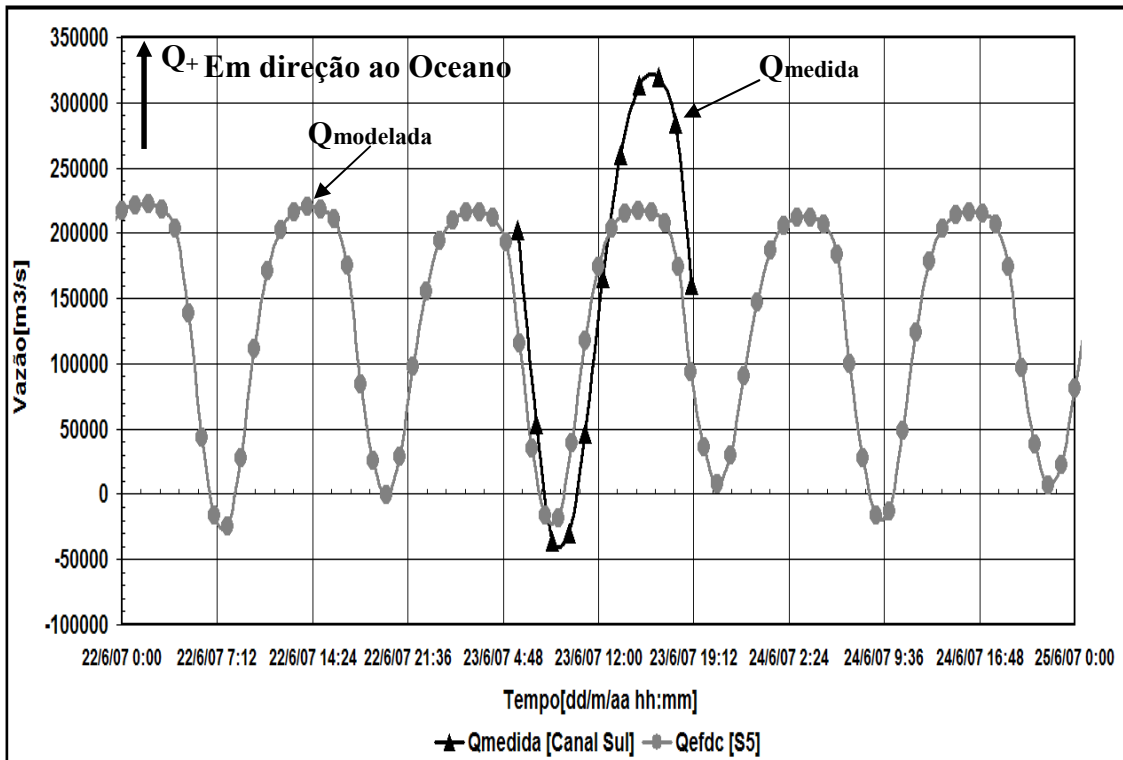


Figura 64: Comparação entre a curva de vazões medidas com as modeladas da seção S₅, que é equivalente à seção onde foram feitas as medições de vazões no Canal Sul, na época de cheia em 2007.

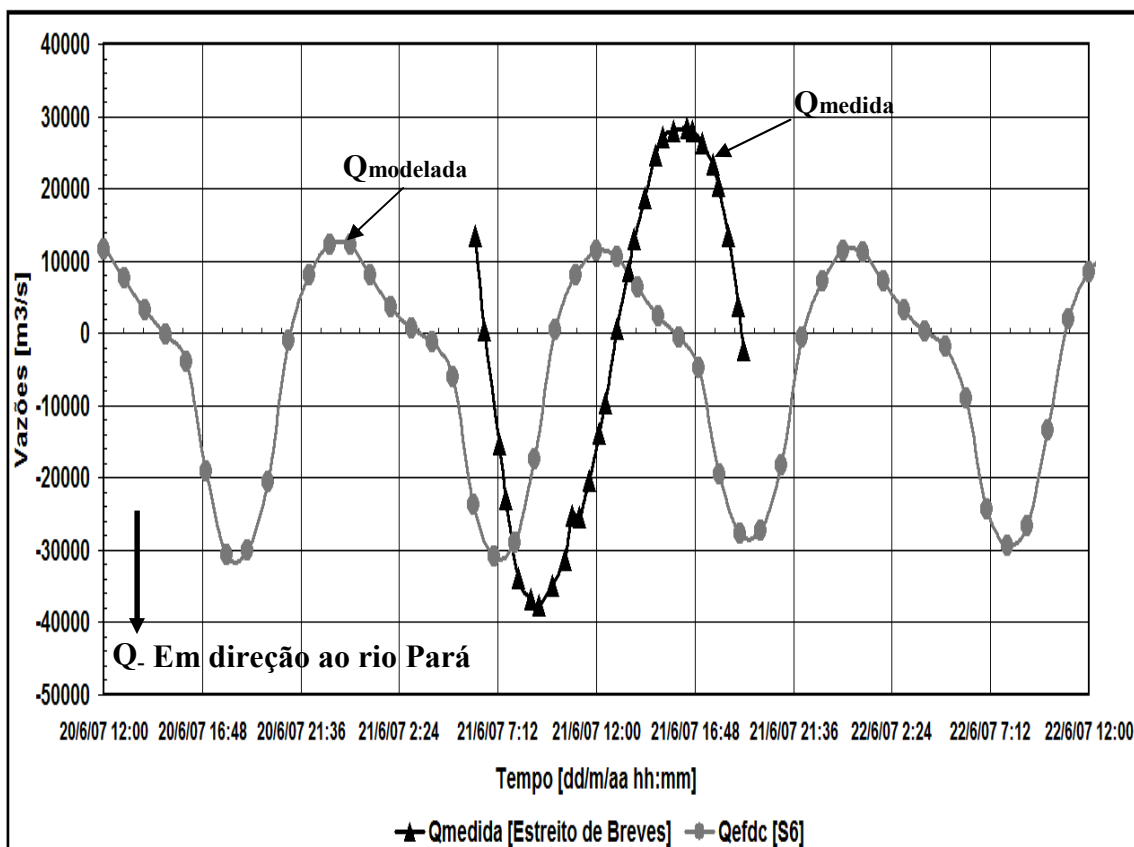


Figura 65: Comparação entre a curva de vazões medidas com as modeladas da seção S₆, que é equivalente à seção onde foram feitas as medições no Estreito de Breves, na época de cheia em 2007.

Com o objetivo de comparar as vazões residuais fornecidas pelo ADCP (campanha de vazões de 2007) com as obtidas a partir dos dados do modelo numérico (EFDC) foram comparadas as vazões residuais dos dados medidos com as resultantes do modelo numérico para o período corresponde à campanha de vazões realizada na época de cheia do rio Amazonas, de 19 a 26 de junho de 2007. Na Tabela 14 estão as vazões residuais do modelo e das medições para as seções S₄, S₅ e S₆ (equivalentes às seções onde foram feitas as medições). As vazões residuais, tanto modeladas quando medidas, foram obtidas a partir da integração da curva em um ciclo de maré (~13 horas). Nota-se que o modelo superestimou em 68.9% a vazão na seção S₆ (Estreito de Breves), e subestimou em 7.9% e 18.6% a vazão média nas seções S₄ e S₅, resultando em uma subestimação da ordem de 11.9% entre as vazões residuais totais modeladas em relação às medidas.

Tabela 14: Comparação entre as vazões residuais obtidas a partir das medições com as resultantes da modelagem numérica, para as seções do Estreito de Breves (EB – S₆), Canal Sul (CS – S₅) e Canal Norte (CN – S₄).

Comparações entre as vazões residuais medidas e modeladas em um ciclo de maré						
Seções	Q _{medida} [m ³ /s]	(%)	Q _{modelada} [m ³ /s]	(%)	(Q _{medida} - Q _{modelada}) [m ³ /s]	e*(%)
CN (S ₄)	106136	39.5	97720	41.3	8416	7.9
CS (S ₅)	159689	59.5	130018	54.9	29671	18.6
EB (S ₆)	2767	1.0	8903	3.8	6136	68.9
Q _{total}	268592	100	236642	100	31951	11.9

e*(%) corresponde ao erro relativo da comparação entre os valores medidos e modelados.

Na Figura 66 as curvas das vazões modeladas são comparadas com as curvas extrapoladas a partir das parametrizações das curvas resultantes das medições. Em linhas contínuas são as curvas de vazões resultantes do modelo numérico (S₄, S₅ e S₆), em linhas tracejadas as curvas extrapoladas com base na parametrização dos dados medidos. Note-se que o eixo das abscissas varia de 12 em 12 horas, correspondendo há seis dias (de 21 a 26 de junho), período no qual foram feitas as medições durante a campanha de vazões na época de cheia do rio Amazonas, em junho de 2007.

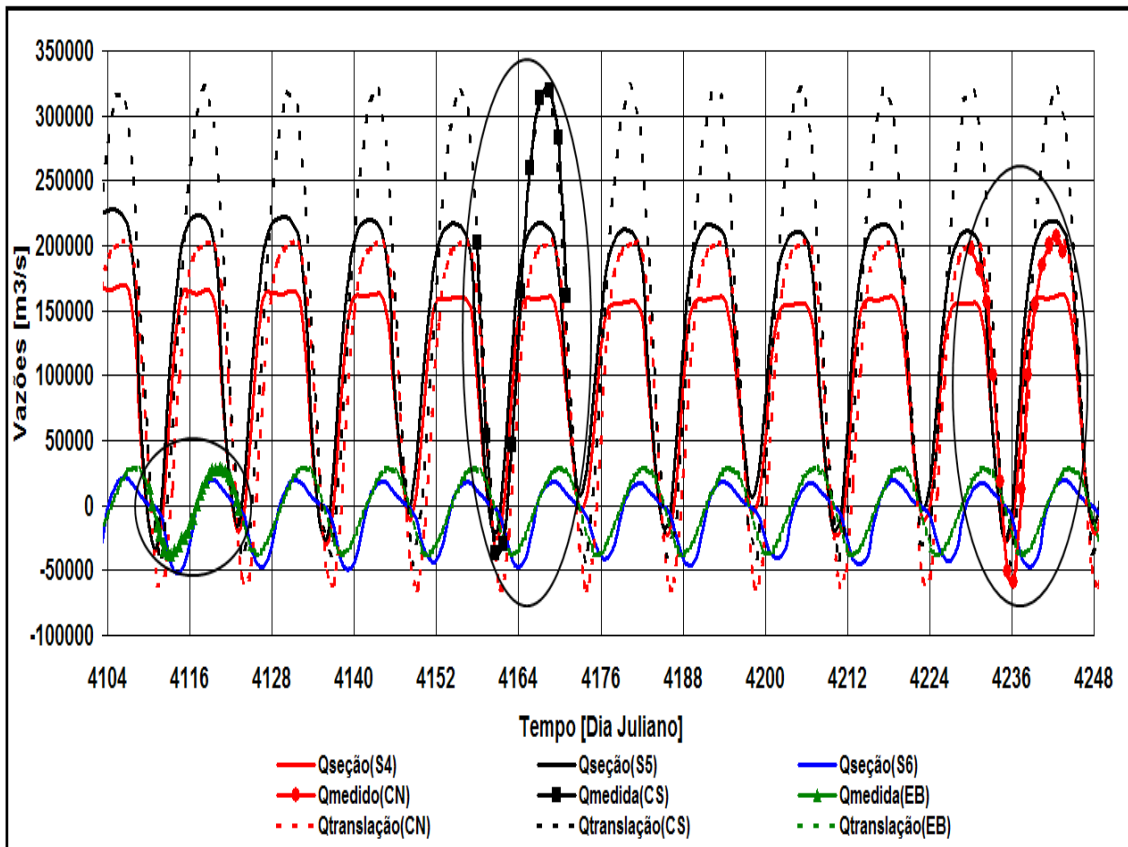


Figura 66: Comparação entre as curvas de vazões modeladas com a translação feita a partir dos dados medidos. Dentro das elipses é destacada a curva obtida a partir das vazões medidas em cada uma das seções durante a campanha realizada no período de cheia do rio Amazonas, em junho de 2007.

Na Figura 67, além das seções S_4 e S_5 para o período das medições, são mostradas as seções S_a e S_b logo à jusante. Como foi visto no cálculo da vazão residual, Tabela 13, o percentual de vazões ao longo dos canais norte e sul se mantém: S_4 : 39,5%, S_a : 39,1%, ao longo do Canal Norte e S_5 : 56,4% e S_b : 57% ao longo do Canal Sul. Porém, como pode ser visto na Figura 67, as vazões máximas de vazante são modificadas substancialmente, sendo comparáveis os valores observados em ambos os canais.

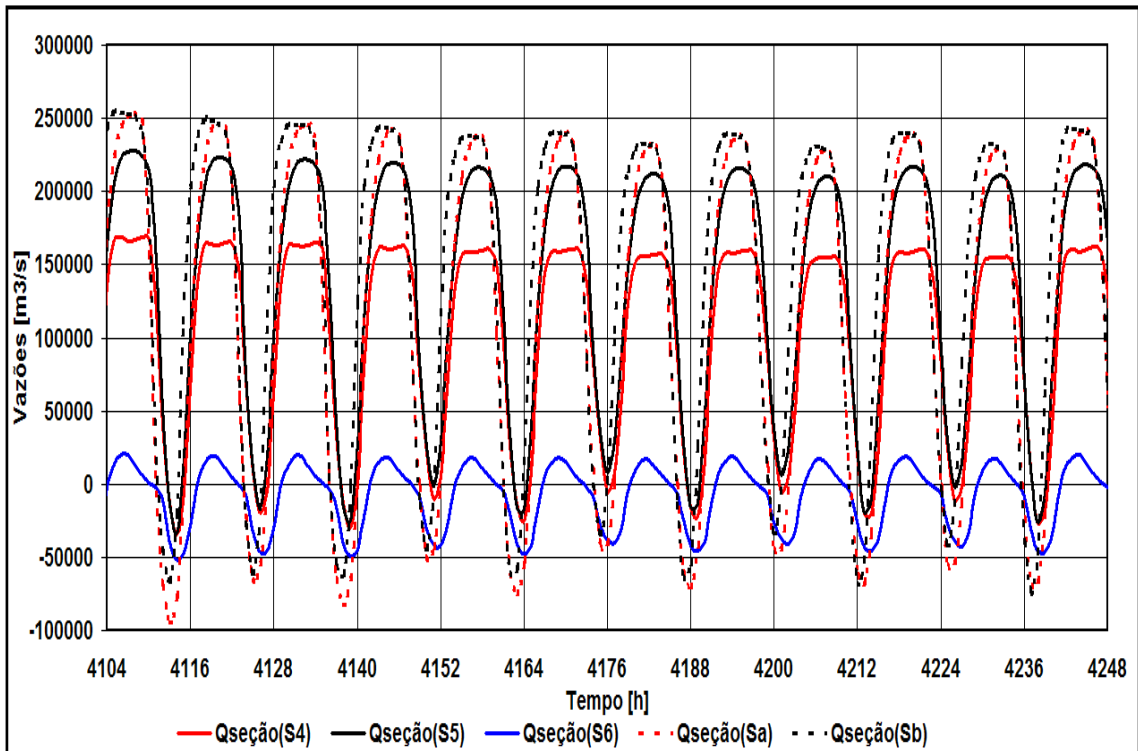


Figura 67: Evolução da distribuição da vazão fluvial nos principais canais do estuário do rio Amazonas durante o período de cheia, em que foram feitas as medições.

