



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E
GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 435

**APORTE HÍDRICO E DE MATERIAL PARTICULADO EM
SUSPENSÃO PARA A BAÍA DO MARAJÓ: CONTRIBUIÇÕES
DOS RIOS JACARÉ GRANDE, PARÁ E TOCANTINS**

Dissertação apresentada por:

MAURÍCIO DA SILVA DA COSTA

Orientador: Prof. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)

Coorientador: Prof. Marcelo Rollnic (UFPA)

**BELÉM
2014**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
(Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA)

Costa, Maurício da Silva da, 1986-

Aporte hídrico e do material particulado em suspensão para a Baía do Marajó : contribuições dos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins / Maurício da Silva da Costa. – 2014.

xii, 71 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho;

Coorientador: Marcelo Rollnic

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2014.

1. Costa - Amazônia. 2. Transporte de sedimentos. 3. Turbidez. 4. Hidrodinâmica. I. Título.

CDD 22. ed. 551.45709811



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**APORTE HÍDRICO E DE MATERIAL PARTICULADO EM
SUSPENSÃO PARA A BAÍA DO MARAJÓ: CONTRIBUIÇÕES
DOS RIOS JACARÉ GRANDE, PARÁ E TOCANTINS**

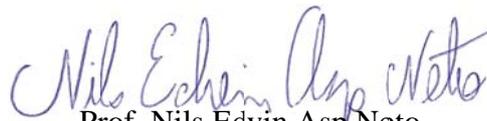
**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
MAURÍCIO DA SILVA DA COSTA**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA.

Data de Aprovação: 19 / 03 / 2014

Banca Examinadora:


Prof. Pedro Walfir Martins e Souza Filho
(Orientador-UFPA)


Prof. Nils Edvin Asp Neto
(Membro-UFPA)


Prof.^a Carmen Medeiros Limongi
(Membro-UFPE)

Dedico este trabalho a Professora Odete (*in memoriam*) por toda sua luta pelo desenvolvimento da pesquisa na região Norte e a pessoa maravilhosa, pelo pouco que convivi me ensinou muito da vida.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a Deus, por mais essa vitória.

A minha família, por toda confiança e apoio, em especial aos meus pais.

Agradeço aos meus amores: A Raiza (pela ajuda em campo e sugestões na dissertação) e ao meu filhão (Pedro).

Aos professores Pedro Walfir e Marcelo Rollnic pela orientação e apoio. Em especial ao Marcelo Rollnic que tem me orientado desde a graduação. A professora Odete por todos os conselhos e ajuda na minha caminhada. Aos Professores Berredo e Maâmar El-Robrini pela disponibilidade de equipamentos e de seus laboratórios para análises. A Professora Sury Monteiro pela ajuda na formatação e inúmeras correções. Ao Professor Alessandro Bergamo pelas inúmeras sugestões no tratamento dos dados do ADCP e correções.

Ao projeto CT-HIDRO 01/2010- FINEP: “MONITORAMENTO INTEGRADO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA (MIZCA)”. Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado (Proc.: 131229/2012-5) e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica.

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Oceanografia Física – LOF, Laboratório Integrado de Oceanografia Geológica e Geofísica Marinha – LIOG e Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido (LAIT).

A todo o pessoal do LOF, LIOG e agregados que ajudaram nas coletas de campo e em laboratório: Renan, Yuri, Piolho (Artur), Lorena, Inaê, Fabíola, Raiza, Afonso Quaresma, Paulo Lait, Andrey, Chicão, Gustavo. Em especial ao pessoal do LOF (Renan, Inaê, Yuri, Piolho (Artur), Fabíola e a Thaís (chata)).

Em especial a Professora e amiga Odete Silveira (*in memoriam*). A qual agradeço o incentivo e conselhos duros, quem a conhece sabe, mas muitos úteis para toda a vida. À ela, exemplo de mulher e pesquisadora, que foi responsável por grandes avanços científicos na região Norte, meu sincero obrigado.

RESUMO

O sistema estuarino Amazônico é influenciado pelo regime de maré e pelas variações da descarga fluvial que modificam o regime das correntes e contribuem com aportes de material particulado em suspensão (MPS) acarretando diversas modificações morfológicas ao longo do rio. A quantificação desses parâmetros fornece um entendimento sobre as taxas de exportação e importação de materiais ou volume e suas implicações na geomorfologia estuarina. O objetivo desse estudo é avaliar a hidrodinâmica, o transporte de volume e de MPS em diferentes períodos nos rios Jacaré Grande, Pará e foz do Tocantins. Coletaram-se dados de velocidade e direção da corrente, maré, turbidez, transporte de volume e MPS, ao longo de um ciclo de maré no período seco (2012) e chuvoso (2013). O rio Pará exportou volume, nos dois períodos. O rio Tocantins importou no período seco e exportou no período chuvoso. O rio Jacaré Grande influenciado pelo rio Amazonas, importou no período chuvoso e exportou no período seco. A análise dos métodos de transporte de volume mostrou uma tendência de exportação em direção ao rio Amazonas e a baía do Marajó no período seco e para baía do Marajó no período chuvoso. Os valores de MPS no período chuvoso foram maiores, sendo decrescente do rio Jacaré Grande até o rio Tocantins, respectivamente período seco e chuvoso. A turbidez seguiu a mesma tendência de MPS com a maré, tendo os valores máximos durante a enchente. Os métodos de transporte de MPS, mostrou valores similares e que obedecia a mesma direção. O rio Jacaré Grande atuou como exportador no período seco e importador no período chuvoso, o rio Pará como exportador nos dois períodos e o rio Tocantins como importador no período seco e exportador no período chuvoso. O sistema formado pelos três rios mostrou a mesma tendência de exportação nos dois períodos, tendo no período seco duas rotas de exportação, o rio Amazonas e a baía do Marajó, e no período chuvoso uma rota de exportação, a baía do Marajó. Anualmente o sistema exporta entre 5 a 7,2 milhões de toneladas, sendo que possivelmente a baía do Marajó recebe entre 3,7 a 5,8 milhões de toneladas, podendo o volume transportado para a região oceânica ser bem maior. Os fluxos de MPS associado à variabilidade das condicionantes ambientais modelam a região estuarina, como na foz do rio Tocantins e na Baía do Guajará, sendo preciso um monitoramento contínuo devido a possíveis acidentes náuticos ou a derramamentos de óleo ou qualquer contaminante na região que acarrete danos ao meio.

Palavra chave: Zona costeira Amazônica. Transporte de volume. Turbidez. Hidrodinâmica.

ABSTRACT

The Amazon estuary is influenced by the tide and river discharge systems variations that modify the currents and contribute with inputs of suspended particulate matter (SPM) resulting in morphological changes along the river. The quantification of these parameters provides an understanding of the rates of export and import of materials or volume and its implications in the estuarine geomorphology. The aim of this study is to evaluate the hydrodynamic, volume transport and SPM in different periods in Jacaré Grande, Pará and Tocantins rivers. Speed and current direction, tide, turbidity, volume transport and SPM data were collected over a tide cycle in the dry (2012) and rainy (2013) periods. The Pará river the exported volume in both periods, while the Tocantins river imported during the dry period and the exported in the rainy period. The Jacaré Grande river, influenced by the Amazon river, imported in the rainy season and exported in the dry period. The analysis of the volume transport methods showed a trend of export toward Amazon river and Marajó Bay in the dry season and only toward the Marajó Bay during the rainy season. SPM values were higher in the rainy season and descending from Jacaré Grande river to the Tocantins river in dry and rainy season, respectively. Turbidity followed the same trend of SPM with tide, with maximum values during the flood. SPM transportation methods showed similar values and the same direction. The Jacaré Grande river served as an exporter during the dry period and as an exporter in the dry period, the Para river as an exporter in both periods and the Tocantins river in the dry season as an importer and as an exporter during the rainy season. The system formed by the three rivers showed the same trend of export in both periods, with two exportation routes in the dry season (Amazon river and Marajó Bay), and only one exportation route in the rainy period (Marajó Bay). Annually the system exports between 5 and 7.2 million tons and possibly the Marajó Bay receives 3.7 to 5.8 million tons. The volume transported to the ocean can be much higher. SPM flows, associated with the variability of environmental conditions, molds the estuary, as seen in the mouth of the Tocantins river and Guajará Bay. Thus, it important a continuous monitoring due to the potential boating accidents, oil spills or any contamination in the region that can result in damage the enviroment.