5.5.1. Distribuição da vazão nas seções durante os períodos de cheia e seca do rio Amazonas, para marés de sizígia e quadratura

5.5.1.1. Período de cheia

Para a análise dos resultados do modelo numérico no período de cheia, selecionou-se o intervalo de dias de 13 a 18 de junho de 2007 (39246 a 39252, equivalente em dias Juliano) com ocorrência de maré de sizígia e o intervalo de dias de 22 a 26 de junho de 2007 (39255 a 39261, equivalente em dias Juliano) em maré de quadratura. Estes períodos selecionados estão dentro da faixa de tempo em que ocorre o pico das máximas vazões na época de cheia e, de acordo com o hidrograma de vazões da ANA – Agência Nacional das Águas, a máxima vazão registrada foi nos dias 12 e 13 de junho de 2007, na ordem de $238 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ na estação de Óbidos. Também é preciso ressaltar que dentro desse período de dias selecionado não foram utilizadas todas as horas, pois o objetivo é verificar a distribuição dentro de um ciclo de maré (~13 horas), ou seja, a partir da curva de vazões dos dias escolhidos determinaram-se os pontos (horário) de vazão inicial e final de modo a fechar o ciclo.

A partir da Figura 68 até a Figura 70 são mostrados os períodos que foram utilizados nos cálculos das vazões médias para cada uma das seções, destacando o período de dias a partir do calendário Juliano e as condições de maré (Sizígia e Quadratura) em que foram feitos os cálculos, procurando destacar a influência da maré sobre a vazão fluvial. Note-se que há mudança de escala nas figuras citadas.

A Tabela 15 e a Tabela 16 mostram os resultados obtidos para a sizígia e quadratura, respectivamente, em valores percentuais da quantidade efetiva de vazão que passou em cada uma das seções analisadas para o período de cheia escolhido.

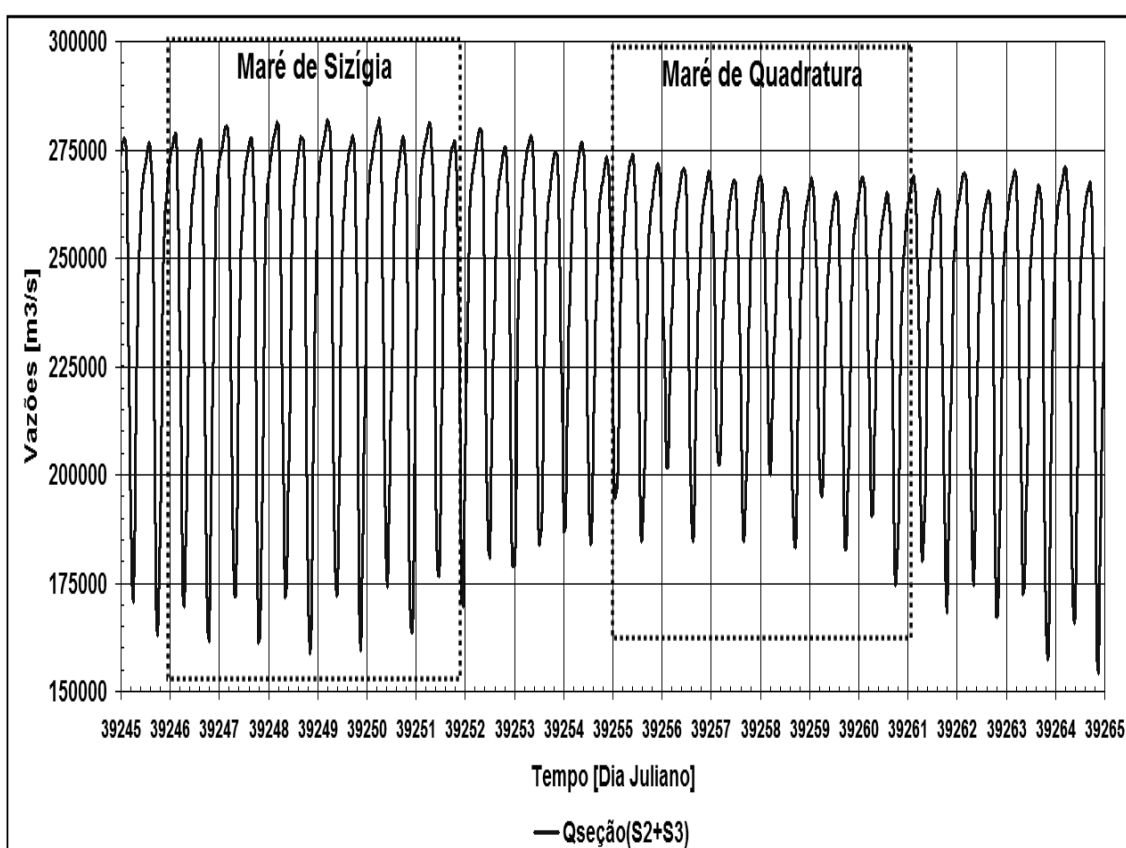


Figura 68: Gráfico da curva de vazão com destaque dos intervalos de tempo utilizados na análise de distribuição da vazão nas seções S_2 e S_3 , durante marés de sizígia e quadratura, no período de cheia.

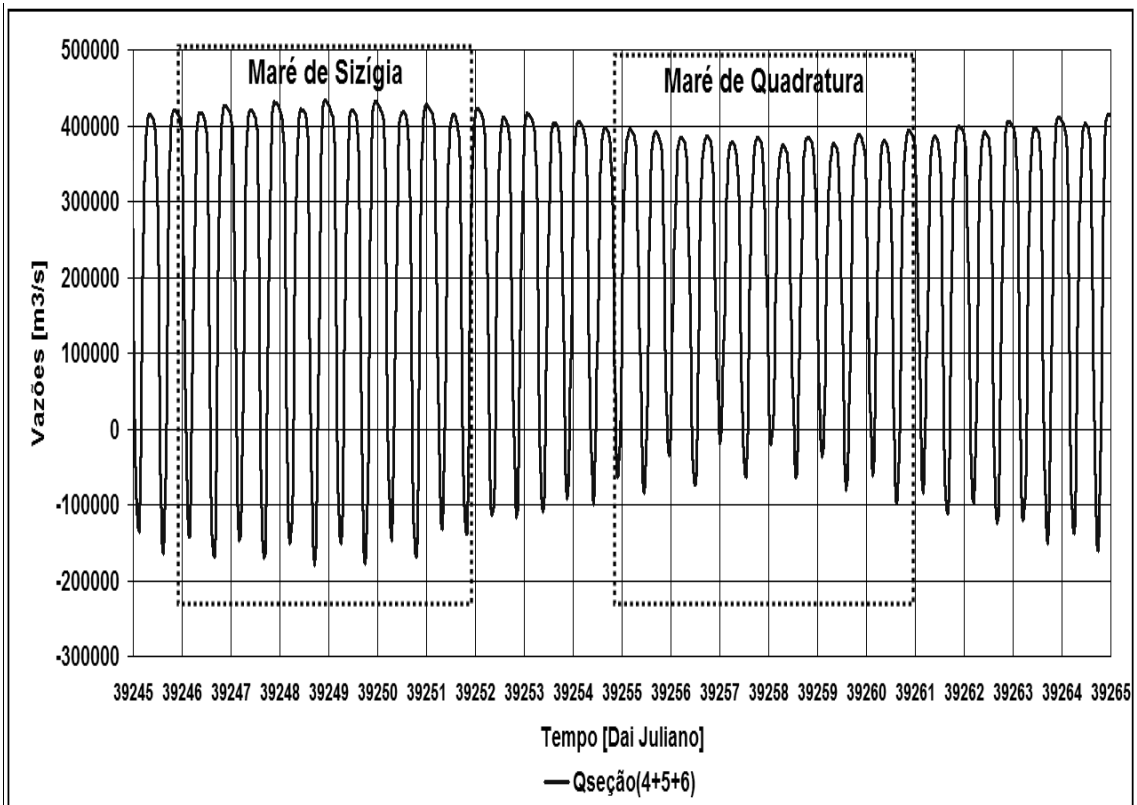


Figura 69: Gráfico da curva de vazão com destaque dos intervalos de tempo utilizados na análise de distribuição da vazão nas seções S_4 , S_5 e S_6 , durante marés de sizígia e quadratura.

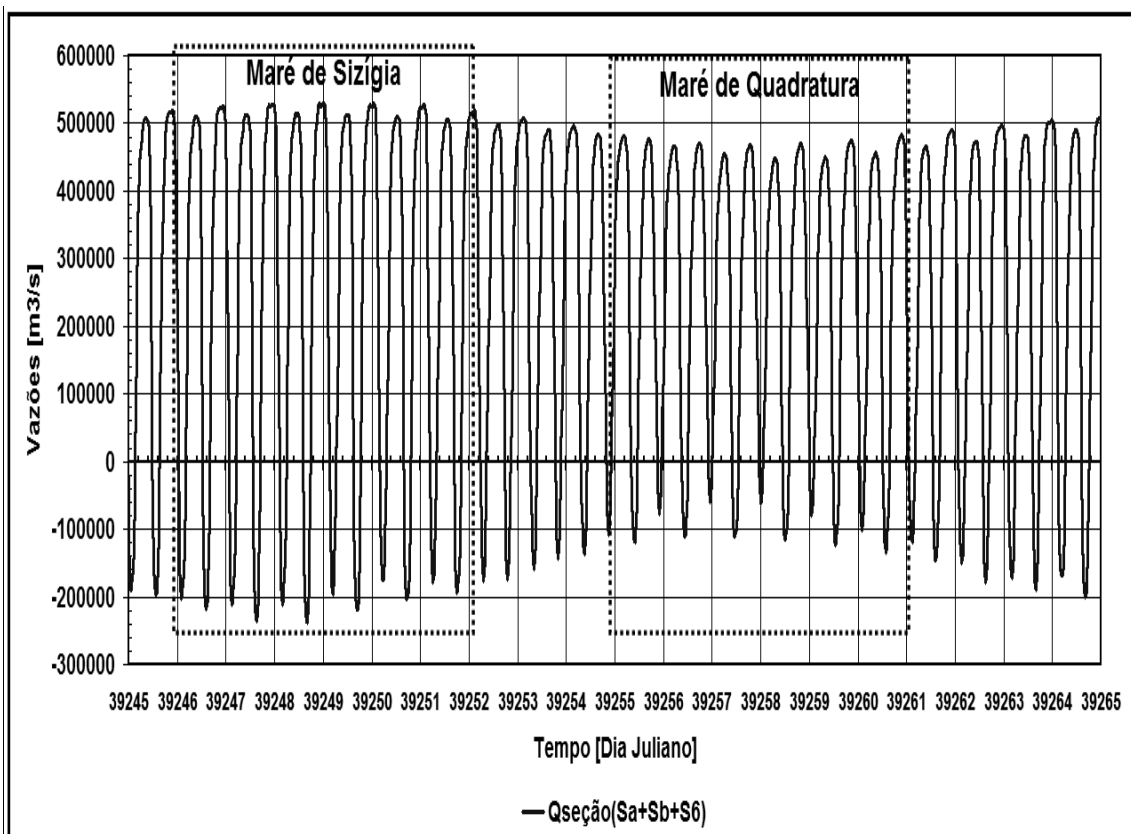


Figura 70: Gráfico da curva de vazão com destaque dos intervalos de tempo utilizados na análise de distribuição da vazão nas seções S_a , S_b , S_6 , durante marés de SIZÍGIA e QUADRATURA.

Tabela 15: Vazões médias durante maré de SIZÍGIA para a época de cheia do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das seções, os principais rios e a soma com a vazão média de Óbidos, a diferença da vazão que entrou no modelo e a que passou pelas seções. Na quinta coluna os valores médios da soma das vazões e o erro relativo.

<i>Seções</i>	<i>Q_{média} [m³/s]</i>	<i>Q_{Óbidos+tributários}</i>	<i>Soma das Seções</i>	<i>Q_{média} [m³/s]</i>
<i>Q_{Óbido}</i>	237101	100%	<i>S₂+S₃</i>	241583
<i>S₀</i>	32084	98%	<i>S₄+S₅+S₆</i>	232456
<i>S₁</i>	237625	96%	<i>S_a+S_b+S₆</i>	243006
<i>S₂</i>	86291	35,7%	RIOS	Q_{média} [m³/s]
<i>S₃</i>	155292	64,3%	<i>Tapajós</i>	11000
<i>S₄</i>	93619	40,3%	<i>Xingu</i>	9000
<i>S₅</i>	128325	55,2%		
<i>S₆</i>	10511	4,5%	Soma (Q_{rio}+Q_{Óbidos})	Q_{média} [m³/s]
<i>S_a</i>	92462	38,7%	<i>Q_{Óbidos} + Tapajós</i>	248101
<i>S_b</i>	142284	57%	<i>Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu</i>	257101
<i>S_a</i>	93879	4,3%		
CÁLCULOS			Resultado [m³/s]	Erro relativo (%)
<i>Q_{Óbidos} - S₀</i>			5017	2.0
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós) - S₁</i>			10475	4.0
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu) - (S₂+S₃)</i>			15517	6.0
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu) - (S₄+S₅+S₆)</i>			24645	9.6
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu) - (S_a+S_b+S₆)</i>			11843	4.6

Tabela 16: Vazões médias durante maré de QUADRATURA para a época de cheia do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das seções, os principais rios e a soma com a vazão média de Óbidos, a diferença da vazão que entrou no modelo e a que passou pelas seções. Na quinta coluna os valores médios da soma das vazões e o erro relativo.

<i>Seções</i>	<i>Q_{média} [m³/s]</i>	<i>Q_{Óbidos+tributários}</i>	<i>Soma das Seções</i>	<i>Q_{média} [m³/s]</i>
<i>Q_{Óbidos}</i>	233994	100%	<i>S₂+S₃</i>	239681
<i>S₀</i>	228997	98%	<i>S₄+S₅+S₆</i>	231429
<i>S₁</i>	235745	96,4%	<i>S_a+S_b+S₆</i>	247191
<i>S₂</i>	85445	35,6%	RIOS	Q_{média} [m³/s]
<i>S₃</i>	154235 x	35,6%	<i>Tapajós</i>	11000
<i>S₄</i>	96056	41,5%	<i>Xingu</i>	9000
<i>S₅</i>	127525	55,5%		
<i>S₆</i>	7847	3%	Soma (Q_{rio}+Q_{Óbidos})	Q_{média} [m³/s]
<i>S_a</i>	105767	43%	<i>Q_{Óbidos} + Tapajós</i>	244994
<i>S_b</i>	133587	54%	<i>Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu</i>	253994
<i>S₆</i>	7847	3%		
CÁLCULOS			Resultado [m³/s]	Erro relativo (%)
<i>Q_{Óbidos} - S₀</i>			4997	2.0
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós) - S₁</i>			9248	3.8
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu) - (S₂+S₃)</i>			14313	5.6
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu) - (S₄+S₅+S₆)</i>			22565	8.9
<i>(Q_{Óbidos} + Tapajós+Xingu) - (S_a+S_b+S₆)</i>			6803	2.7

5.5.1.2. Período de seca

Para as análises da distribuição da vazão fluvial através das seções adotadas no modelo numérico durante o período de seca foi escolhido o intervalo de dias que vai de 24 a 28 de outubro de 2007 (39379 a 39384 em dias Juliano), com ocorrência de maré de sizígia, e o intervalo de 01 a 05 de novembro de 2007 (39387 a 39392 em dias Juliano), para maré de quadratura.

A partir da Figura 71 até a Figura 73 são mostrados os períodos que foram utilizados nos cálculos das vazões médias para cada uma das seções, destacando o período de dias e as condições de maré (sizígia e quadratura) em que foram feitos os cálculos, procurando destacar a influência da maré sobre a vazão fluvial. Note-se que há mudança de escala nas figuras citadas.

Os resultados apresentados na Tabela 17 são provenientes das análises para o intervalo de dias escolhidos que compreendem a ocorrência de maré de sizígia, enquanto que os resultados apresentados na Tabela 18 correspondem à maré de quadratura, ambos durante o período de seca.

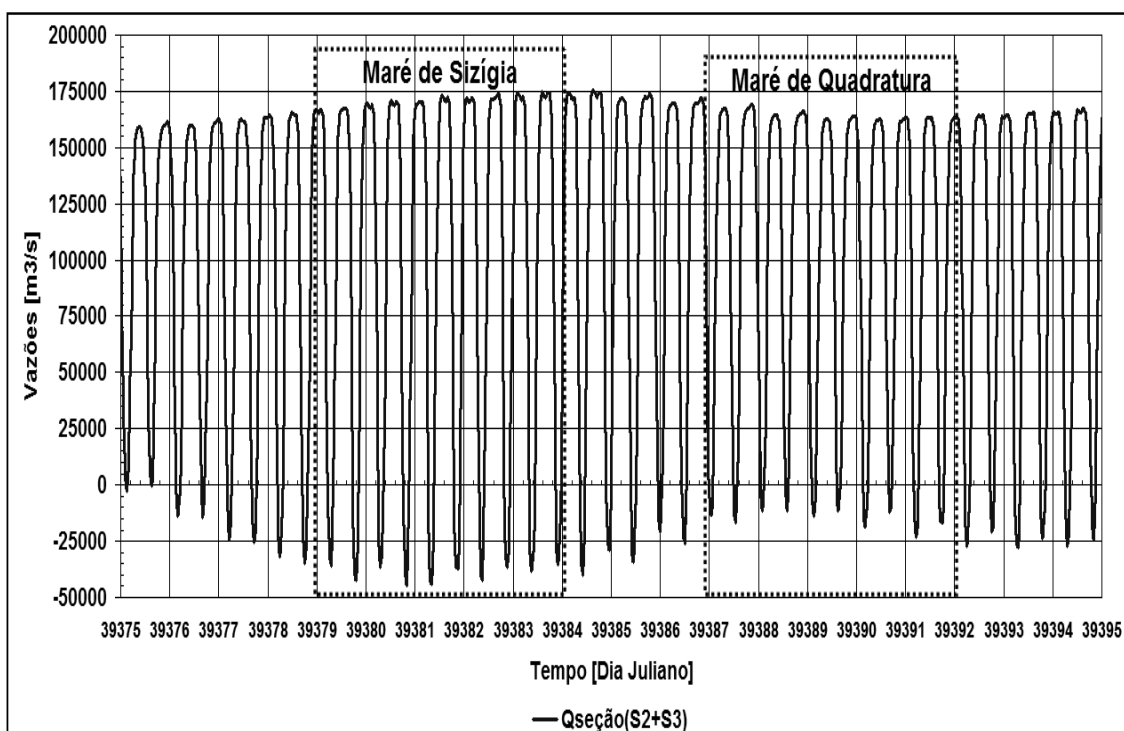


Figura 71: Curva de vazões com destaque para o período em que ocorre maré de sizígia e quadratura, durante a época de seca do rio Amazonas.

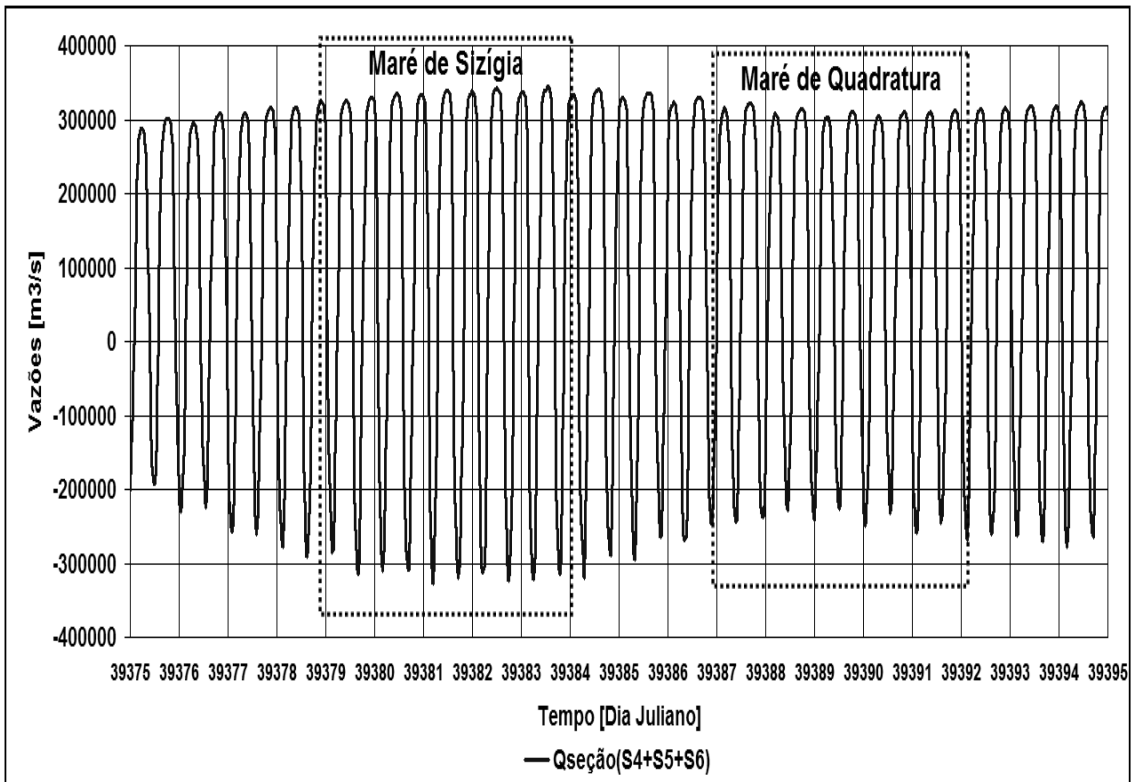


Figura 72: Curva de vazões com destaque para o período em que ocorre maré de sizigia e quadratura, durante a época de seca do rio Amazonas.

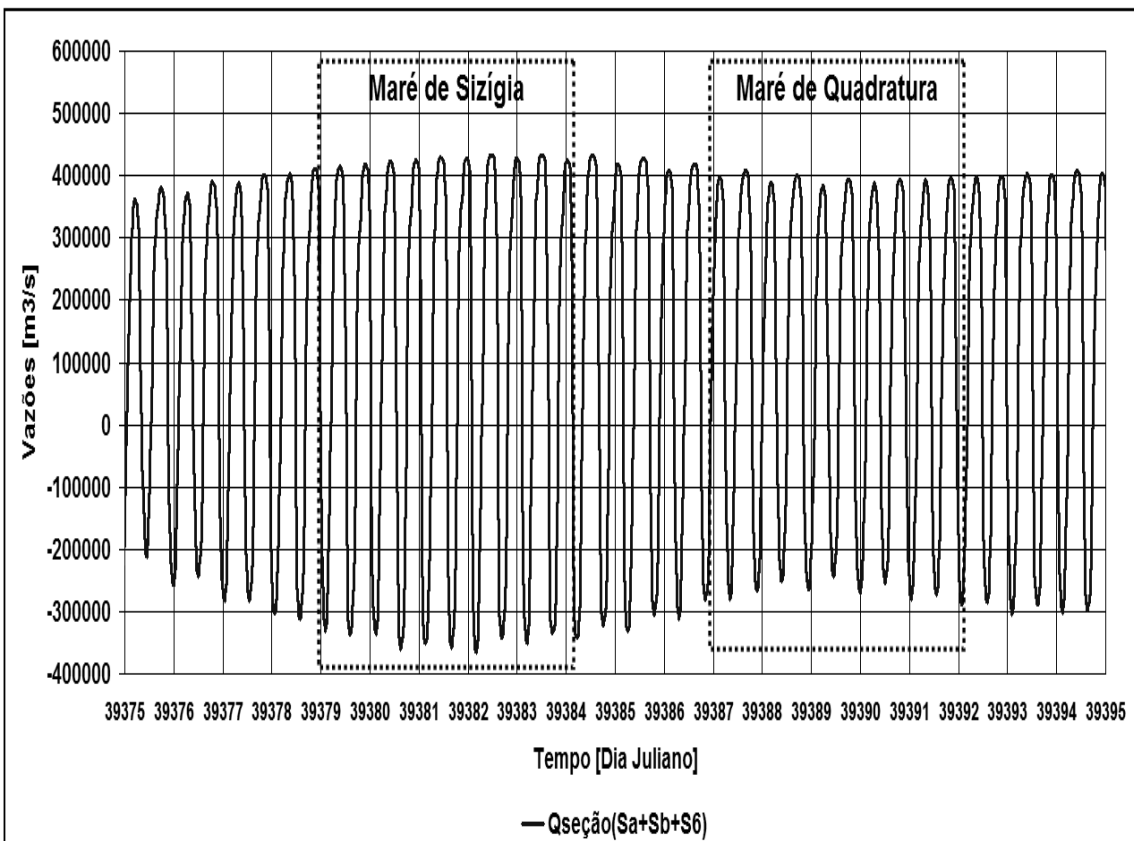


Figura 73: Curva de vazões com destaque para o período em que ocorre maré de sizigia e quadratura, durante a época de seca do rio amazonas.

Tabela 17: Vazões médias durante maré de SIZÍGIA para a época de seca do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das seções, os principais rios e a soma com a vazão média de Óbidos, a diferença da vazão que entrou no modelo e a que passou pelas seções. Na quinta coluna os valores médios da soma das vazões e o erro relativo.

Seções	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$	$Q_{\u00d3bidos+tribut\u00e1rios}$	Soma das Seções	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$
$Q_{\u00d3bidos}$	94171	100%	S_2+S_3	98493
S_0	90791	96,4%	$S_4+S_5+S_6$	88985
S_1	93744	89,7%	$S_a+S_b+S_6$	100033
S_2	32741	32,9%	RIOS	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$
S_3	65752	67,1%	Tapaj\u00f3s	11000
S_4	32076	36%	Xingu	9000
S_5	50777	57%		
S_6	6131	7%	Soma ($Q_{rio}+Q_{\u00d3bidos}$)	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$
S_a	32016	27,7%	$Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s$	105171
S_b	61885	65,7%	$Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu$	114171
S_6	6131	6,6%		
C\u00c1LCULOS			Resultado [m^3/s]	Erro relativo (%)
$Q_{\u00d3bidos} - S_0$			3380	3.6
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s) - S_1$			11427	10.9
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu) - (S_2+S_3)$			15678	13.7
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu) - (S_4+S_5+S_6)$			25186	22.0
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu) - (S_a+S_b+S_6)$			14138	12.0

Tabela 18: Vaz\u00f5es m\u00e9dias durante mar\u00e9 de QUADRATURA para a \u00e9poca de seca do rio Amazonas em 2007. Na quarta coluna a soma das se\u00e7\u00f5es, os principais rios e a soma com a vaz\u00e3o m\u00e9dia de \u00d3bidos, a diferen\u00e7a da vaz\u00e3o que entrou no modelo e a que passou pelas se\u00e7\u00f5es. Na quinta coluna os valores m\u00e9dios da soma das vaz\u00f5es e o erro relativo.