Key word: Amazon coastal zone. Volume transport. Turbidity. Hydrodynamic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo e pontos de coleta.	3
Figura 2: Precipitação Acumulada mensal e a normal climatológica de cada estação (INMET, 2013).	5
Figura 3: Esquema das anomalias das circulações em relação com a TSM (ARAGÃO <i>et al.</i> 1996).	6
Figura 4: Precipitação acumulada de Junho, Novembro e a anual com base na Normal climatológica (INMET, 2012).	6
Figura 5: Direção do vento em Maio e Novembro com base na Normal climatológica (INMET, 2012).	7
Figura 6: Geologia da área, modificado de Mantelli, L. R & Rossetti, D. F. (2009).	8
Figura 7: Médias de MPS das principais estações hidrossedimentométricas da Bacia Araguaia - Tocantins no período 1981-1998 (mg.L-1). Fonte Lima <i>et al.</i> (2004).	11
Figura 8: Mapa de localização com os pontos de coleta (água e turbidez) e perfil geomorfológico (ADCP) do rio Jacaré Grande.	13
Figura 9: Mapa de localização com os pontos de coleta (água e turbidez) e perfil geomorfológico (ADCP) do rio Pará.	14
Figura 10: Mapa de localização com os pontos de coleta (água e turbidez), perfil geomorfológico (ADCP) do rio Tocantins e os pontos do marégrafo (rio Pará e Tocantins).	14
Figura 11: Esquema de funcionamento do ADCP (PRESTE, 2013).	15
Figura 12: Transmissão e dispersão de um pulso acústico (Simpson, 2001).	16
Figura 13: Decomposição das velocidades de corrente segundo Miranda <i>et al.</i> (2002).	18
Figura 14: Transporte de volume, nível relativo de maré e velocidade no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Jacaré Grande.	24
Figura 15: Transporte de volume, nível relativo de maré e velocidade no período seco (B) e chuvoso (B) no rio Pará.	25
Figura 16: Transporte de volume, nível relativo de maré e velocidade no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Tocantins.	26
Figura 17: Transporte de volume no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Jacaré Grande.	29
Figura 18: Transporte de volume no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Pará.	29
Figura 19: Transporte de volume no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Tocantins.	30
Figura 20: Direção do Transporte resultante de volume de cada rio e as rotas de exportação no período seco, com base nos métodos do ADCP e adaptado de Miranda <i>et al.</i> (2002).	31
Figura 21: Direção do Transporte resultante de volume de cada rio e as rotas de exportação no período chuvoso, com base nos métodos do ADCP e adaptado de Miranda <i>et al.</i> (2002).	31
Figura 22: Modelo de propagação de maré (Masselink <i>et al.</i> 2003).	33
Figura 23: Perfil temporal de velocidade do rio Jacaré Grande no período seco (A) e chuvoso (B).	34
Figura 24: Perfil temporal de velocidade do rio Pará no período seco, sendo A (canal 1), B (canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).	36
Figura 25: Perfil temporal de velocidade do rio Pará no período chuvoso sendo A (canal 1), B (canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).	38

Figura 26: Perfil temporal de velocidade do rio Tocantins no período seco, sendo A (canal 1), B(canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).	40
Figura 27: Perfil temporal de velocidade do rio Tocantins no período chuvoso, sendo A (canal 1), B(canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).	42
Figura 28: Variação espacial e temporal do MPS em superfície e no fundo no rio Jacaré Grande no período seco (A) e no chuvoso (B).	45
Figura 29: Variação espacial e temporal do MPS em superfície e no fundo no rio Pará no período seco (A) e no chuvoso (B).	47
Figura 30: Variação espacial e temporal do MPS em superfície e no fundo no rio Tocantins no período seco (A) e no chuvoso (B).	48
Figura 31: Variação temporal da turbidez na margem esquerda do rio Jacaré Grande no período seco (A) e período chuvoso (B).	50
Figura 32: Variação temporal da turbidez no meio do canal do rio Jacaré Grande no período seco (A) e período chuvoso (B).	50
Figura 33: Variação temporal da turbidez na margem direita do rio Jacaré Grande no período seco (A) e período chuvoso (B).	51
Figura 34: variação temporal da turbidez no canal 1 do rio Pará no período seco (A), as linhas tracejadas em vermelho indicam ausência de dados, e no período chuvoso (B).	52
Figura 35: variação temporal da turbidez no canal 2 do rio Pará no período seco (A), as linhas tracejadas em vermelho indicam ausência de dados, e no período chuvoso (B).	53
Figura 36: Variação temporal da turbidez no canal 3 do rio Pará no período seco (2012), as linhas tracejadas em vermelho indicam ausência de dados, e no período chuvoso (B).	53
Figura 37: Variação temporal da turbidez do Canal 1 do rio Tocantins no período seco (A) e período chuvoso (B).	54
Figura 38: Variação temporal da turbidez do Canal 2 do rio Tocantins no período seco (A) e período chuvoso (B).	55
Figura 39: Variação temporal da turbidez do Canal 3 do rio Tocantins no período seco (A) e período chuvoso (B).	55
Figura 40: Direção do Transporte resultante de MPS de cada rio e as rotas de exportação no período seco, com base nos métodos adaptados de Colby (1957) e de Miranda <i>et al.</i> (2002).	59
Figura 41: Direção do Transporte resultante de MPS de cada rio e as rotas de exportação no período chuvoso, com base nos métodos adaptado de Colby (1957) e de Miranda <i>et al.</i> (2002).	59
Figura 42: Carta batimétrica da Foz do rio Tocantins (1985/1992).	61
Figura 43: Figura: Carta batimétrica da Foz do rio Tocantins (2010).	62

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Configuração do equipamento ADCP utilizada na aquisição dos dados.....	16
Tabela 2: Área das seções de medições no período seco e chuvoso.	23
Tabela 3: Média do transporte de volume (m ³ /s) e intensidade da corrente (m/s).	23
Tabela 4: Quantificação de MPS em vários sistemas a nível global.	44
Tabela 5: Métodos de Transporte de MPS em toneladas por ciclo de maré.....	57

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 DINÂMICA HIDROCLIMÁTICA.....	4
1.2 GEOLOGIA DA ÁREA.....	7
1.3 PROCESSOS SEDIMENTARES	9
1.4 FONTE DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO.....	10
1.4.1 Rio Tocantins	10
1.4.2 Rio Jacaré Grande e rio Pará.....	11
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVOS GERAIS	12
2.2 ESPECÍFICOS	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1 PERFILAGENS	15
3.1.1 Perfilador acústico de corrente (ADCP)	15
3.1.2 Turbidez.....	16
3.1.3 Quantificação do material particulado em suspensão (MPS).....	17
3.2 PROCESSAMENTOS DOS DADOS.....	17
3.2.1 Correntes.....	17
3.2.2 Turbidez e Quantificação do material particulado em suspensão.....	19
3.2.3 Transporte de Volume	19
3.2.4 Transporte de Sedimento	20
3.2.4.1 Método 1	20
3.2.4.2 Método 2	21
4 RESULTADO E DISCUSSÃO	22
4.1 HIDRODINÂMICA	22
4.1.1 Análises dos dados hidrodinâmicos.....	22
4.1.1.1 Transporte de volume Instantâneo	22
4.1.1.2 Relação entre transporte de volume e variação da maré.....	24
4.1.1.3 Métodos de Transporte de volume.....	28
4.1.1.4 Maré dinâmica na região.....	32

4.1.2	hidrodinâmica dos canais.....	34
4.1.2.1	Rio Jacaré Grande	34
4.1.2.2	Rio Pará.....	35
4.1.2.3	Rio Tocantins	38
4.2	MATERIAL EM SUSPENSÃO E TRANSPORTE DE MASSA	44
4.2.1	Material em suspensão.....	45
4.2.1.1	Rio Jacaré Grande	45
4.2.1.2	Rio Pará.....	46
4.2.1.3	Rio Tocantins	47
4.2.2	Turbidez.....	49
4.2.2.1	Rio Jacaré Grande	49
4.2.2.2	Rio Pará.....	52
4.2.2.3	Rio Tocantins	54
4.2.3	Transporte de MPS	56
5	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO GERAL

A região Amazônica possui uma vocação natural para a navegação. Os rios desempenham um papel fundamental na região, tendo sido as primeiras vias de acesso ao interior. Expedições partiam de Belém ao interior da floresta, atrás de novas descobertas através dos rios. Com o passar do tempo, as vias fluviais, se tornaram um elo de vital importância para a economia local e em muitos casos, a única via de transporte e/ou comunicação dos ribeirinhos.

A região possui um crescente setor de transporte fluvial regional e nacional, tornando essa iniciativa uma das mais importantes para o conhecimento sobre a região, mais especificamente na região estuarina do rio Pará, onde se situa a área Portuária de Vila do Conde (Barcarena - PA). O Porto de Vila do Conde poderá ser o maior porto da Bacia Amazônica, quando implantada as Hidrovias Araguaia-Tocantins, Guamá-Capim e Transmarajoara, que interligariam a conexão com os eixos Centro-Oeste, Amazônia Ocidental e Nordeste Paraense. Para implantação da Hidrovia Araguaia-Tocantins falta à dragagem e o derrocamento do Pedral do Lourenço/PA e os terminais de carga, dragagem e derrocamento de Marabá/PA a Imperatriz/MA (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, 2012).

A ação fluvial é muito intensa na costa amazônica, principalmente no período chuvoso, sendo uma das principais variáveis ambientais que afeta a quantidade de material transportado para a costa. Nesse contexto, a hidrodinâmica e o transporte de sedimento em suspensão estão diretamente ligados à evolução costeira, principalmente na zona de transição estuarina. Dentro disso, destacamos o rio Pará, que se situa numa região estuarina, dominada por meso a macromaré e uma ampla área de sedimentação. A investigação desses fatores é de grande interesse para a região, principalmente relacionadas às atividades portuárias, proteção costeira, projetos de manejos e as modificações geradas por esses investimentos.

Nessa região os efeitos da ação do vento são expressivos devido à largura dos rios e a sua junção com a baía, com áreas abertas para ação do vento, sendo relatado por ribeirinhos que transitam nessa região ondas de aproximadamente 1 m, que dificulta a navegação.

A área de estudo está inserida nas Regiões Hidrográficas de Portel-Marajó e Tocantins-Araguaia, de acordo com a divisão estadual (SECTAM, 2005), e o rio Pará é a feição geomorfológica que interliga as duas regiões hidrográficas. O rio Pará é formado a partir de contribuições do rio Amazonas, através dos estreitos de Breves, da sub-região do Marajó Ocidental e de Portel que somados às contribuições do rio Tocantins formam a Baía de Marapatá (rio Pará). O rio Pará compreende a costa sul-sudeste da ilha de Marajó, se inicia na baía das Bocas, passando pela área em que as águas do rio Tocantins deságuam na baía de

Marapatá e seguindo até a baía do Marajó, tendo um percurso de mais de 300 km e uma largura que varia de 10 a 25 km (figura 1).