Se\u00e7\u00f5es	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$	$Q_{\u00d3bidos+tribut\u00e1rios}$	Soma das Se\u00e7\u00f5es	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$
$Q_{\u00d3bidos}$	93803	100%	S_2+S_3	101869
S_0	91012	97%	$S_4+S_5+S_6$	105715
S_1	96164	92,5%	$S_a+S_b+S_6$	112319
S_2	33806	33,5%	RIOS	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$
S_3	68063	66,5%	Tapaj\u00f3s	11000
S_4	41169	39%	Xingu	9000
S_5	60245	58%		
S_6	4305	3%	Soma ($Q_{rio}+Q_{\u00d3bidos}$)	$Q_{m\u00e9dia} [m^3/s]$
S_a	43917	39,5%	$Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s$	104803.68
S_b	64097	57,5%	$Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu$	113803.68
S_6	4305	3%		
C\u00c1LCULOS			Resultado [m^3/s]	Erro relativo (%)
$Q_{\u00d3bidos} - S_0$			2792	3
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s) - S_1$			8639	8.3
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu) - (S_2+S_3)$			11934	10.5
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu) - (S_4+S_5+S_6)$			8088	7
$(Q_{\u00d3bidos} + Tapaj\u00f3s+Xingu) - (S_a+S_b+S_6)$			1484	1.3

5.6. Comportamento das vazões e os níveis nas seções analisadas durante o ciclo de maré para as situações de cheia e seca, nas marés de sizígia.

A Figura 74 e a Figura 75 mostram a evolução dos níveis d'água ao longo dos braços norte e sul, respectivamente, para as situações de cheia e seca do rio na ocorrência de maré de sizígia.

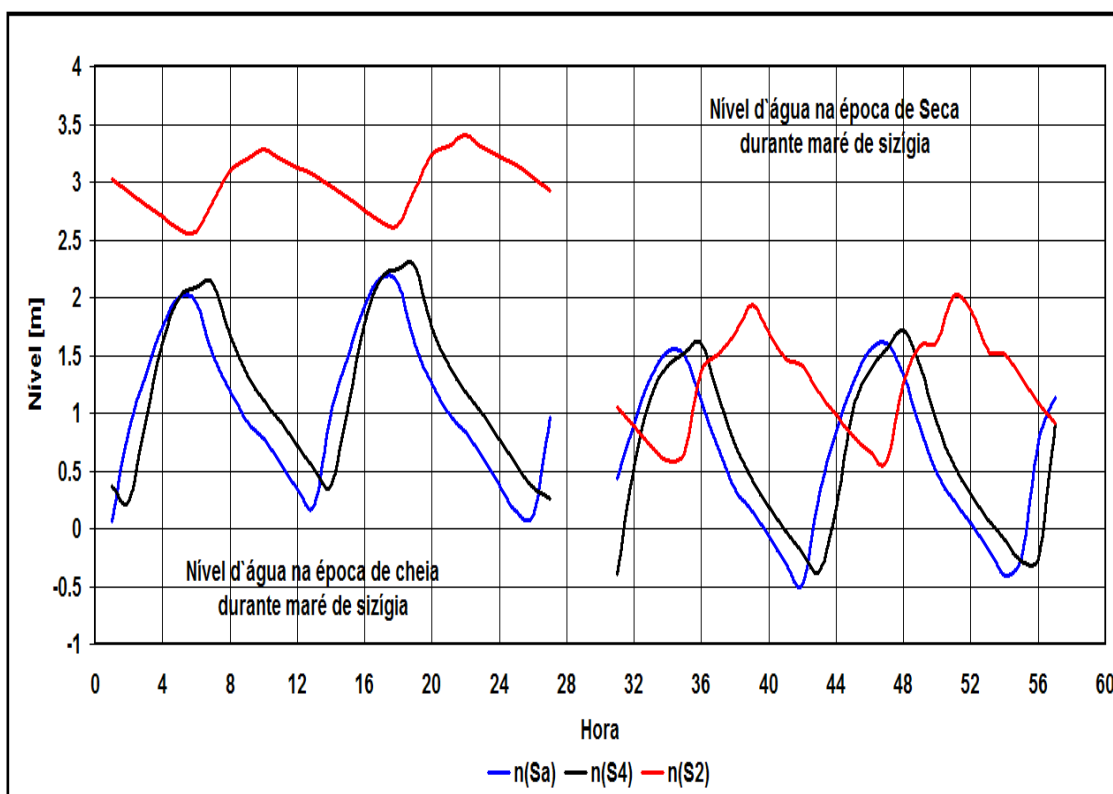


Figura 74: Variação das curvas de níveis ao longo do Braço NORTE, para a época de cheia e seca em maré de sizígia, sendo que $n(S_a)$, $n(S_4)$ e $n(S_2)$ são as variações do nível d'água nas respectivas seções.

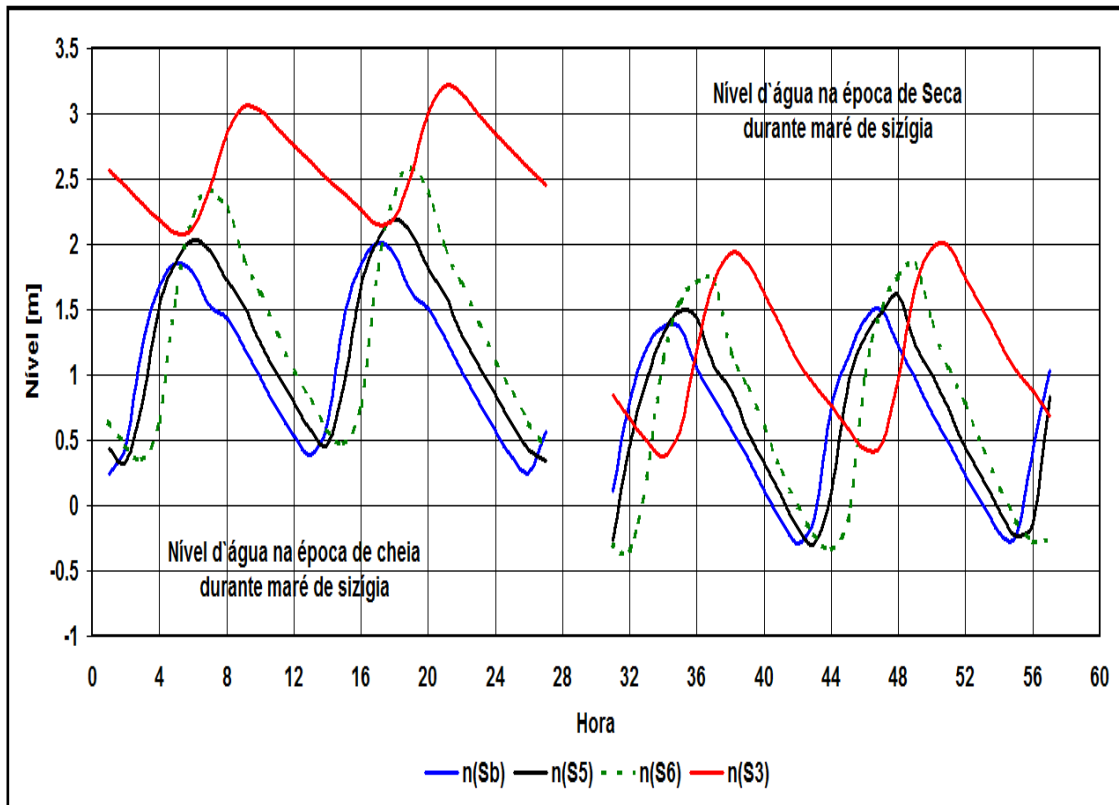


Figura 75: Variação das curvas de níveis ao longo do Braço SUL, para a época de cheia e seca em maré de sizígia, sendo que $n(Sa)$, $n(S_4)$ e $n(S_2)$ são as variações do nível d'água nas respectivas seções.

Para a comparação em mais detalhe das vazões e sua distribuição ao longo do estuário, foram escolhidos dois períodos com 4 ciclos, durante a época de cheia e seca em maré de sizígia. A convenção usada é que vazões positivas indicam fluxo na direção de maré vazante, e os valores negativos indicam fluxo de maré enchente. Para a cheia o intervalo vai do dia 14 a 16 de junho de 2007, o equivalente em horas ao intervalo iniciando na hora 3936 até a hora 3988. E para o período de seca o intervalo de dias escolhido vai de 24 a 27 de outubro de 2007, ou seja, da hora 7104 até à hora 7156. Os gráficos correspondentes às vazões e níveis d'água desses dois períodos analisados em época de cheia e seca para as seções do modelo numérico podem ser vistos da Figura 76 até a Figura 81, enquanto que as mesmas informações são apresentadas da Figura 82 à Figura 84 numa única figura para cheia e seca ao longo de apenas dois ciclos de maré.

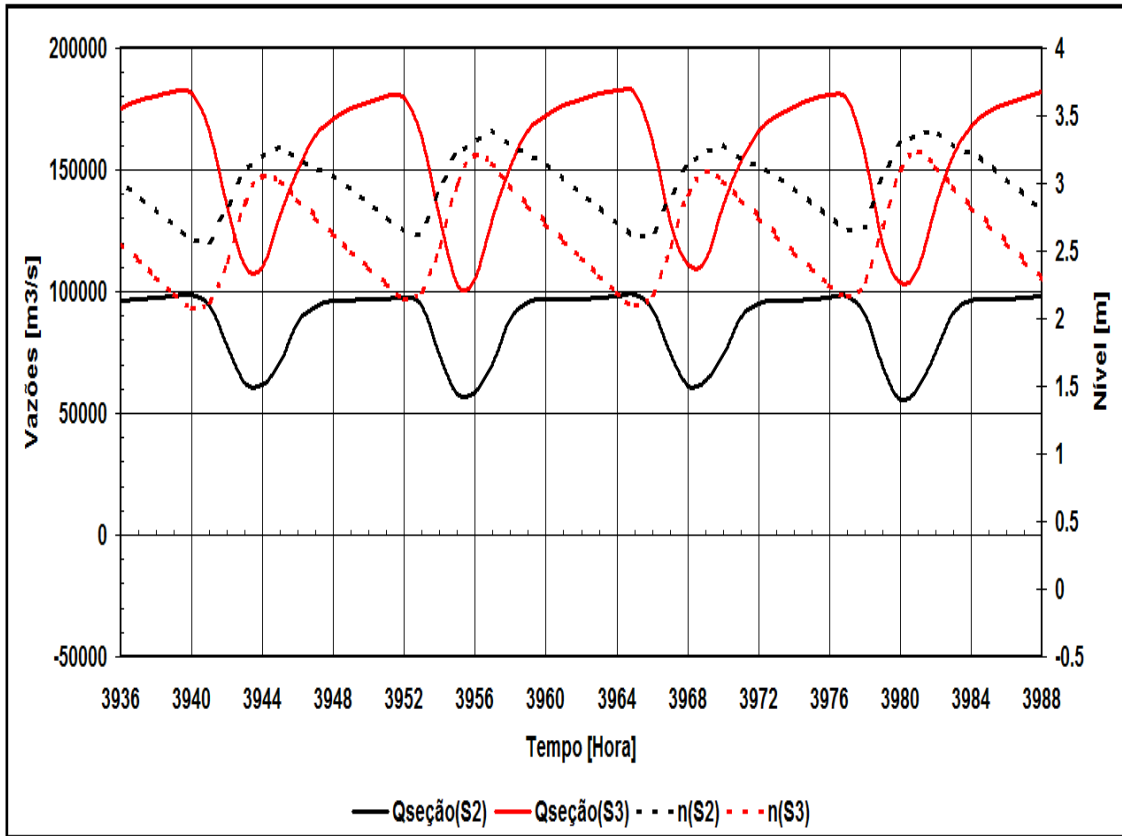


Figura 76: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de cheia no mês de junho de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_2 e S_3 .

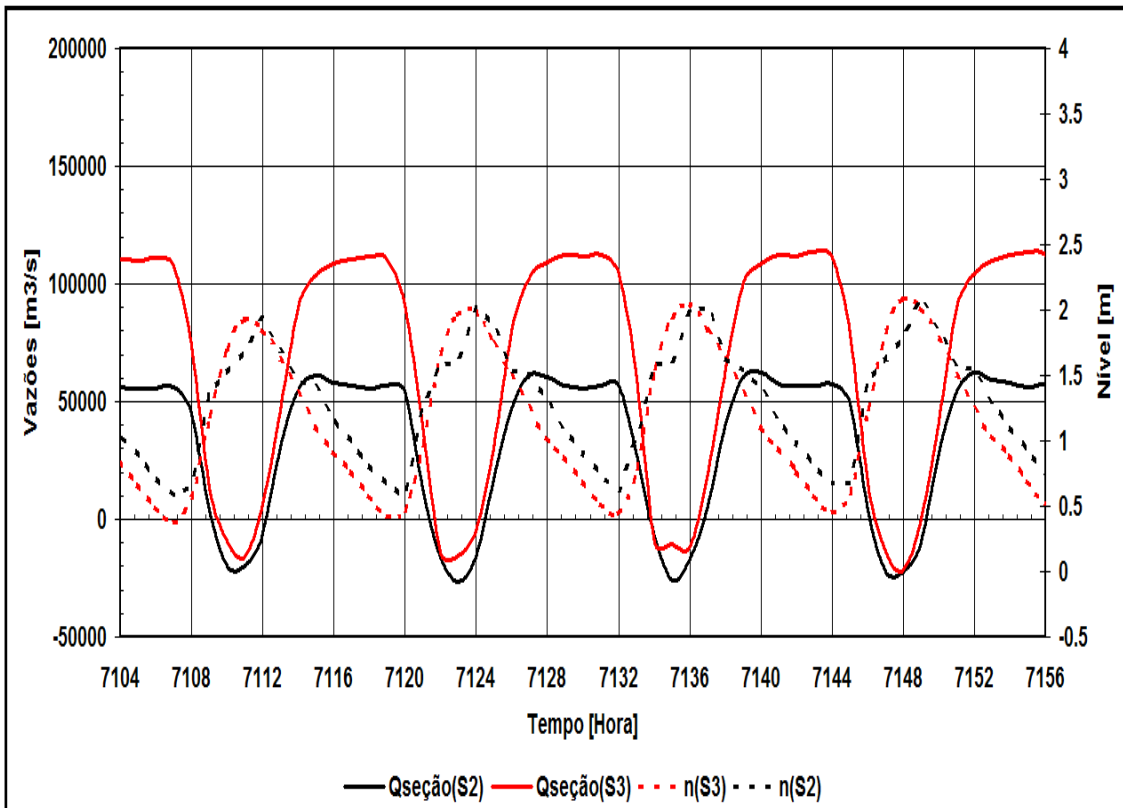


Figura 77: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de seca no mês de outubro de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_2 e S_3 .

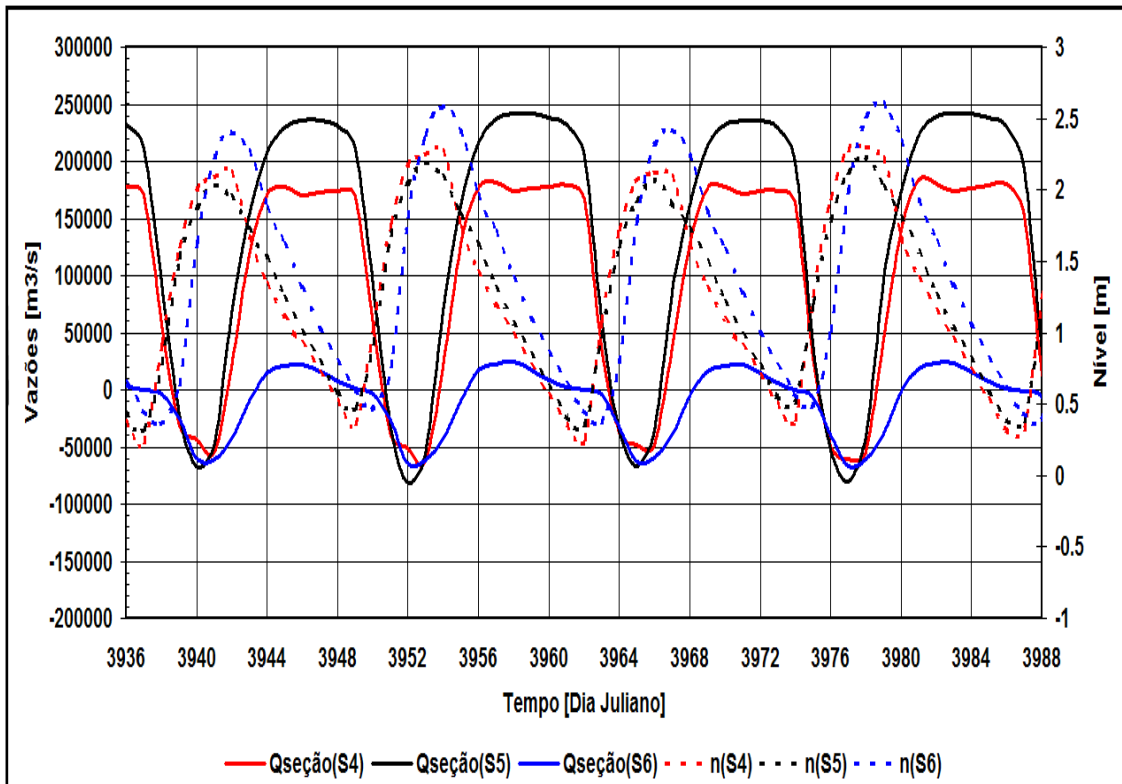


Figura 78: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de cheia no mês de junho de 2007, em maré de sizígia, nas seções S₄, S₅ e S₆.

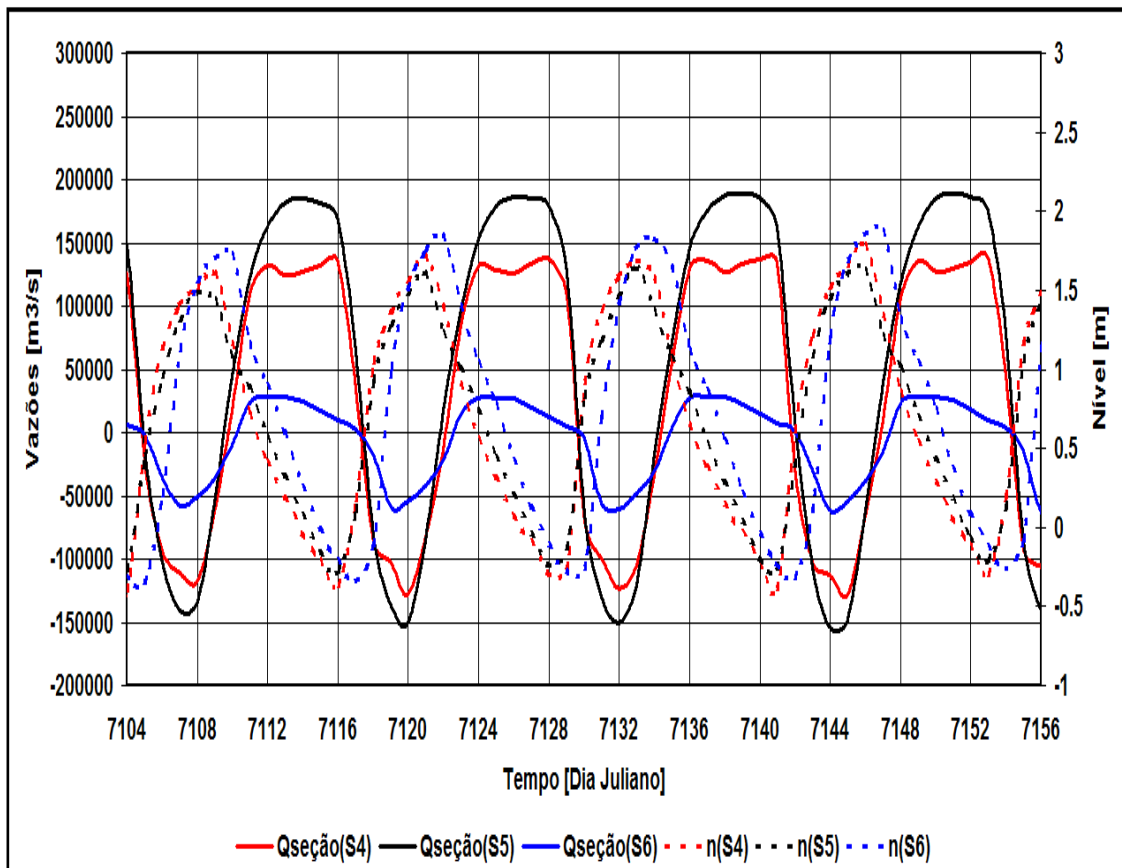


Figura 79: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de seca no mês de outubro de 2007, em maré de sizígia, nas seções S₄, S₅ e S₆.

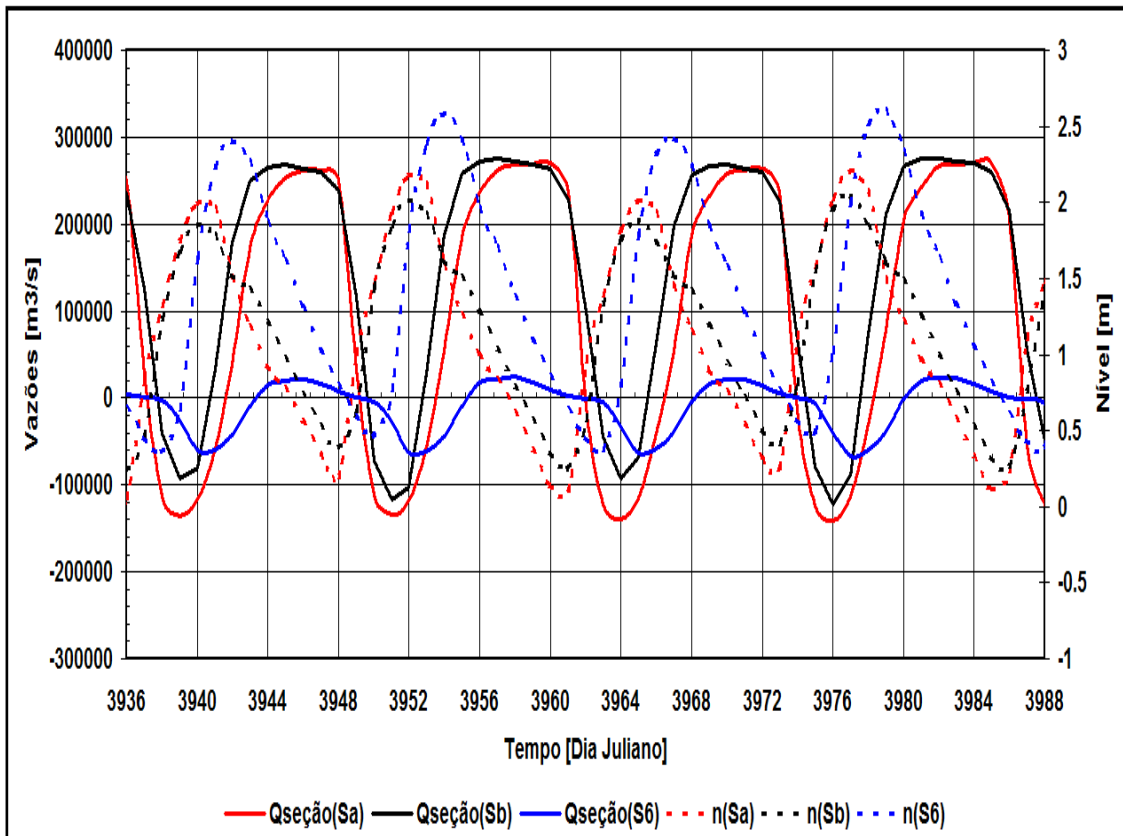


Figura 80: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de cheia no mês de junho de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_a , S_b e S_6 .

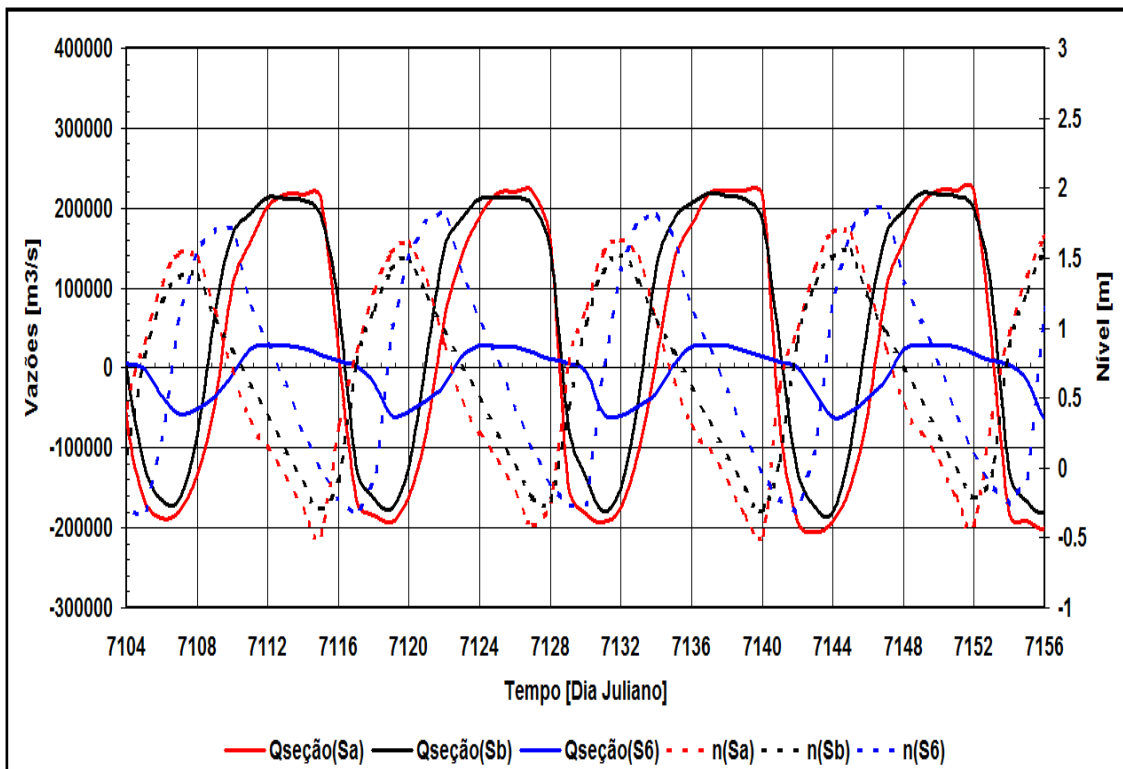


Figura 81: Comportamento da curva de vazão e do nível d'água durante a época de seca no mês de outubro de 2007, em maré de sizígia, nas seções S_a , S_b e S_6 .

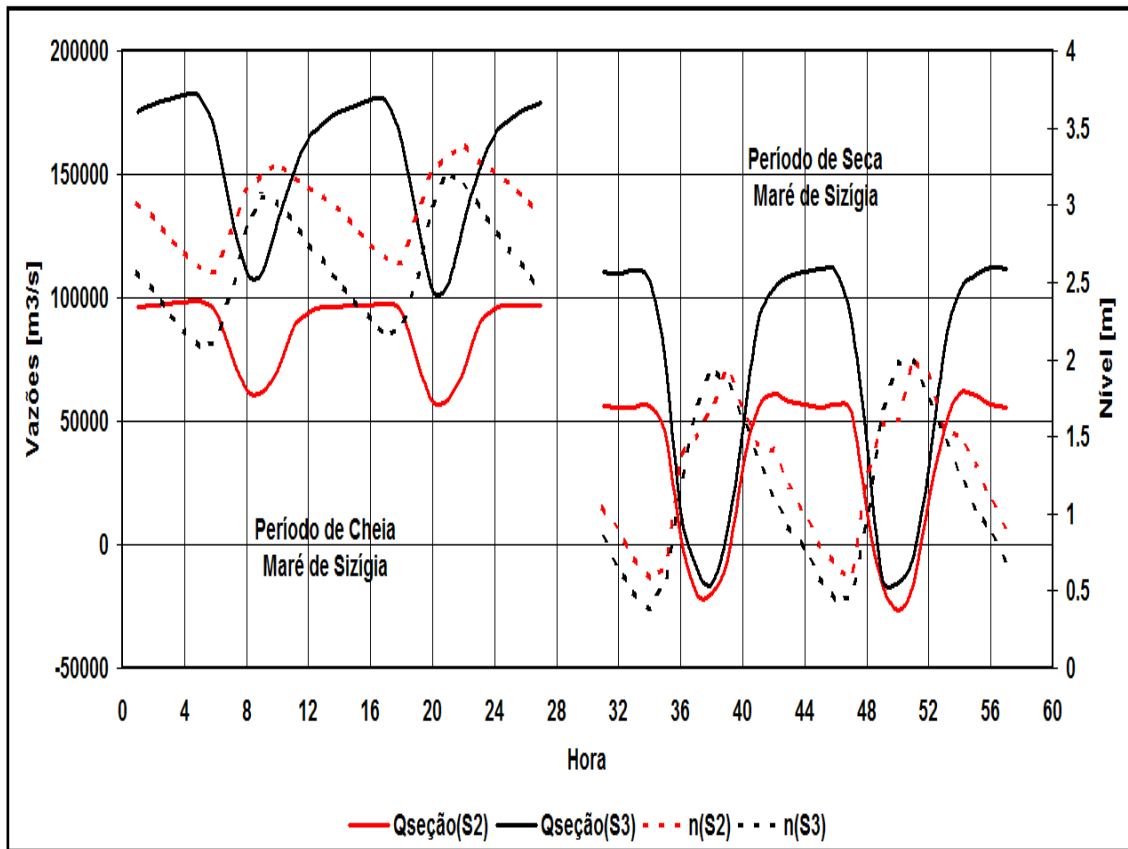


Figura 82: Comparação entre as curvas de vazões e a variação dos níveis para as seções S_2 e S_3 durante os períodos de cheia em maré de quadratura e seca em maré de sizigia, para o ano de 2007.