O rio Pará pode ser classificado tanto em “estuários dominados por maré”, onde as correntes de maré desempenham um papel fundamental no transporte sedimento como descrito por Boyd *et al.* (2006), e também em “rio com maré” segundo Wells (1995), que possuem diversas características morfológicas e sedimentologias de estuários, onde as ondas de maré se propagam por distâncias consideráveis, continente adentro e segundo as definições de Pritchard (1955), Kjerfve (1987) e Dyer (1997), se encaixa como zona de maré do rio.

A influência da maré ao longo do rio Pará e do rio Tocantins apresenta altura de 1,2 m a 1,5 m, com nível médio de 0,69 m em Breves, 2,01 m no cabo Maguari e de 1,67 m em Cametá (rio Tocantins). Sendo que Cametá e Breves estão a mais de 250 km de distância da foz da baía do Marajó (FEMAR, 2012).

O rio Tocantins é o maior contribuinte do rio Pará que apresenta um regime hidrológico bem definido com a estiagem em setembro-outubro e a cheia entre fevereiro e abril. O rio Tocantins, em Tucuruí, tem uma vazão média de 11000 m³/s com máximos de 50000 m³/s e mínimos de 1500 m³/s (ANA, 2011; ONS, 2011), e uma carga sedimentar de 18 milhões de toneladas por ano (LATRUBESSE & STEVAUX, 2002).

O rio Jacaré Grande tem uma vazão residual (vazão média) entre 188 a 3291 m³/s, em direção ao rio Pará, para os anos de 2008 no período seco e para os anos de 2007 e 2008 no período chuvoso (SILVA, 2009).

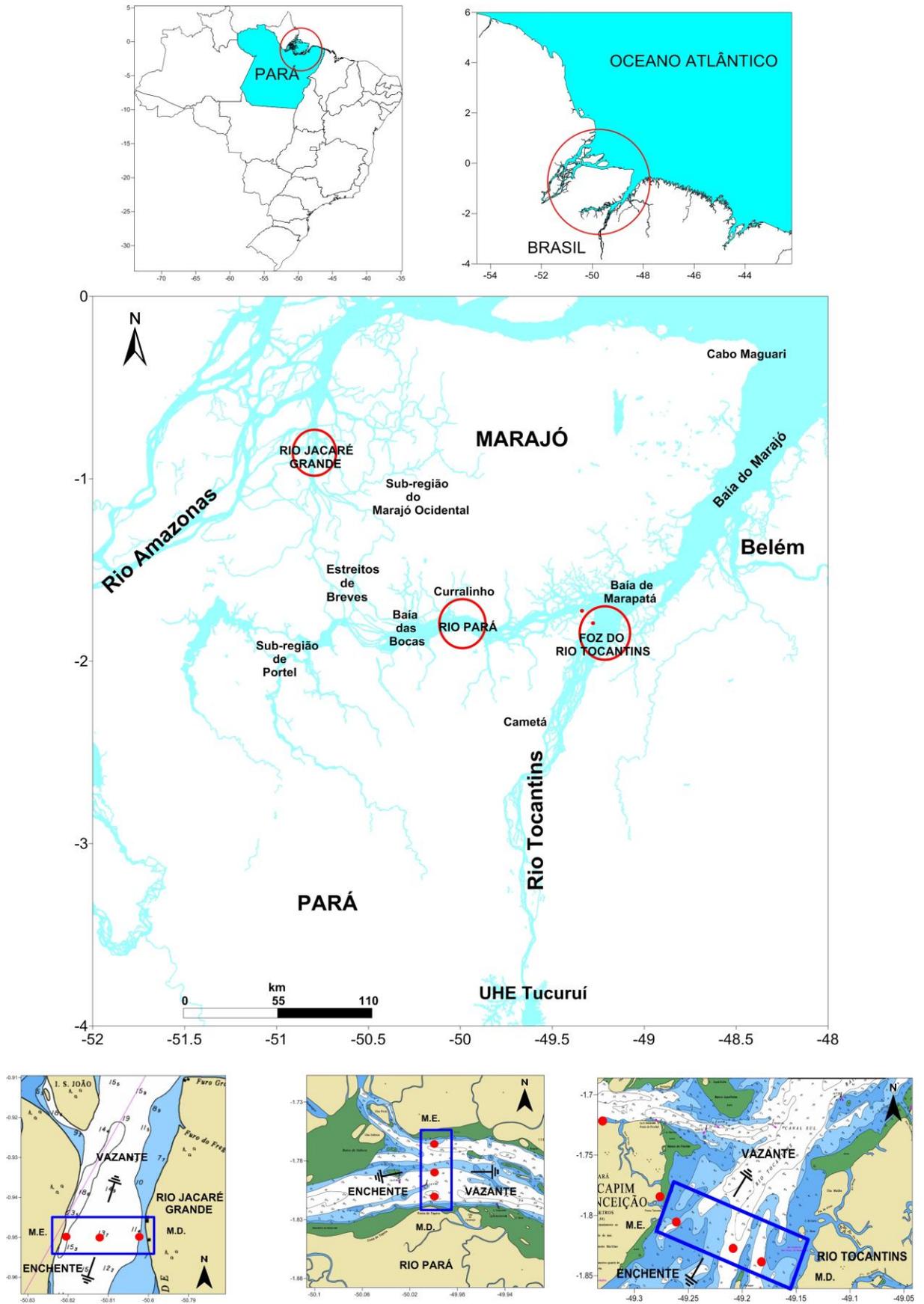


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo e pontos de coleta.

A maioria dos trabalhos como os de Molinier *et al.* (1994), Gabioux (2002), Gallo (2004), Souza (2006), Silva (2009), Gallo (2009), Monteiro (2009), Freitas (2011) descrevem o sistema Tocantins - Pará através das informações da Agência Nacional de Águas (ANA) distantes mais de 400 km da foz da baía do Marajó, devido à falta de informações, ignorando assim outros sistemas de drenagem (sub-bacias) e extrapolando resultados para toda a área. Nesse âmbito, a proposta pretende preencher essas lacunas e elaborar um trabalho de referencia na região.

1.1 DINÂMICA HIDROCLIMÁTICA

Para os ambientes costeiros tropicais dois fatores são fundamentais no regime da precipitação e decorrem da condição climática global do planeta: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e ocorrência do fenômeno El-Niño-Southern Oscillation (ENSO).

A ZCIT é decorrente do sistema de circulação atmosférica superficial, existente entre o Equador e a latitude de 30°. Como a ZCIT move-se anualmente de um lado para outro da linha do Equador, deslocando-se para Norte, entre os meses de junho a setembro, e para o Sul do equador, nos meses de dezembro a fevereiro, marcando os períodos secos e chuvosos na zona equatorial.

A ZCIT insere-se na região equatorial onde ocorrem marcantes interações atmosféricas e oceânicas: 1) zona de confluência dos ventos alíseos (ZCA); 2) zona da depressão equatorial; 3) zona de máxima temperatura da superfície do mar; 4) zona de máxima convergência de massa; e 5) banda de máxima cobertura de nuvens convectivas (Ferreira, 2002).

Enquanto o movimento da ZCIT produz uma variação sazonal, o resultado das variações ocorridas devido aos fenômenos El-Niño/La Niña afeta a precipitação e conseqüentemente a descarga média dos rios, em escalas temporais variadas. Alguns estudos mostram que os grandes rios tropicais teriam alta probabilidade de uma baixa descarga durante o evento de El-Niño e alta descarga nos períodos de La-Niña, correlacionáveis aos eventos de inundação e de seca em grandes rios como o rio Yangtze na China (TONG *et al.* 2006).

Zhang *et al.* (2007) observou que a vazão no estuário Changjiang (rio Yangtzé) aumenta em abril, atingindo o seu máximo em Julho, e também o transporte de sedimentos aumenta de forma semelhante, mas com um atraso de 2 meses, atingindo o seu máximo em setembro, no fim da estação das cheias.

A distribuição mensal da precipitação na região no período de 2012 a 2013 apresentou valores abaixo da normal climatológica, com a ocorrência de dois períodos distintos, um mais chuvoso de dezembro a junho e outro menos chuvoso, nos demais meses do ano.

No período menos chuvoso houve redução das chuvas no total mensal da precipitação, chegando a zero nos meses de Agosto a Novembro, identificando assim um ano atípico (valores afastados da média) na região de acordo com a série temporal histórica, exceto em Belém. Essa distribuição das chuvas deve-se principalmente a atuação irregular dos principais sistemas meteorológicos presentes nesse período (RPCH, 2012 e 2013), figura 2.

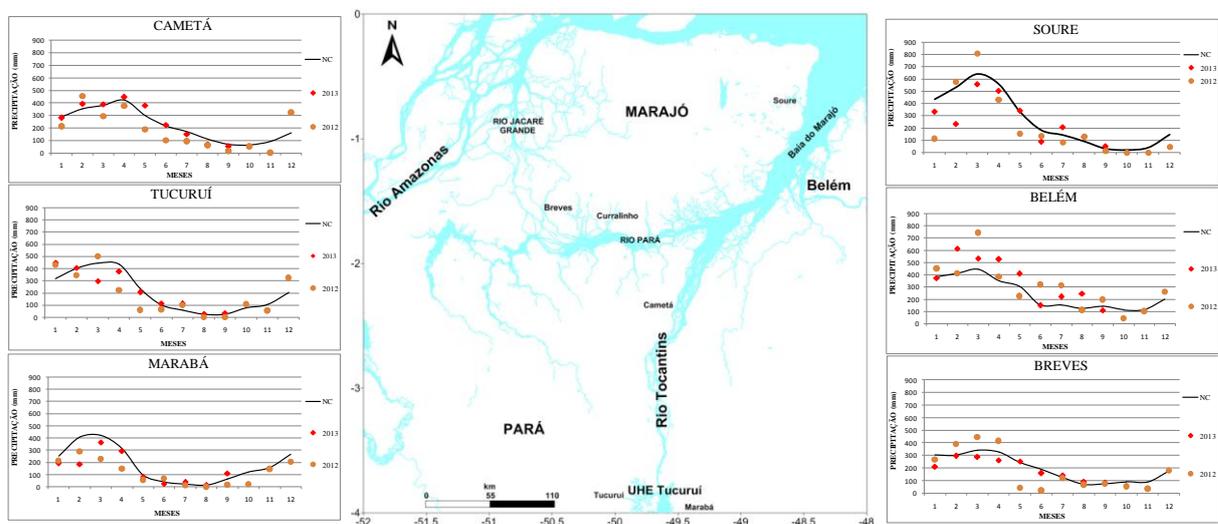


Figura 2: Precipitação Acumulada mensal e a normal climatológica de cada estação (INMET, 2013).

De acordo com Aragão *et al.* (1996), a duração dos períodos de seca e enchente vão depender do período de atuação, intensidade e cobertura do ENSO e do Dipolo do Atlântico (figura 3). Porém quando o evento ENSO é extremo (El Niño ou La Niña), este determina o padrão de chuvas ou de seca na região. Desse modo, as flutuações interanuais na precipitação são devidas principalmente ao comportamento da TSM (Temperatura da superfície do Mar) nos dois oceanos tropicais, Pacífico (ENSO) e Atlântico (Dipolo) com dois modos principais:

- Pacífico positivo (Pacífico quente) e Dipolo negativo (Atlântico Sul frio e Atlântico Norte quente) correspondendo a episódios de seca;
- Pacífico negativo (Pacífico frio) e Dipolo positivo (Atlântico Sul quente e Atlântico Norte frio) correspondente a anos com excesso de chuva. Porém nem toda vez essa relação ENSO e Dipolo Atlântico é verdadeira.

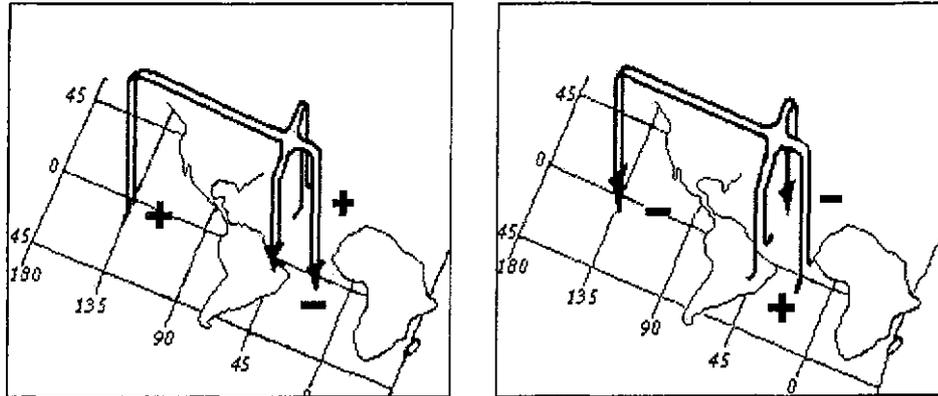


Figura 3: Esquema das anomalias das circulações em relação com a TSM (ARAGÃO *et al.* 1996).

A ZCIT e o ENSO atuam no padrão de precipitação na região, sendo que nesse período houve alternâncias ou indefinição de um sistema de (pequenos episódios) de *El Niño* ou *La Niña*, evidenciando fenômenos de baixa intensidade (RPCH, 2012 e 2013), podendo possivelmente o dipolo do Atlântico, contribuído pela baixa precipitação na região.

De acordo com a precipitação na região, o mês de junho varia de 100 a 260 mm e o mês de novembro de 40 a 140 mm. A precipitação acumulada anual da região fica entre 1850 e 3050 mm (INMET, 2012), sendo que ocorre uma defasagem entre o máximo da precipitação e o da vazão, ocorrendo primeiramente o máximo da precipitação entre março e abril e depois de um a dois meses ocorre o máximo da vazão entre maio e junho (figura 4).

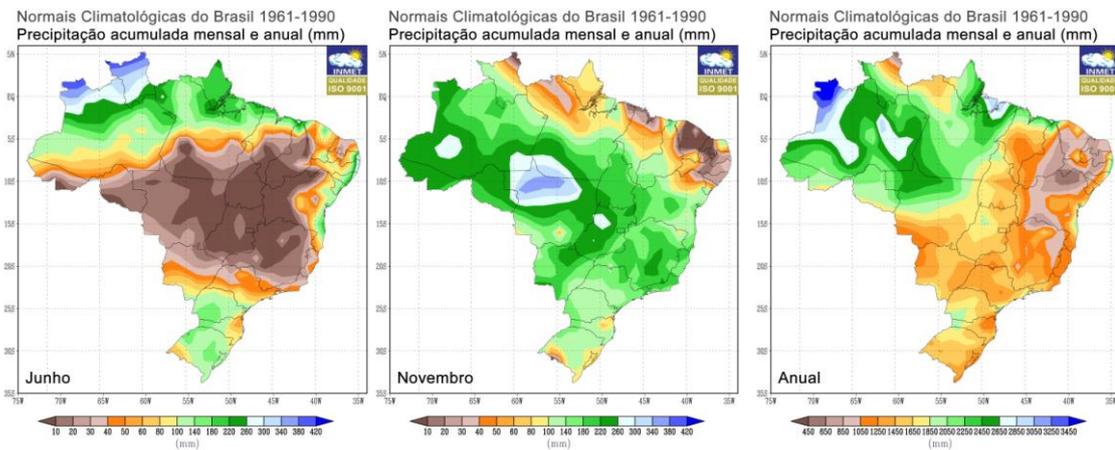


Figura 4: Precipitação acumulada de Junho, Novembro e a anual com base na Normal climatológica (INMET, 2012).

Observa-se pelos gráficos, que no mês de Novembro, período seco, o regime hidrológico da área muda, com menores taxas hídricas; contudo, há forte influência dos alísios de sudeste, com velocidades de 0,5 a 4,5 m/s. No mês de Junho, que é um período caracterizado pelas altas taxas de descarga hídrica e sedimentar, a atuação dos ventos alísios de nordeste com velocidades de 0,5 a 2,5 m/s (INMET, 2012), e a variação das velocidades e

das direções dos ventos se dá principalmente, pelo deslocamento da ZCIT que determina e controla os ventos, entre os hemisférios norte e sul (figura 5).

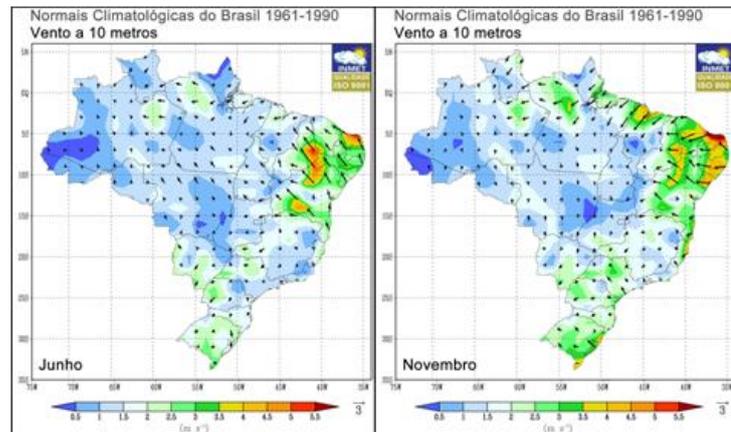


Figura 5: Direção do vento em Maio e Novembro com base na Normal climatológica (INMET, 2012).

A hidrodinâmica (vazão, velocidade do fluxo, direções das correntes) e as condições climáticas são importantes para avaliação do ambiente de modo geral, principalmente na região amazônica que é influenciada pelas forçantes climáticas: ventos alísios (nordeste e sudeste) e altas taxas de precipitações. O conjunto dessas relações, hidrodinâmicas e climáticas, associada aos agentes ambientais, refletem toda a complexidade do sistema amazônico.

A ação dos ventos interage no ambiente dinamizando os processos costeiros e amplificando os processos de carreamento, transporte de sedimentos e velocidade das correntes de marés para as regiões mais distais do rio.

1.2 GEOLOGIA DA ÁREA

A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Tocantins compartimentada no embasamento cristalino Pré-Cambriano (Escudo do Brasil Central) e a Bacia Sedimentar do Amazonas recoberta por depósitos terciários (Formação Barreiras), quaternários (Sedimentos Pós-Barreiras) formados em ambiente marinho-raso a transicional e depósitos aluvionares recentes (MANTELLI & ROSSETTI, 2009), figura 6.



Figura 6: Geologia da área, modificado de Mantelli, L. R & Rossetti, D. F. (2009).

A evolução da área é complexa, pois engloba dois sistemas: o rio Amazonas que não é um rio originado por falha, e sim resultante de um mar, um profundo golfo, encaixado entre dois escudos cristalinos: um ao norte (Escudo das Guianas) e outro ao sul (Escudo do Brasil Central), sendo fechado pelo Escudo Africano que, nessa época, ainda não havia sido separado da América do sul (CUNHA E PASCOALATO, 2006).