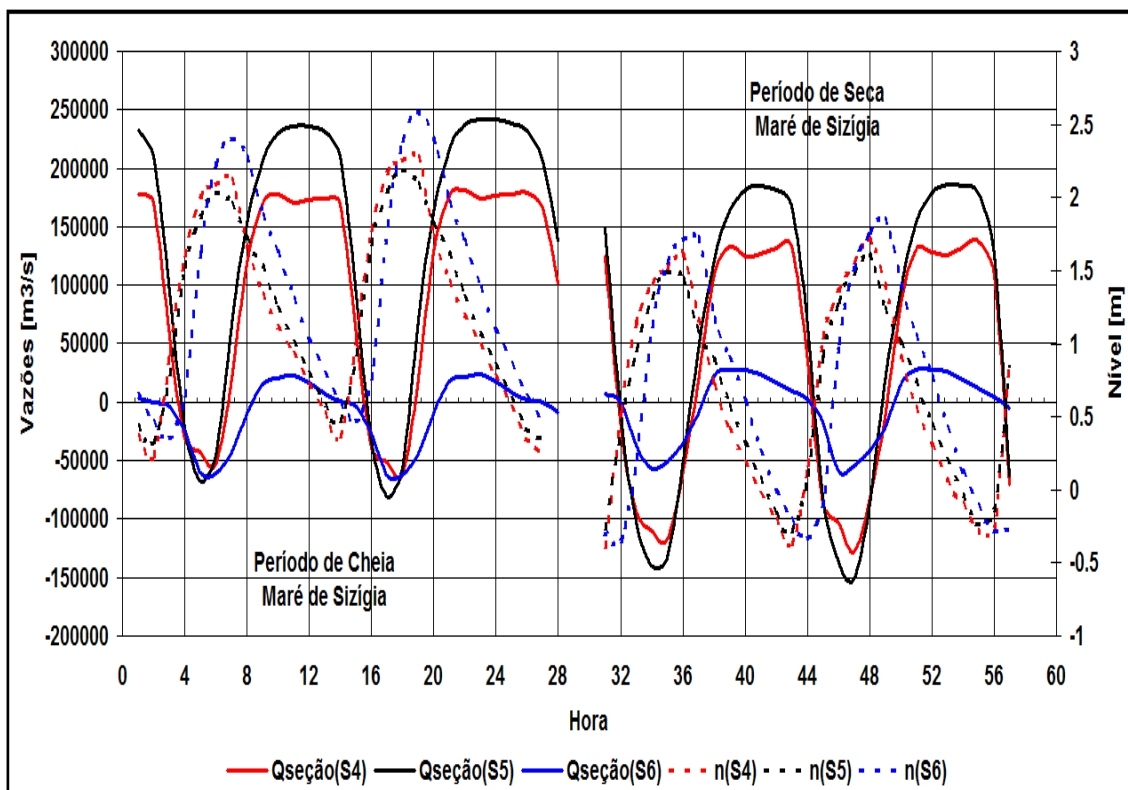


Figura 83: Comparação entre as curvas de vazões e a variação dos níveis para as seções S_4 , S_5 e S_6 durante os períodos de cheia em maré de quadratura e seca em maré de sizigia, para o ano de 2007.

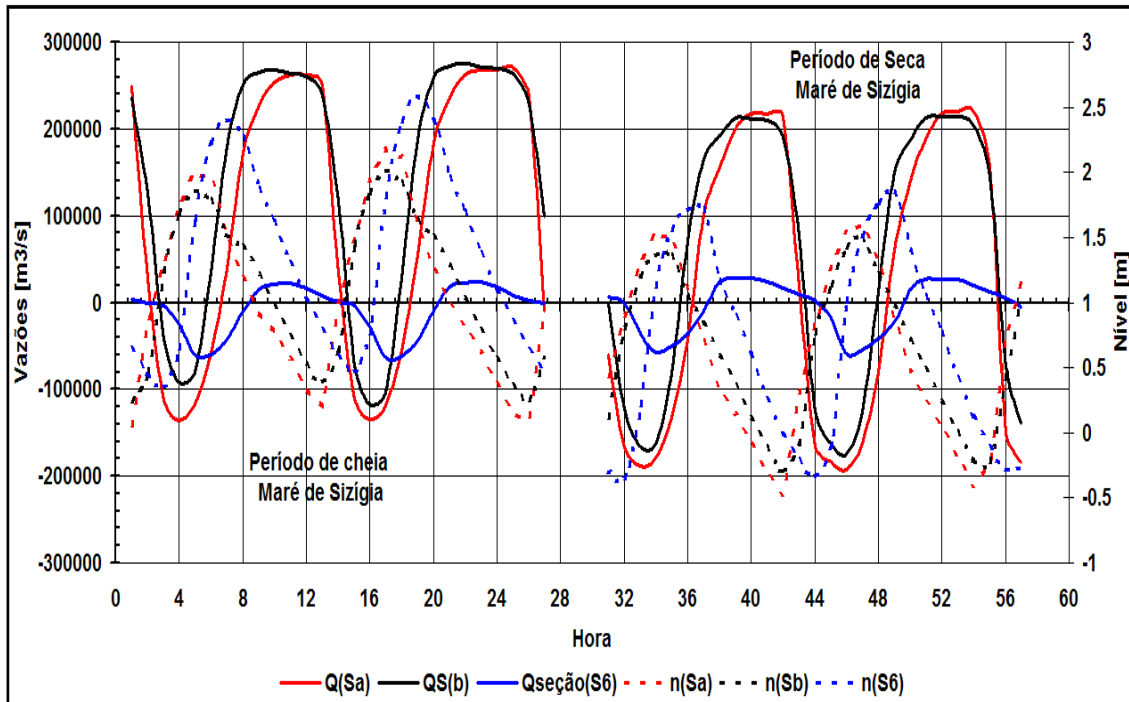


Figura 84: Comparação das curvas de vazões entre o período de cheia e seca e da variação do nível das seções Sa e Sb, na foz do estuário do rio Amazonas em maré de sizígia, para o ano de 2007.

Nas figuras mostradas acima podemos fazer as seguintes observações:

A Figura 74 e a Figura 75 mostram a evolução dos níveis d'água ao longo dos braços Norte e Sul nos períodos em época de cheia e seca na ocorrência de maré de sizígia. Observa-se a diminuição do nível médio de montante para jusante. A amplitude da maré é amplificada à medida que se aproxima da foz em direção a Macapá (S₄ e S₅, S_a e S_b) e logo amortecida na sua propagação posterior (S₂ e S₃). Observa-se diferença de fase de mais ou menos 1h entre as seções do braço norte S_a com a S₄ e do braço sul S_b e S₅.

A Figura 76 (período de cheia), Figura 77 (período de seca) e Figura 82 (períodos cheia e seca), mostra como se comportam as curvas de vazões e a variação dos níveis d'água nas seções S₂ e S₃, observa-se que a amplitude da curva de vazão e dos níveis é maior na S₃, no braço sul, tanto na cheia quanto na seca. Já nas seções S₄ e S₅, (figuras 78, 79 e 83) logo à jusante, as amplitudes dos hidrogramas continuam maiores no braço sul, porém as amplitudes dos níveis são menores neste local. Já nas seções S_a e S_b (figuras 80, 81 e 84) as amplitudes do hidrograma acompanham as amplitudes de nível, porém com ambas as amplitudes agora sendo maiores no braço norte.

A partir das curvas de vazões mostradas da Figura 78 até a Figura 81, nota-se que a mudança de enchente para vazante ocorre primeiramente no braço sul (S_b e S_5), sendo que a mudança de vazante para enchente ocorre depois, estendendo o período de vazante, especialmente nas últimas seções consideradas, onde os picos de vazões em ambos os braços são semelhantes. Como consequência, as vazões residuais observadas são maiores no braço sul.

Com relação à seção S_6 é interessante destacar o comportamento do hidrograma comparado com o hidrograma correspondente das seções S_4 e S_5 , S_a e S_b . A enchente nestas últimas seções ocorre num período curto, se assemelhando ao período de vazante na seção S_6 , enquanto que a enchente nesta seção acompanha o longo período de vazante das seções dos braços principais norte e sul.

A altura média da amplitude das curvas de vazões e de níveis no período de seca em maré de sizígia foi inferior aos do período de cheia. A defasagem observada entre as curvas no período de cheia em maré de sizígia é maior que as do período de seca, isto sugere que a corrente de vazante é mais rápida na seca e, portanto, mais intensa que a corrente de maré de enchente, sugerindo, assim, que o sistema é dominado por correntes de maré vazante.

A Figura 85 mostra o histograma da distribuição das vazões, feito a partir dos resultados das tabelas 15, 16, 17 e 18, onde constam os resultados analisados para a época de cheia e seca em maré de sizígia e quadratura, para um ciclo de aproximadamente seis dias. Observa-se que:

1. Há uma significativa diferença de vazões em geral entre os canais localizados nos braços norte e sul, com maiores vazões escoando pelo braço sul. A vazão ao longo do braço norte variou de 32% a 43% do total;
2. Para a mesma condição de maré, a proporção da vazão no Canal Norte é menor durante a seca, em relação à vazão no seu correspondente, o braço sul;
3. Tanto na cheia quanto na seca a maré de quadratura provoca um aumento da proporção da vazão escoando pelo braço norte;
4. A variabilidade da distribuição de vazões aumenta em direção à foz.

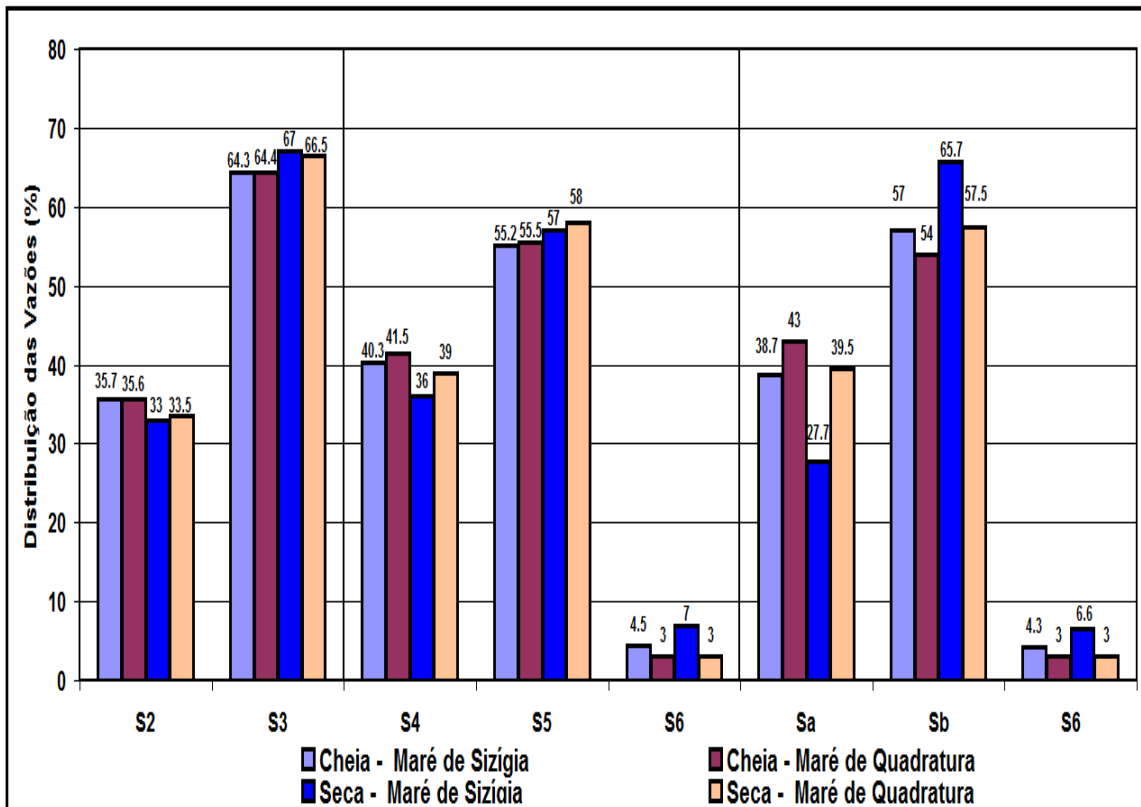


Figura 85: Histograma da distribuição da vazão fluvial nas seções escolhidas no modelo numérico as quais foram analisadas durante os períodos de cheia e seca, respectivamente, em maré de sizígia e quadratura.

6. CONCLUSÕES

6.1. Medições realizadas com Perfilador Acústico – ADCP

Considerando as peculiaridades da medição de vazão sob influência de maré e as grandes extensões dos canais do rio Amazonas em sua foz (aproximadamente 2,3 km – EB; 12,2 km – CS e 11,9 km – CN), os métodos tradicionais de medição de vazão não se aplicam para medição de vazão nesta situação. A medição da vazão do Amazonas em sua foz somente foi possível a partir da disponibilidade de equipamentos de medição de vazão por Efeito Doppler, devido à redução drástica do tempo necessário para a medição. Devido ao efeito da maré, para determinação da vazão residual é necessária a medição contínua da vazão durante um ciclo de maré. Para o tratamento dos dados de vazões, foram usados três métodos.