A bacia do Tocantins está localizada inteiramente na província geológica da Amazônia Oriental e é caracterizada por dois grandes domínios geológicos: embasamento cristalino, constituído por rochas ígneas, meta-sedimentos e cobertura sedimentar, constituída por sedimentos que se depositaram durante o período Mesozóico e Cenozóico (Terciário e Quaternário). Sendo dividida em três unidades de relevo: Planalto Setentrional Pará-Maranhão, Planalto Rebaixado do Amazonas e Depressão Periférica do Sul do Pará. Essa última abrange quase totalmente a área do reservatório. Sua origem está relacionada à atuação de processos erosivos, iniciados no fim do período Terciário. Apresentam várias formas de relevo na região, destacando-se áreas com superfície pediplanadas, áreas dissecadas em colinas de topo aplainado e planícies fluviais (COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS, 2000).

No estreito de Breves, de acordo com Ab'Sáber (2010) as observações feitas a partir de imagens de satélites e cartas topográficas detalhadas puderam caracterizar a região como um

delta, sendo um *Finger Delta*: ou seja, um delta de múltiplos braços terminais intercalados por diversos canais alongados.

1.3 PROCESSOS SEDIMENTARES

O transporte sedimentar está relacionado com movimentos dos sedimentos em suspensão ou como carga de fundo. Esse transporte pode ser dividido em transporte de fundo (saltação, rolamento e arrasto) e transporte em suspensão, sendo controlados e modificados por processos difusivos, gravitacionais e advectivos, como a granulometria do sedimento, densidade do fluido e velocidade da corrente, além das formas de fundo, a concentração de sedimentos coesivos e influências biológicas (NITTROUER & WRIGHT, 1994).

Segundo Dyer (1995), em estuários podem ser descritos três tipos de transporte de sedimentos finos: a carga de lavagem (*wash load*), a suspensão (*suspension*) e a carga de fundo (*bed load*). A carga de lavagem corresponde ao movimento do sedimento fino, o qual se move verticalmente sob qualquer velocidade da corrente incidente, e são dificilmente depositados, sobretudo pela ação da força da gravidade ou pela atuação de mecanismos de agregação de partículas (ácidos orgânicos). O transporte por suspensão descreve o movimento do sedimento que foi erodido do fundo e colocado em suspensão, devido à troca de *momentum* entre as correntes de fundo e os sedimentos. O transporte como carga de fundo depende da granulometria do sedimento. Para os sedimentos finos o transporte de fundo acontece como lama fluída, que tem sua origem relacionada à floculação e a deposição de sedimentos finos no núcleo da zona de turbidez máxima.

Diversos fatores naturais e antrópicos contribuem para que as partículas sedimentares estejam em suspensão nas regiões costeiras, como aportes fluviais e eólicos, erosão da costa, dragagem e atividade pesqueira (PATHITIS & COLLINS, 2005). Além disso, muitos processos físicos atuantes nos corpos d'água, isto é, correntes de maré, velocidade orbital das ondas, correntes originadas pelo vento, plumas de sedimentos, correntes de densidade e ondas internas, são responsáveis pela ressuspensão, transporte e dispersão do sedimento.

No entanto, os processos físicos que ocorrem junto ao fundo, ou seja, a interação entre o fluxo (unidirecional ou bidirecional) e o sedimento de fundo possui maior significância em termos do transporte de sedimento. Devido a esta interação, uma força de fricção é exercida por ondas e correntes no fundo através da camada limite. Uma vez que a velocidade crítica de movimentação do grão ou de erosão do fundo é excedida, o transporte de sedimento ocorre. Este transporte é uma resposta à troca de *momentum* ($p = m \cdot v$) entre o sedimento e o escoamento, onde m é massa e v é velocidade.

O transporte líquido de sedimento em suspensão nos estuários é controlado principalmente pelo transporte resultante das correntes, em decorrência das diferentes características relacionadas aos processos de deposição e ressuspensão dos sedimentos com diferentes granulometrias. Os sedimentos mais finos precisam de ambientes com pequenas intensidades de corrente para se depositarem, enquanto que os sedimentos de maiores granulometrias se depositam em maiores velocidades. No entanto, quando os sedimentos mais finos estão depositados, eles precisam de correntes mais intensas para possibilitar a sua ressuspensão, devido às propriedades coesivas das argilas (DYER, 1997).

1.4 FONTE DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO

1.4.1 Rio Tocantins

O rio Tocantins é um rio de planalto, com águas límpidas e hidrodinâmica bastante modificada em virtude da instalação de represas, de pequeno e grande porte, ao longo de seu curso. Essas represas comportam-se como filtros, alterando assim os padrões de sedimentação ao longo do rio, uma vez que os sedimentos que anteriormente circulavam livremente passam a ser retidos nas represas.

A água proveniente da barragem caracteriza-se por potencial erosivo sobre o canal, isto é, sobre seu leito e suas margens, até que seja produzido um novo ajustamento às novas condições. Segundo Meade (1999), normalmente as trocas de sedimento entre os canais e as planícies aluviais, em rios extensos, pode estocar e re-mobilizar quantidades de sedimento maiores que o aporte final, líquido, em estuários.

De acordo com Santos e Silveira (2012), no baixo Tocantins, de Tucuruí até a foz, a granulometria dos sedimentos é composta por cascalhos, e areias muito grossas, grossas, média, fina até chegar à zona de confluência com o rio Pará onde ocorre a fração silte, sendo que nas proximidades da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) foi possível verificar a presença de fundo rochoso. As autoras relatam ser improvável que o silte encontrado na região de confluência seja oriundo do Baixo Tocantins, segundo elas os principais motivos que corroboram para este fato são a geologia da área e a presença da UHT.

Segundo William & Wolman (1985), a capacidade de retenção de sedimentos pelas barragens é da ordem de 95%. Dessa maneira, mesmo que do outro lado da UHT haja sedimentos finos, como o silte, a barragem não permite que estes sejam transportados em quantidade suficiente para o outro lado, este fato torna difícil a deposição de silte e/ou argila na área, conforme mostra Lima *et al.* (2004) para a bacia Araguaia-Tocantins (figura 7). Sendo assim, a geologia da área associada à ação antrópica não torna favorável à presença de

silte, a não ser que seja de origem externa, na região do baixo Tocantins (SANTOS E SILVEIRA, 2012).

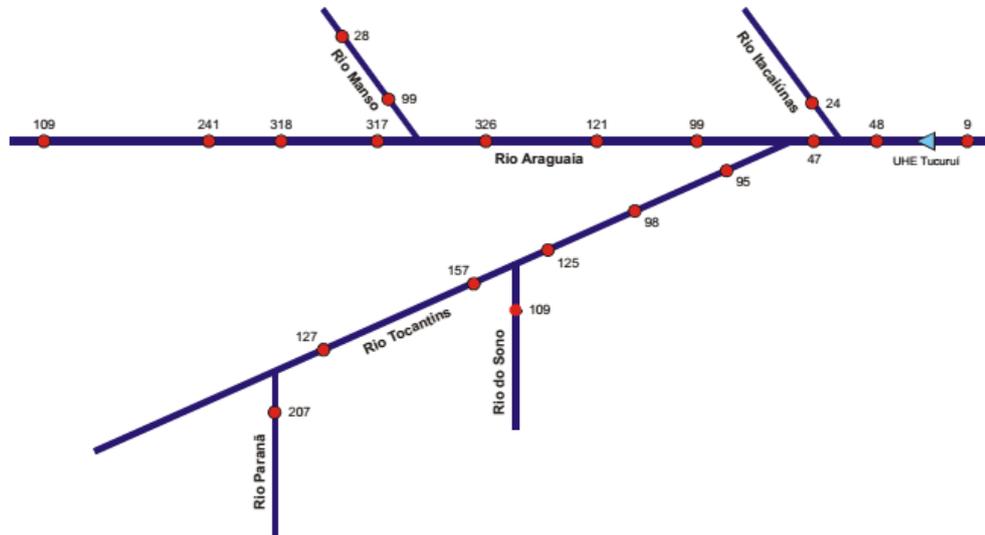


Figura 7: Médias de MPS das principais estações hidrossedimentométricas da Bacia Araguaia - Tocantins no período 1981-1998 (mg.L-1). Fonte Lima *et al.* (2004).

Então, a maior parte do fluxo de MPS na foz do rio Tocantins é, possivelmente, proveniente da própria foz do rio Tocantins e da região entorno (baía de Marapatá, rio Pará e baía do Marajó). O transito dos sedimentos na foz desse rio é semelhante a um ciclo onde, no período seco ocorre a deposição na região do baixo Tocantins, enquanto que no período chuvoso com o aumento das correntes os sedimentos outrora depositados são remobilizados e reinseridos ao fluxo do rio, e transportados rio afora.

1.4.2 Rio Jacaré Grande e rio Pará

O rio Jacaré Grande, assim como o rio Pará não é necessariamente um rio, mas sim elo de conexão entre corpos de massas d'águas. O aporte sedimentar dessa região é vasto, sendo compostas pelo Grupo barreiras, coberturas detrito-laterítica Pleistocênica e Paleogênica, aluviões e terraços holocênicos, que contém grandes quantidades de material fino. Esses rios drenam terrenos mistos formados por um sistema complexo, favorecendo o transporte de sedimentos de diferentes origens e processos. Como os sólidos em suspensão provêm do carreamento de solos pelas águas pluviais, devido a esse transporte, e aos processos erosivos e desmatamentos na bacia, e outras inúmeras ações antrópica, esses rios recebe um grande aporte de sólidos em suspensão.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar a contribuição fluvial e o transporte de material particulado em suspensão (MPS) para a baía do Marajó através dos rios Jacaré Grande (rio Amazonas), Pará e Tocantins.

2.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Quantificar o material particulado em suspensão no período seco e chuvoso;
- ✓ Determinar o transporte resultante de volume e de MPS, e o principal contribuinte;
- ✓ Verificar a influência das correntes de maré na dinâmica temporal e espacial da concentração de sedimentos em suspensão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As coletas de dados foram realizadas em duas campanhas, no período seco (Nov/2012, Quadratura) e período chuvoso (Jun/2013, Sizígia), em marés diferenciadas dificultando uma análise direta em virtude de uma maior ou menor intrusão marinha. As amostragens do período seco foram realizadas nos dias 05/11/12 (Rio Jacaré Grande), 08/11/12 (Rio Pará) e 09/11/12 (rio Tocantins) e do período chuvoso nos dias 21/06/13 (Rio Jacaré Grande), 23/06/13 (Rio Pará) e 24/06/13 (rio Tocantins). Em todas as coletas foram instalados marégrafos para correlação com os demais dados e retirada às componentes harmônicas no software Sisbahia® de uma serie longa de quatro e cinco meses instalado na região, durante a transição seco-chuvoso.

No rio Jacaré Grande a seção analisada tem uma largura média de 2 km e uma profundidade média de 15 m. O tempo médio de cada seção nos dois períodos foi de 20 minutos, totalizando 35 seções no período seco e 36 no período chuvoso. A direção do rio obedece à orientação nor-nordeste (vazante) – su-sudoeste (enchente), figura 8.

O rio Jacaré Grande foi analisado como um único canal em relação à hidrodinâmica em virtude de sua morfologia e dimensão, e também não houve diferença de velocidade entre as margens que se justifica a divisão do rio em setores.

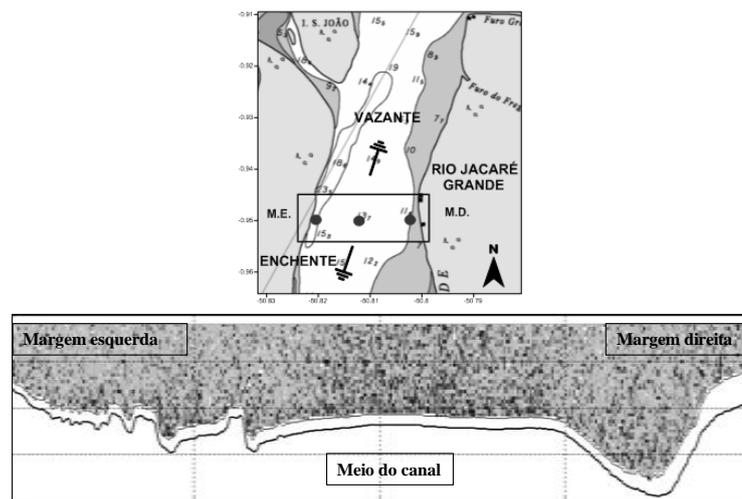


Figura 8: Mapa de localização com os pontos de coleta (água e turbidez) e perfil geomorfológico (ADCP) do rio Jacaré Grande.

No rio Pará a seção analisada tem uma largura média de 8 km e uma profundidade média de 12 m. O tempo médio de cada seção nos dois períodos foi de 40 minutos, totalizando 16 seções no período seco e 17 no período chuvoso. A direção do rio obedece à orientação leste (vazante) – oeste (enchente), figura 9.

O rio Pará após previa análise foi compartimentado em três canais com base na sua geometria, sendo escolhidos os principais canais, e também houve diferença de velocidade entre as margens e o meio que justificou divisão e mais análise da seção completa.

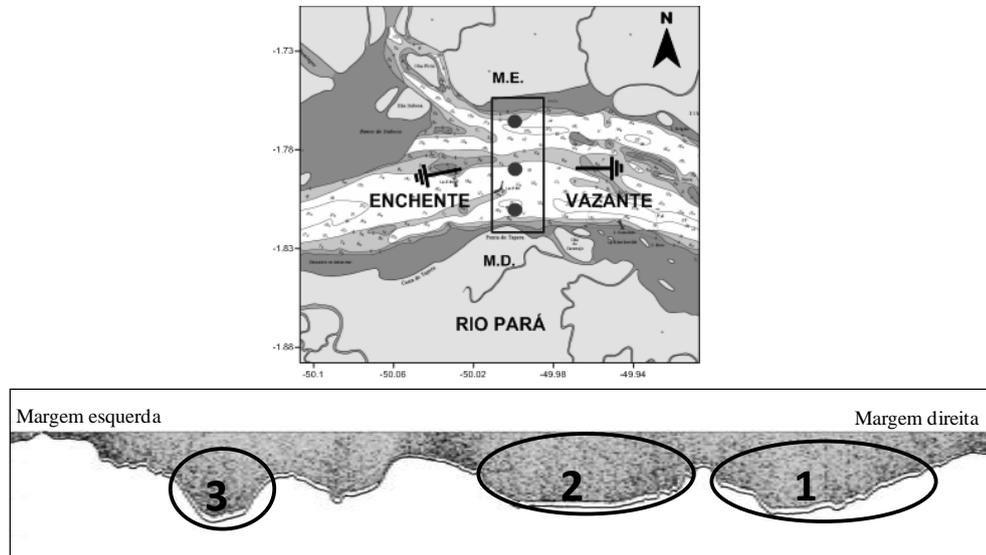


Figura 9: Mapa de localização com os pontos de coleta (água e turbidez) e perfil geomorfológico (ADCP) do rio Pará.

No rio Tocantins a seção analisada tem uma largura média de 15 km e uma profundidade média de 10 m. O tempo médio de cada seção de medição nos dois períodos foi de 1 hora e 30 minutos, totalizando 9 seções no período seco e 10 no período chuvoso. A direção do rio obedece à orientação nordeste (vazante) – sudoeste (enchente), figura 10. Assim como o anterior, o rio Tocantins também foi compartimentado em três canais e mais análise da seção completa.

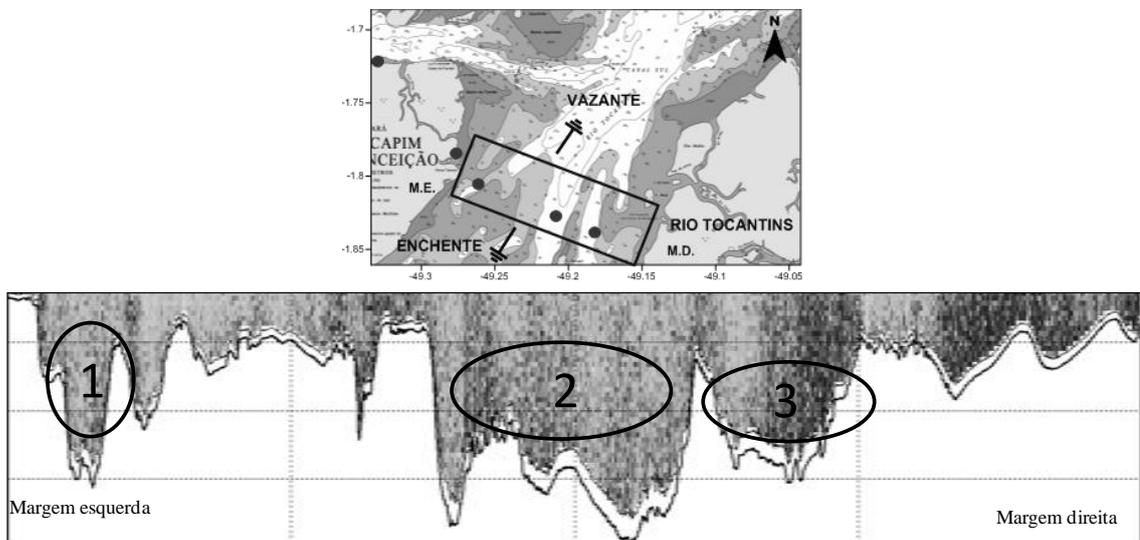


Figura 10: Mapa de localização com os pontos de coleta (água e turbidez), perfil geomorfológico (ADCP) do rio Tocantins e os pontos do marégrafo (rio Pará e Tocantins).

3.1 PERFILAGENS

3.1.1 Perfilador acústico de corrente (ADCP)

Para a caracterização do padrão de circulação foram coletados dados de vazão, direção e intensidade da corrente durante um ciclo de maré com uso de um perfilador acústico de corrente (*Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP*) modelo *workhorse monitor (600 kHz)* Teledyne, RD Instrument (Tabela 1). Este equipamento é composto por uma sonda, com quatro transdutores, que transmite os dados para um notebook através de um software específico, o WinRiver I, que oferece modos de configuração e visualização do dados do ADCP. Este recebe e armazena os dados e os disponibiliza na forma de gráficos, tabelas e inúmeras extensões para tratamento em outros programas.

A figura 11 mostra um esquema de funcionamento do ADCP, que transmite ondas sonoras através da água em frequência pré-estabelecida, permite a leituras dos parâmetros de vazão, velocidade e direção. A obtenção destas informações são possíveis devido às partículas sólidas em suspensão na coluna d'água, que refletem o som e detectado por um dos seus transdutores. Os cálculos são feitos baseados no efeito Doppler, feito através da movimentação das partículas em suspensão. Como o material em suspensão se desloca na mesma velocidade que da coluna d'água, medindo-se a frequência dos ecos que retornam do material em suspensão e comparando com a frequência do som emitido, o ADCP determina a velocidade da partícula que é a mesma da corrente da água (figura 12).