✓ Com a finalidade de melhorar o processo de integração no ciclo da maré foi realizada uma interpolação de valores na curva dos dados medidos em intervalos variando de 15 em 15 minutos, sendo que este foi considerado o método mais acurado. A partir deste determinou-se o valor da vazão residual do rio Amazonas: na cheia em 2007 e em maré de quadratura a vazão residual medida foi de 268592 m³/s; na cheia em 2008 e em maré de sizígia foi de 248040 m³/s e, na época de seca em 2008 também em maré de sizígia foi de 144756 m³/s.

✓ Foi realizada uma parametrização dos dados medidos, usando a função $Q(t)$ que utiliza somente as componentes harmônicas M_2 e M_4 . A parametrização permitiu estender o registro com a finalidade de comparar as curvas simultâneas nas diferentes seções medidas, a representação foi considerada satisfatória para esta finalidade. No que diz respeito aos cálculos da vazão residual a partir do resultado da parametrização, os resultados não foram considerados satisfatórios, devido à pobre representação da curva tendo somente usado estas duas componentes. Uma melhoria deste resultado poderia ser alcançada considerando outras componentes harmônicas observadas neste local (GALLO, 2004).

✓ Avaliando-se os resultados obtidos através das metodologias adotadas para os cálculos das vazões residuais a partir dos dados de campo, utilizando como parâmetro de comparação os resultados obtidos a partir da integração da curva resultante da interpolação, nota-se que as diferenças entre os resultados para a vazão residual total variaram entre 1.2% a 2.8% para a época de cheia em 2007, entre 0.2% e 3.8% para a época de cheia em 2008; e entre 2.2% a 7.9% para o período de seca em 2008 (Tabela 8).

✓ Comparados os valores das vazões somadas das estações fluviométricas do rio Amazonas (Óbidos), rios Tapajós e Xingu e comparando com os resultados obtidos com as medições, a partir da integração da curva interpolada, constatou-se que durante para as medições em 2007, na cheia, a soma das vazões registrada nas três seções medidas excedeu em $\sim 21 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (8%) as vazões afluentes. Para a época de cheia em 2008 observou-se um déficit $\sim 22 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (9%) e na época de seca deste mesmo ano nas seções medidas a vazão excedeu em $\sim 34 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (23.5%) as vazões afluentes. Estas diferenças podem ser consequência dos próprios erros nas medições, na própria estimativa das vazões afluentes (erros de 10% podem ser observados na dispersão da curva chave em Óbidos, além das vazões dos tributários desconsiderados), e no tempo de trânsito da curva de cheia.

6.2. Uso de modelo numérico para analisar a distribuição da vazão fluvial no estuário do rio Amazonas em seus principais canais.

O objetivo do emprego da modelagem numérica neste trabalho obtenção de uma estimativa da variação da vazão ao longo do ano e para diferentes condições não medidas. Devido à grande extensão da região de estudo, torna-se difícil esta análise, sem o uso da ferramenta de modelagem numérica. O comportamento da distribuição das vazões foi estudado através da análise dos hidrogramas gerados por meio do modelo numérico EFDC. Os resultados foram também comparados com os dados medidos.

✓ Da comparação do modelo com os dados medidos foi constatado que o modelo, desde o início do trecho modelado, tem uma tendência não conservativa (cerca de 10% do volume total que entrou no modelo são perdidos até chegar à foz), e erros da ordem de 5% (indicado pelo aumento da vazão entre as duas últimas seções consideradas, após a S₄ e a S₅). Às curvas de vazões dos resultados do modelo numérico comparados com as curvas dos dados medidos nas seções S₄, S₅ e S₆, mostram uma boa concordância na fase nas seções S₄ e S₅, tanto na preamar quanto na baixa-mar, chegando a ser de aproximadamente 1 hora. Já na seção S₆, Estreito de Breves, as diferenças de fases observadas foram bem significativas, com diferença de aproximadamente 2h05min na baixa-mar e 2h48min na preamar, entre a curva medida e a modelada. Houve em todos os casos uma subestimação dos picos de vazões, especialmente dos picos de vazante, nas seções S₄ e S₅, e no pico de enchente na seção S₆. Porém, observa-se uma concordância na feição do hidrograma nas seções S₄ e S₅ em relação aos valores relativos aos picos da vazante.

✓ Com relação à distribuição de vazões em um ciclo de maré, os valores medidos no ano de 2007 corresponderam a 106136 m³/s (39.5%), 159689 m³/s (59.5%) e 2767 (1%), nas seções: Canal Norte em frente a Macapá (S₄), Canal do Vieira Grande (S₅) e Estreito de Breves (S₆), enquanto o modelo representou uma distribuição de vazões, para o mesmo período em que foram feitas as medições, de 97720 m³/s (41.3%), 130018 m³/s (54.9%) e de 8903 (3.8%), nas seções S₄, S₅ e S₆, respectivamente. Nota-se que o modelo superestimou em 68.9% a vazão na seção S₆ em relação à vazão obtida na medição e subestimou em 18.6% e 7.9% a vazão nas seções S₅ e S₄, resultando em uma subestimação da ordem de 11.9% entre as vazões totais medidas e modeladas para a foz do rio Amazonas. Esta superestimação da vazão pelo Estreito de Breves pode ser explicada na fraca representação batimétrica da ligação do rio Amazonas com o rio Pará, onde não há informações batimétricas e maregráficas.

✓ A influência sazonal foi considerada em todas as análises feitas a partir de cenários escolhidos de modo a ter ocorrência de maré de sizígia e quadratura para época de cheia e seca. A distribuição da vazão foi observada para o ciclo anual (Tabela 13), com uma proporção da ordem de 39.5% através da seção denominada de Canal Norte (S₄), 56.4% pela seção do Canal Sul (S₅) e 4.1% pela seção do Estreito de Breves (S₆).

✓ Com relação à distribuição de vazões durante maré de sizígia e quadratura (Figura 85), o modelo representou em maré de quadratura uma distribuição de vazões de 39%, 58% e 3% no período de seca e de 41.5%, 55.4% e 3.1% no período de cheia, nas seções S₄, S₅ e S₆, respectivamente. Em maré de sizígia a distribuição de vazões foi de 36%, 57% e 7% no período de seca e de 40.3%, 55.2% e 4.5% nas seções S₄, S₅ e S₆, respectivamente. Observa-se, uma vazão maior sendo conduzida pelo braço sul (seções S₃, S₅, S_b e S₆), desde a bifurcação na ilha de Gurupá até a foz (Figura 85). Esta diferença é mais acentuada durante o período de SECA do rio e nas marés de SIZÍGIA. A maior variabilidade é observada próximo à foz, onde o escoamento é mais influenciado pela maré.

Para aprofundar esta análise seria necessário o aprimoramento da calibração do modelo, em particular com relação à conexão com o rio Pará, que mesmo sendo de pouca importância em termos de quantidades residuais relativas ao rio Amazonas, elas são da ordem das vazões mínimas do rio Tocantins, com picos de vazões bem maiores se comparadas às deste rio, principal afluente do rio Pará.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANA (Agência Nacional de Águas, 2008). Hidroweb, Sistema de Informações Hidrológicas. URL: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Arquivos capturados em 2007, 2008 e 2009.

CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA AMAZÔNICA / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006.

COCONTRAM, Controle do Comando Naval do Tráfego Marítimo da Marinha do Brasil. 2006.

DEFANT, A. 1960. *Physical Oceanography*, v. 2. New York, Pergamon Press.

DRONKERS, J.J., 1964, *Tidal Computation in Rivers and Coastal Waters*. Amsterdam, New Holland.

DYER, K.R., 1997, *Estuaries. A Physical Introduction*. 2 ed. Chichester, England, John Wiley & Sons.

FERNANDES, R. D., 2006, *Teste Metodológico Para A Redução de Sondagens Na Foz do Rio Amazonas*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; DE OLIVEIRA, E.; DE FREITAS, M. A. V. *Caracterização Hidrológica da Bacia Amazônica*. In: Rivas & Freitas (Org.) *Amazônia uma perspectiva interdisciplinar*. Manaus: Ed. EDUA, 2002. p.33-53.

GABIOUX, M., 2002, *Influência da Lama em Suspensão sobre a Propagação da Maré na Plataforma Amazônica*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

- GODIN, G., 1999. “*The Propagation of Tides up Rivers with Special Considerations on the upper Saint-Lawrence River*”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 48, pp. 307-324.
- GODIN, G., GUTIERREZ, G., 1986, “*Non-linear Effects in the Tide of the Bay of Fundy*”, *continental Shelf Research*, v. 5, n. 3, pp. 379-402.
- GAMARO, P. E. M. (2007) – “*Curso de medidores acústicos de vazão Doppler*”. ITAIPU, EPAGRI, UNIFEI, Itajubá.
- GALLO, M. N., 2004, *A Influência da Vazão Fluvial sobre a Propagação da Maré no Estuário do Rio Amazonas*. Dissertação M.Sc., Engenharia Oceânica COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- GALLO, M. N., VINZON, S. B., 2005, “*Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary*”, *Ocean Dynamics*, 55 (5-6): 441-448.
- HAMRICK, J. M. 1994. *Linking hydrodynamic and biogeochemical transport models for estuarine and coastal waters*. In *Proceedings of the 3rd International Conference Estuarine and Coastal Modeling*, ed. M. L. Spaulding et al., *American Society of Civil Engineers*, New York, 1994, pp. 591-608.
- HAMRICK, J. M. 1996. *A User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code (EFDC)*. *Special Report 331*. *The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA*.
- HARLEMAN, D.R.F., LEE, C.H., 1969, *The Computation of Tides and Currents in Estuaries and Canals*. v.16, USA, Army Corps of Engineers.
- IPPEN, A.P., HARLEMAN, D.R.F, 1966, “Tidal Dynamics in Estuaries”. In: Ippen, A.P. (ed), *Estuary of Coastline Hydrodynamics*, chapter 10, New York, USA, Mc Graw Hill Book.

- KOSUTH, P., BLITZKOW, D., CAMPOS, I.O., et al., 1999, “*Altimetric Reference for Amazon Area*”. *Anais de Manaus’ 99 – Hydrological and Geochimical Processes in Large Scale River Basins*, CD-ROM, Manaus, Brasil.
- KOSTASCHUK, R.A.; Villard, P.V.; Best, J.L. 2004. *Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler*. *Geomorphology*, v.68.25-37p.
- LEFEBVRE, F., LYARD, F.H., Le PROVOST, C., 2002, “FES99: A Global Finite Element Solution Assimilating Tide Gauge and Altimetric Information”. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19: 1345-1356.
- LE COINTE. P. 1935. *Les Crues Aannuelles de l'Amazone et les Recentes Modifications de leur Régime*. *Annales de Géographie*, 44.: 6 14-619.
- MEADE, R.H., DUNNE, T., RICHEY, J.E., et al., 1985, “*Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil*”, *Science*, v. 228 (Apr), pp. 488-490.
- MUELLER, D.S. 2002. *Field assessment of acoustic-Doppler based discharge measurements*. *Proceedings of Hydraulic Measurements and Experimental Methods*. American Society of Civil Engineers. 95-102p.
- NORDIN, C.F.; MEADE. R.H. 1985. *The Amazon and the Orinoco. River*: 385-390
- NORDIN, C.F., MEADE, R.H., CURTIS, W.F., et al., 1980, “*Size Distribution of Amazon River Bed Sediment*”, *Nature*, v. 286, n. 578, pp. 52-53.
- OLIVEIRA, F. A. M. de, 2007. *Comparação do efeito da inundação e da variação da rugosidade do fundo devido a dunas nos níveis d’água no Amazonas*. Dissertação M.Sc., Engenharia Oceânica COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- OLTMAN, R.E. 1968. *Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon river*. USGeological Survey Circular 552. 16 p.

- OLTMAN, R.E.; STERNBERG, H.O.R.; AMES, F.C.; DAVIS, L.C. 1964. *Amazon river investigations reconnaissance measurements of July 1963*. US Geological Survey Circular 486, 15 p.
- PARDÉ, M. 1936. *Les variations saisonnières de l' Amazone*. *Annales de Géographie*, 45: 502-511.
- PARDÉ, M. 1954. *Sur le régime et spécialement sur les variations saisonnières des cours d'eau brésiliens*. *L47 Houille Blanche*, 6: 823-846.
- PUGH, D.T., 1987, *Tides, surges and mean sea level*. Swindon, UK, John Wiley & Sons.
- RDI - RD Instruments, Acoustic Doppler Solutions. Winriver User's guide [online]. Disponível na Internet. URL: <http://www.rdinstruments.com>. Arquivo consultado em 2007.
- RICHEY, J.E.; MEADE, R.H.; SALATI, E.; DEVOL, A.H.; NORDIN, C.F.; SANTOS, U. dos. 1986. *Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon river: 1982-1984*. *Water Resources Research*, 22(5) 756-764.
- SILVA, M.S. ; MARTINS, M.H.A. ; OLIVEIRA, D.M. *Hidrodinâmica do Igarapé da Fortaleza e do Rio Curiaú e Morfologia de Fundo (Batimetria) do Igarapé da Fortaleza* In: Takiyama, L.R. ; Silva, A.Q. da (orgs.). *Diagnóstico das Ressacas do Estado do Amapá: Bacias do Igarapé da Fortaleza e Rio Curiaú, Macapá-AP*, CPAQ/IEPA e DGEO/SEMA, 2003, p.137-154.
- TORRES, A. M.; COSTA, W.J.P. *Avaliação da concentração de sedimentos em suspensão e dos parâmetros ambientais do rio Amazonas no Setor Estuarino do Estado do Amapá sob influência da "la nina"*. In: Congresso da ABEQUA, 7. 1999, Porto Seguro. Resumos Porto Seguro: ABEQUA, 1999. 1 CD-ROOM.

WESTERNIK, J.J, STOLZENBACH, K.D., CONNOR, J.J., 1989, "General Spectral Computations of the Non-linear Shallow Water Tidal Interactions within the Bight of Abaco", *Journal of Physical Oceanography*, v. 19, pp. 1348-1371.