A vazão fornecida pelo ADCP é estimada, pois existem lacunas na faixa superficial e próxima ao fundo, linha vermelha (figura 11), onde o equipamento não consegue medir. A medição próxima as margens é estimada a partir de uma série de medições (10 medições) que é interpolada até a margem, pelo método triangular que considera a morfologia do canal igual a um triângulo.

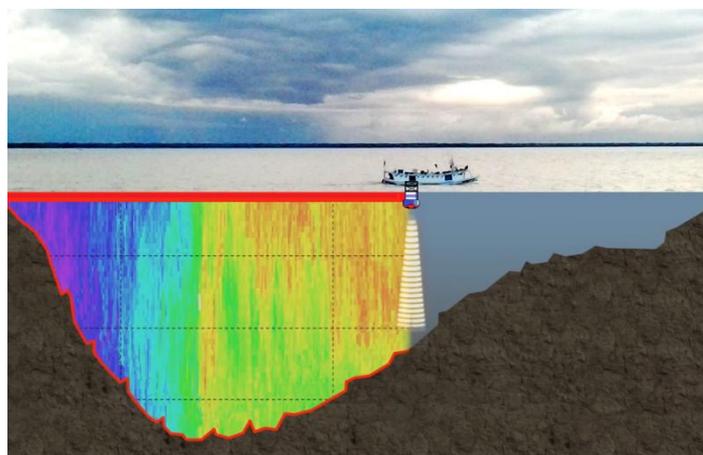


Figura 11: Esquema de funcionamento do ADCP (PRESTE, 2013).

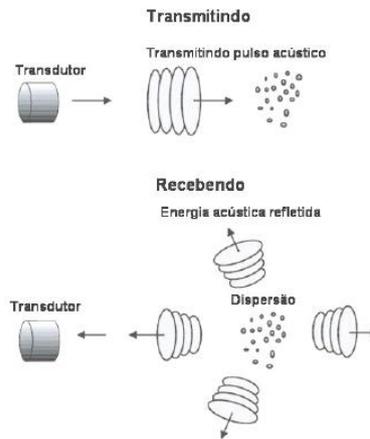


Figura 12: Transmissão e dispersão de um pulso acústico (Simpson, 2001).

Tabela 1: Configuração do equipamento ADCP utilizada na aquisição dos dados.

Equipamento	ADCP - RD Instrument ®(Workhorse Rio Grande)
Configuração	
Perfil	Banda Larga (Padrão)
Frequência	600 KHz
Orientação	Para baixo
Modo	Bottom Tracking'
Distância da Superfície até o 1º Beam	1.34 m
Padrão do Beam	convexo
Nº de Beam	4
Blank	0.25 m
Tamanho da célula	0.5 m
Nº de células	67

Todos os levantamentos realizados com ADCP foram efetuados com o equipamento acoplado a uma embarcação, realizando seções de margem a margem por 13 h, durante um ciclo de maré semidiurna.

3.1.2 Turbidez

A turbidez é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessar a coluna d'água. Esta redução se dá por absorção e espalhamento, uma vez que as partículas que provocam turbidez nas águas são maiores que o comprimento de onda da luz branca, devido à presença de sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e de detritos orgânicos, algas e bactérias, plâncton em geral, etc.

O princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na emissão de um feixe luminoso e na detecção da luz refletida pelas partículas em suspensão ou diferença de intensidade entre a luz emitida e recebida, a qual é convertida em sinal elétrico.

Foram feitos registros de turbidez com sensor Infinity-turbi ATU75W-USB. Esse sensor é calibrado com um algoritmo interno, que relacionam a quantidade de luz

retroespalhada no infravermelho pela água, com as concentrações equivalentes de partículas calibradas de fábrica. A precisão do aparelho é dada para altas e baixas concentrações, para baixas concentrações é aconselhável usar em FTU, Formazine Turbidity Unit, (precisão de $\pm 0,3$ FTU ou $\pm 2\%$ e intervalo de medição 0-1000 FTU) e para altas concentrações em ppm (precisão de ± 10 ppm ou $\pm 5\%$ e intervalo de medição 0-100.000). A unidade de turbidez usada neste trabalho é a FTU.

3.1.3 Quantificação do material particulado em suspensão (MPS)

Para determinação da concentração do material particulado em suspensão (MPS) foi realizado amostragem de água em superfície e fundo com uso de uma garrafa tipo Van Dorn, em três pontos em cada secção de amostragem, durante um ciclo de maré nos períodos seco e chuvoso, totalizando 6 amostras por secção em intervalos de 1 hora. No rio Jacaré Grande foram feitas 54 amostragens, no rio Pará 48 e no rio Tocantins 24, em cada período. O MPS foi determinado pelo método de gravimetria de volatização segundo Baumgarten *et al.* (1996).

Em laboratório, 250 mL das amostras foram filtradas através do filtro com uso de uma bomba a vácuo acoplada ao sistema de filtração, com filtros de fibra de vidro de 0,45 μm de poros e de 47 mm de diâmetro previamente pesados (P1). Após esse processo, o filtro contendo o material em suspensão e transferido, com uma pinça, para uma placa de Petry e seco a 50°C por duas horas em uma estufa. Em seguida, os filtros são transferidos para um dissecador e depois de duas horas, novamente pesados (P2).

A diferença entre os pesos dos filtros após (P2) e antes (P1) da filtração fornece o peso do material particulado em suspensão para um determinado volume dado em miligrama por litro (mg.L^{-1}).

3.2 PROCESSAMENTOS DOS DADOS

3.2.1 Correntes

Procurando uma melhor forma de extrair as informações de velocidade e direção do ADCP ponto a ponto para uma análise integrada ou quando isolada, o formato escolhido foi o arquivos t (formato.txt) do Winriver I, onde é gerado um arquivo com inúmeras informações (profundidade, direção, velocidade e etc.), tendo como uma das vantagens, poder quebrar a secção em várias partes e fazer uma análise integrada ou em partes dos canais ou margens. Os cálculos primeiramente foram feitos no Excel®, e posteriormente inserido numa rotina no Matlab®.

Para a área de estudo foi utilizado o referencial cartesiano ortogonal plano **Oxy**, onde o eixo **Ox** é orientado longitudinalmente e no sentido positivo estuário abaixo. Para cada estação, os vetores de velocidade e direção foram decompostos em componentes longitudinais (**u**) e transversais (**v**). De acordo com as orientações dos rios Jacaré, Pará e Tocantins convencionou-se que os valores positivos da componente longitudinalmente (**u**) está associada a corrente de vazante (jusante) e os negativos a corrente de enchente (montante).

A decomposição foi efetuada considerando a declinação magnética de cada área, para os anos 2012 (seco) e 2013 (chuvoso), sendo que normalmente a declinação magnética é inserida na configuração do ADCP. Na decomposição do vetor velocidade em componente longitudinal e transversal, em relação ao referencial Oxy, seguiu as relações trigonométricas:

$$u = |\mathbf{V}| \cdot \cos \theta \rightarrow \text{componente longitudinal}; \quad (1)$$

$$v = |\mathbf{V}| \cdot \sin \theta \rightarrow \text{componente transversal}; \quad (2)$$

Onde θ é expresso como:

$$\theta = 90^\circ - (dd \pm D) \pm d; \quad (3)$$

Onde:

D: é a declinação magnética (ângulo entre o norte verdadeiro e o magnético), o sinal negativo indica declinação para oeste e o positivo para leste.

dd: é o ângulo entre o eixo norte magnético e o vetor velocidade **V**, em sentido horário.

d: rotação do canal: é o ângulo correspondente a rotação horária (+) ou anti-horária (-) necessária para que o eixo Ox oriente-se longitudinalmente ao canal.

A subtração dos demais ângulos pelo ângulo de 90° indica a mudança de referencial, do eixo das abscissas para o eixo das ordenadas. Detalhes sobre o procedimento para a correção e decomposição das velocidades de corrente foram descritos por Miranda *et al.* (2002), figura 13.

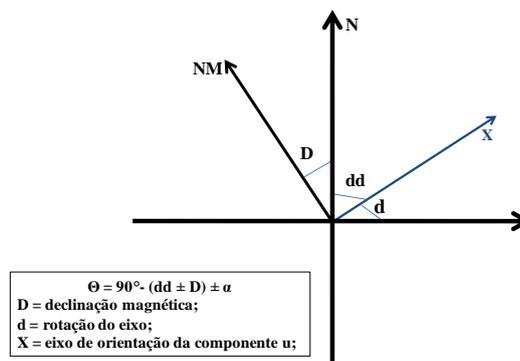


Figura 13: Decomposição das velocidades de corrente segundo Miranda *et al.* (2002).

Ao final de todo esse procedimento foram feitas médias espaciais e temporais de cada seção e também dos canais individualizados apenas da componente u ($u \gg v$) e as profundidades dimensionais (z) foram transformadas em profundidades adimensionais (Z) [$Z=z/h(t)$] para minimizar os erros das interpolações em virtude dos efeitos da ação da maré e das variações morfológicas nos locais de amostragens para geração dos gráficos. A profundidade adimensional zero (0) e menos um (-1), correspondem à superfície e ao fundo, respectivamente.