ANEXO 1

➤ Tabelas referentes à campanha realizada durante o período de cheia em 2007.

A Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21 mostram as horas de início e fim, a área da seção, a velocidade média do barco utilizado, a velocidade média do fluxo e a vazão média obtida para cada uma das travessias feitas nas as seções do Estreito de Breves, Canal do Vieira Grande e Canal Norte, durante a época de cheia em junho de 2007.

Tabela 19: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Estreito de Breves, no dia 21/06/2007.

Start Time	End Time	Área[m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
05:55:39	06:14:41	40007.02	1.987	0.352	13555.47
06:14:59	06:51:32	41336.55	1.087	0.055	548.68
07:08:20	07:25:07	41250.22	2.249	0.396	-15242.83
07:25:21	07:44:13	40685.85	1.993	0.576	-22945.35
07:44:32	08:37:29	43605.70	1.117	0.711	-33869.36
08:37:40	09:01:58	41284.15	1.707	0.900	-36818.34
09:02:12	09:21:44	42136.83	1.993	0.901	-37622.31
09:21:58	10:18:39	45130.99	1.194	0.792	-34815.93
10:18:49	10:36:57	42794.15	2.069	0.736	-31310.89
10:37:15	11:01:59	44148.61	1.740	0.655	-25253.21
11:02:15	11:19:35	43862.48	2.198	0.586	-25338.58
11:19:44	11:59:54	44238.43	1.150	0.427	-20366.17
12:00:08	12:16:12	42958.27	2.276	0.327	-13830.88
12:18:19	12:35:27	44262.13	2.237	0.218	-9656.39
12:35:39	13:24:47	42754.02	1.006	0.043	688.98
13:25:01	13:42:09	42492.62	2.291	0.237	8589.00
13:42:26	13:59:55	42959.89	2.106	0.326	13130.15
14:00:15	14:42:26	44327.52	1.229	0.524	18788.78
14:42:37	15:04:44	47980.79	1.797	0.597	24587.79
15:04:55	15:22:27	41439.14	2.178	0.672	27204.38
15:22:38	16:10:56	41789.56	1.124	0.726	27942.96
16:16:47	16:32:21	40898.10	2.485	0.725	28506.89
16:32:44	16:50:27	41711.45	2.128	0.693	27996.52
16:50:41	17:30:35	38372.48	1.296	0.701	26255.80
17:30:46	17:48:43	40835.69	2.127	0.590	23340.29
17:48:52	18:04:44	40318.75	2.510	0.517	20500.54
18:04:56	18:44:48	40674.12	1.127	0.332	13592.00
18:44:57	19:01:24	40517.80	2.527	0.092	3920.68
19:01:35	19:18:07	38826.55	2.357	0.062	-2181.09

Tabela 20: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Vieira Grande, no dia 23/06/2007.

Start Time	End Time	Área[m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
05:11:49	06:36:29	282623.97	2.353	0.779	202687.90
06:36:42	07:56:36	286955.34	2.625	0.201	53613.85
07:56:52	09:07:35	285475.91	2.711	0.125	-36203.76
09:07:50	10:23:49	288021.29	2.580	0.105	-29654.96
10:24:02	11:33:19	285022.74	2.778	0.183	46285.97
11:41:01	13:02:48	283893.65	2.401	0.604	165295.33
13:03:00	14:17:49	281882.11	2.628	0.962	259546.90
14:17:59	15:51:06	280378.01	2.115	1,195	313659.10
15:51:18	17:12:50	272434.21	2.445	1,215	319178.83
17:13:07	18:26:56	270328.64	2.601	1,074	283786.88
18:27:05	19:37:33	276065.09	2.893	0.613	161095.75

Tabela 21: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Norte, no dia 26/06/2007.

Start Time	End Time	Area[m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
05:31:34	06:32:11	213518.51	3.320	0.970	198214.22
06:50:00	07:50:54	207750.79	3.260	0.892	181718.57
07:51:05	08:49:19	205555.72	3.482	0.754	156816.43
08:49:28	09:49:04	214825.32	3.319	0.479	100690.23
09:49:14	10:49:55	219569.03	3.285	0.150	18420.31
10:50:11	11:46:24	235756.81	3.679	0.290	-50626.85
11:46:33	12:50:03	239613.71	3.176	0.313	-59565.38
12:57:48	13:55:56	234323.87	3.426	0.058	12096.28
13:56:11	14:52:31	222653.38	3.543	0.461	100706.61
14:52:40	15:58:04	223495.82	3.042	0.764	154622.00
15:58:15	16:53:00	217761.185	3.067	0.916	185200.00
17:01:07	17:51:22	212026.55	3.091	0.987	201600.00
18:04:28	18:56:39	205416.34	3.697	1.023	206988.36
18:58:11	19:51:54	207662.13	3.537	0.984	195589.24

ANEXO 2

➤ Tabelas referentes à campanha realizada durante o período de cheia em 2008.

A Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24 contem informações como à hora de início e fim, à área estimada pelo ADCP da seção, a velocidade média do barco, a velocidade média do fluxo e a vazão média para cada uma das travessias feitas nas as seções do Estreito de Breves, Canal do Vieira Grande e Canal Norte, na época do período de cheia do rio Amazonas em junho de 2008.

Tabela 22: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Estreito de Breves, no dia 03/06/2008.

Start Time	End Time	Área [m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
07:09:29	07:30:16	41759.88	1.987	0.119	4906.61
07:30:37	07:50:18	42694.96	1.897	0.047	-1467.54
07:50:39	08:08:36	42904.21	2.077	0.173	-6991.38
08:08:56	08:27:57	42772.72	1.956	0.306	-12530.16
08:28:07	08:46:19	42706.67	2.052	0.429	-17460.23
08:46:29	09:06:01	42100.39	1.907	0.539	-21816.71
09:06:09	09:23:02	41913.48	2.204	0.620	-24787.12
09:23:28	09:42:23	41845.92	1.995	0.690	-27922.94
09:42:37	09:58:11	41778.23	2.382	0.751	-30229.62
09:58:30	10:16:25	41436.25	2.079	0.771	-31106.91
10:16:37	10:31:23	41102.79	2.595	0.816	-32638.21
10:31:33	10:51:15	41338.37	1.916	0.825	-33090.89
10:51:41	11:13:07	40709.31	1.813	0.860	-33730.40
11:13:19	11:34:06	42492.81	1.877	0.806	-33479.98
11:34:29	11:51:53	39772.84	2.200	0.833	-33054.41
11:52:07	12:10:05	39868.83	2.065	0.809	-31437.05
12:10:24	12:27:22	39844.26	2.210	0.718	-28261.77
12:27:45	12:47:26	40448.60	1.934	0.607	-23117.94
12:47:50	13:06:04	40275.44	2.061	0.357	-14531.81
13:06:28	13:24:27	40589.11	2.078	0.126	-4440.30
13:24:49	13:43:31	41889.63	2.017	0.184	6844.02
13:43:51	14:01:29	42312.44	2.124	0.402	16123.31
14:01:50	14:23:16	42174.65	1.765	0.659	27008.57
14:23:28	14:43:01	42152.60	1.940	0.787	30553.01
14:43:26	15:03:59	42538.57	1.844	0.887	37139.66
15:04:28	15:22:32	43067.35	2.139	0.976	41777.49
15:23:04	15:41:25	43388.79	2.074	1.000	42577.88
15:41:49	15:59:20	43408.83	2.272	0.983	42855.25
15:59:39	16:18:12	44038.74	2.032	0.965	41872.23
16:18:29	16:40:32	43507.83	1.788	0.936	40736.10
16:40:46	17:01:34	44206.26	1.800	0.877	37907.37
17:01:50	17:20:05	43871.22	2.073	0.833	36102.84
17:20:26	17:38:23	44083.43	2.105	0.788	33718.49
17:38:38	17:54:45	43239.32	2.319	0.721	30562.38
17:55:52	18:13:47	43387.48	2.116	0.666	28023.78
18:14:16	18:34:15	43298.03	1.899	0.573	23945.09
18:34:37	18:50:13	43819.25	2.496	0.494	21421.73
18:50:36	19:08:58	43173.99	2.109	0.399	17067.43
19:09:22	19:26:29	43242.56	2.273	0.295	12373.12
19:26:53	19:43:29	44028.81	2.326	0.172	7150.46
19:43:46	19:59:39	43277.77	2.405	0.048	2464.04
20:00:03	20:15:09	42743.57	2.511	0.075	-2803.09

Tabela 23: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Vieira Grande, no dia 04/06/2008.

Start Time	End Time	Área[m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
07:40:45	09:09:01	272210.16	2.262	1.402	373937.05
09:10:36	10:45:15	274816.22	2.158	1.474	382222.59
10:45:48	12:00:51	277887.12	2.625	1.063	284652.52
12:01:24	13:09:51	288109.85	2.871	0.217	53973.69
13:10:18	14:22:26	290972.24	2.699	0.399	-115200.87
14:22:54	15:41:53	294015.67	2.463	0.541	-155000.83
15:42:37	16:49:51	286930.48	2.972	0.171	-47445.46
16:50:19	18:05:30	282901.36	2.593	0.417	111327.37
18:06:06	19:45:43	276766.04	2.377	1.106	276728.02
20:11:11	21:58:59	288135.5	2.039	1.364	373864.34

Tabela 24: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Norte, no dia 04/06/2008.

Start Time	End Time	Área [m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
08:18:36	09:47:47	223750.70	2.216	1.198	250112.80
09:48:15	11:09:15	222937.55	2.572	1.221	255652.26
11:12:32	12:31:06	209444.91	2.497	1.000	212750.46
12:36:06	13:45:25	214476.02	2.917	0.595	120931.14
13:46:28	14:52:22	223389.49	3.027	0.268	-41656.06
14:53:03	16:17:38	240399.68	2.406	0.775	-170808.07
16:18:06	17:26:32	239095.95	2.912	0.416	-91398.98
17:27:02	18:39:05	233691.69	2.763	0.200	46460.52
18:39:32	19:55:47	225195.52	2.569	0.843	174344.62
19:56:24	21:22:57	218645.56	2.352	1.191	252367.89

ANEXO 3

➤ Tabelas referentes à campanha realizada durante o período de seca em 2008.

A Tabela 25, Tabela 26 e Tabela 27 mostram à hora de início e fim para todas as travessias, a área estimada da seção, a velocidade média do barco utilizado, a velocidade média do fluxo e a vazão média para cada uma das travessias feitas nas seções do Estreito de Breves, Canal do Vieira Grande e Canal Norte, durante o período de seca de 2008.

Tabela 25 Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Estreito de Breves, no dia 30/09/2008.

Start Time	End Time	Área [m ²]	Boat Spee[m/s]d	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
07:27:00	07:53:49	39853.4	1.50	0.21	8433.78
07:54:38	08:25:15	41426.9	1.31	0.01	453.51
08:31:27	08:59:32	39839.19	1.39	0.27	-10374.36
09:00:11	09:40:18	40402.09	0.99	0.47	-18959.52
09:41:07	10:14:52	38802.15	1.19	0.67	-25240.70
10:15:55	10:56:44	39202.75	0.98	0.75	-28378.64
10:57:29	11:37:36	37084.39	1.00	0.81	-29642.26
11:38:27	12:19:14	38932.86	0.97	0.78	-29319.55
12:19:28	12:59:12	36463.25	1.01	0.81	-28098.47
12:59:54	13:38:07	37927.89	1.04	0.67	-24448.90
13:38:32	14:10:03	35926.95	1.24	0.34	-11969.29
14:10:34	14:47:27	38761.89	1.09	0.13	4895.84
14:47:52	15:20:51	37833.36	1.19	0.60	21983.54
15:21:10	16:12:46	40329.15	0.81	0.80	32676.05
16:13:21	16:55:11	40134.7	0.99	0.95	38431.72
16:55:54	17:49:36	41185.69	0.79	0.89	36345.87
17:50:11	18:27:58	40910	1.09	0.75	30257.18
18:28:16	19:15:50	42113.73	0.89	0.57	24232.03
19:16:43	19:49:47	40697.24	1.21	0.36	14809.79
19:50:09	20:38:03	40459.43	1.00	0.11	4635.00
20:41:19	21:07:59	39042.82	1.51	0.20	-6757.11

Tabela 26: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Vieira Grande, no dia 01 e 02/10/2008.

Start Time	End Time	Área [m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
04:18:27	05:25:47	279051.04	2.859	0.261	-70524.69
05:26:16	06:32:43	273855.55	2.894	0.249	73535.27
06:33:08	07:46:24	271715.68	2.634	0.747	195684.44
08:53:44	09:56:30	261515.27	3.006	1.163	291583.75
10:01:15	11:25:12	260133.77	2.296	1.202	307268.09
11:25:26	12:52:13	268519.08	2.334	0.885	232206.33
12:52:39	14:18:12	273094.95	2.335	0.136	-35359.00
14:18:49	15:31:22	285291.37	2.663	0.581	-160903.80
15:31:51	16:46:26	277794.12	2.651	0.683	-184244.48
16:46:43	17:57:45	279038.96	2.797	0.336	-94036.34
17:58:05	19:21:22	266852.78	2.523	0.279	65146.91
19:21:53	20:40:04	271990.97	2.526	0.73	198572.58

Tabela 27: Alguns dos dados informados pelo ADCP através do Winriver ao final de cada travessia na seção medida para o Canal do Norte, no dia 03/10/2008.

Start Time	End Time	Área [m ²]	Boat Speed[m/s]	Flow Speed[m/s]	Q[m ³ /s]
06:15:13	07:45:55	102535.37	2.256	0.093	17252.84
07:46:16	08:48:36	214787.28	3.09	0.587	115296.18
08:48:46	09:49:08	206275.81	3.247	0.767	157446.08
09:53:18	10:58:48	203726.87	2.964	0.885	175419.27
11:08:22	12:14:23	203371.63	2.961	0.905	176681.59
12:14:34	13:18:13	197656.57	3.031	0.798	152195.73
13:18:26	14:23:13	202732.45	2.992	0.552	106106.46
14:23:28	15:30:46	168004.49	2.852	0.121	15985.36
15:31:55	16:44:49	208704.79	2.658	0.447	-90800.52
16:46:00	17:49:47	223243.17	3.063	0.602	-134102.09
17:53:56	18:58:45	225266.69	2.989	0.404	-89049.40
19:02:31	19:29:15	74729.45	2.578	0.099	19500.00