As médias no espaço (\bar{P} indica a média no espaço) e no tempo ($\langle P \rangle$ indica a média tempo) das propriedades escalares foram usadas para calcular a média de uma determinada propriedade (velocidade, MPS ou Turbidez) em profundidade e/ou distância para obtenção de um único valor, sendo denotadas genericamente por $P=P(Z,t)$, onde foram obtidas por meio da seguinte equação:

$$P = \frac{1}{n} \left(\frac{P(Z_j, t_0)}{2} + \sum_k P(Z_j, t_k) + \frac{P(Z_j, t_n)}{2} \right); (4)$$

3.2.2 Turbidez e Quantificação do material particulado em suspensão

Os dados dos perfis verticais de turbidez e da quantificação do MPS gerados foram tabelados, processados e apresentados em gráficos para análise de sua distribuição espacial e temporal. As profundidades dimensionais (z) foram transformadas em profundidades adimensionais (Z) [$Z=z/h(t)$], referente aos dados de turbidez.

No rio Pará durante o período seco, os dados dos perfis de turbidez para o período das 13 às 19h foram perdidos devido a problemas técnicos com o equipamento de amostragem.

3.2.3 Transporte de Volume

O transporte de volume (Tv) foi realizado a partir das equações de fluxo e transporte de propriedades para um perfil vertical (h) conhecido numa seção transversal de Miranda *et al.* (2002).

$$Tv = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u}(t) h(t) dt = \langle \bar{u} h \rangle; (5)$$

Substituindo na equação 5 o $h(t)$ pelo $A(t)$, temos a nova equação de transporte de volume (Tv) usada nesse trabalho para uma seção transversal de um rio:

$$Tv = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u}(t) A(t) dt; (6)$$

Onde;

$\bar{u}(t)$ = velocidade longitudinal média;

$A(t)$ = área total da seção (m^2);

dt= tempo ao longo do ciclo de maré.

A equação 7 determina do transporte de volume através de uma superfície arbitrária realizada pelo ADCP, foi desenvolvida por Gordon, (1989); Simpson e Oltmann, (1990).

$$\int \int_s V_f \cdot n \, ds \, dt = |V_b| \, dz \, dt ; (7)$$

Onde;

ds = área diferencial.

V_f = Média velocidade da água;

n = vetor unitário da seção de medição do ADCP;

dz = profundidade diferencial;

dt = tempo diferencial;

V_b = Velocidade média do barco.

O transporte de volume resultante compreenderá um ciclo de maré, dado em metros cúbicos por ciclo de maré (m^3/cm), mostrando se houve importação ou exportação na área.

3.2.4 Transporte de Sedimento

3.2.4.1 Método 1

O transporte de sedimentos em suspensão em toneladas por dia (Q_{SS}) pode ser calculado segundo Colby (1957) a partir da seguinte equação:

$$Q_{SS} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{SS}; (8)$$

Onde:

0,0864 = fator de conversão de tonelada por dia;

Q = transporte de volume (m^3/s);

C_{SS} = concentração de sólidos em suspensão ($mg.L^{-1}$);

Para obtenção do transporte de sedimento em suspensão (Q_{SS}) foi modificado o método simplificado de Colby (1957), incluindo a ação da maré diferente da equação original que está relacionada há um movimento unidirecional, onde foi considerando que o sedimento se movimenta com a velocidade da corrente em toda a seção transversal, ficando igual ao produto do transporte de volume pela concentração de MPS e incluindo o tempo de ação da maré enchente ou vazante, através da seguinte equação.

$$Q_{SS} = t (f \text{ ou } e) \cdot Q \cdot C_{SS} / 10^6; (9)$$

Onde:

10^6 = fator de conversão de miligramas para toneladas;

Q_{SS} = transporte de sedimento em suspensão (t/e ou t/v);

t= tempo de enchente ou vazante da medição (em segundos);

Q = transporte de volume da + f (enchente ou flood) ou - e (vazante ou ebb) (m^3/s) _ ADCP;
 C_{SS} = média da concentração de sólidos em suspensão ($mg.L^{-1}$) da f ou e .

Depois de calcular o transporte de MPS na enchente e na vazante, calculou-se o transporte resultante para um ciclo de maré, converteu-se a unidade do transporte de sedimento para toneladas por ciclo de maré (t/cm), e o transporte resultante através da seguinte formula:

$$R_{QSS} = - Q_{SS} (e) + Q_{SS} (f); (10)$$

3.2.4.2 Método 2

O transporte de MPS, assim como o transporte de volume foi adaptado a partir das equações de fluxo e transporte de propriedades de Miranda *et al.* (2002). Neste trabalho foi convencionado que os valores de velocidades que adentram o rio são negativos, e rio afora, positivo, relação esta mantida para o cálculo do transporte. A unidade do transporte de sedimento foi convertida para toneladas por ciclo de maré (t/cm), calculando-se posteriormente o transporte resultante de MPS, com uso da seguinte equação.

$$Q_{ss} = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u} [C_{ss}] A 10^6 dt; (11)$$

Onde:

10^6 = fator de conversão de miligrama para tonelada;

\bar{u} = velocidade longitudinal média no tempo e no espaço;

t = tempo de duração da seção da vazante e da enchente em segundos;

A = área total da seção (m^2);

C_{SS} = média no tempo da concentração de sólidos em suspensão ($mg.L^{-1}$) da enchente ou vazante.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 HIDRODINÂMICA

A zona costeira amazônica é altamente dinâmica, sendo difícil estabelecer um padrão para a região, pois a cada período seco ou chuvoso tem um diferencial na região, como a associação do transporte fluvial com a maré formando um sistema complexo dependente de inúmeros fatores.

Os regimes fluviais tropicais são controlados pela variação na precipitação, sendo este influenciados pelo ENSO (LATRUBESSE *et al.* 2005) e pela ZCIT, conseqüentemente os ecossistemas costeiros a eles associados.

Por essas indicações é considerando a dinamização do ambiente perante as interferências o qual está sujeito é a importância da área de estudo, se faz necessário o conhecimento dos processos hidrodinâmicos, morfodinâmicos e geoambientais da área, informações estas imprescindíveis para um monitoramento ambiental da área.

A região costeira amazônica no primeiro semestre é caracterizada pelas altas taxas de descarga hídrica e sedimentar, atuação dos ventos alísios de nordeste com velocidades de 0,5 a 2,5 m/s, e o período de maior troca de substâncias no sistema rio-mar. No segundo semestre, o regime hidrodinâmico da área muda, com menores taxas hídricas; contudo, a forte influência dos ventos sudeste, com velocidades de 0,5 a 4,5 m/s (INMET, 2012).

O transporte de volume de um rio é o volume de água que passa através de uma seção transversal por unidade de tempo, em m³/s. O método acústico de vazão (ADCP) tem sido empregado na região amazônica desde 1994 com o projeto HIBAM (Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica - ANA) que realizou dezenas de campanhas e que gerou diversos trabalhos científicos.

4.1.1 Análises dos dados hidrodinâmicos

4.1.1.1 Transporte de volume Instantâneo

A sazonalidade é um fator determinante para o regime hidrológico da região Amazônica, assim como para toda planície. No período de janeiro a junho, as condições hidrológicas (fluviais e pluviais) atingem altas taxas, proporcionando um acréscimo no nível de base (nível médio) que influencia nos pulsos de inundação da região, ocasionando uma expansão das áreas de inundação.

Conforme a tabela 2 observou-se que as áreas da seção dos rios aumentaram 4,5%, 2,7% e 3,6%, e conjuntamente a largura da seção também aumentou 1,1%, 1,5% e 5,3%, respectivamente nos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins.

Tabela 2: Área das seções de medições no período seco e chuvoso.

Local	Período Seco		Período Chuvoso	
	Área Total (m ²)	Largura da Seção	Área Total	Largura da Seção (m)
Rio Jacaré Grande	41.091,1	2.422,8	43.007,1	2.450,8
Rio Pará	100.079,2	7.758,5	102.830,3	7.879,5
Rio Tocantins	169.655,1	15.053,5	176.068,0	15.903,8

O transporte de volume instantâneo e a intensidade da corrente para os rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins é apresentado na tabela 03, como máximo, mínimo e a média na enchente e na vazante no período seco e chuvoso. Teoricamente o mínimo deveria ser zero que indicaria estofa, mas considerando que as leituras são instantâneas e as dimensões dos rios, sendo muito difícil registrar tal instante de estofa devido à movimentação da embarcação.

Tabela 3: Média do transporte de volume instantâneo (m³/s) e da intensidade da corrente (m/s).

Transp. Vol./ Int. da corrente		VAZANTE			ENCHENTE			
		Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima	
Período Seco	Rio Jacaré Grande	m ³ /s	-25.705,77	-18.816,58	-270,08	29.673,71	20.159,15	1.492,91
		m/s	0,69	0,50	0,01	0,77	0,50	0,02
	Rio Pará	m ³ /s	-56.102,67	-45.086,29	-16.303,91	56.267,12	32.325,90	5.629,15
		m/s	0,65	0,49	0,16	0,57	0,34	0,09
	Rio Tocantins	m ³ /s	-104.585,09	-85.064,38	-45.377,33	129.965,39	76.970,76	11.824,90
		m/s	0,67	0,54	0,32	0,75	0,45	0,09
Período Chuvoso	Rio Jacaré Grande	m ³ /s	-31.271,58	-21.973,71	-218,44	40.771,56	26.846,43	1.215,28
		m/s	0,82	0,56	0,00	0,98	0,65	0,03
	Rio Pará	m ³ /s	-73.456,79	-52.003,61	-3.462,22	62.642,21	46.740,60	26.046,58
		m/s	0,79	0,57	0,03	0,64	0,47	0,09
	Rio Tocantins	m ³ /s	-137.694,46	-102.671,75	-60.380,04	169.677,91	131.326,35	63.374,61
		m/s	0,80	0,62	0,33	0,93	0,72	0,34

O transporte de volume instantâneo foi maior durante o período chuvoso como mostra os máximos no rio Tocantins de 138.000 m³/s e 170.000 m³/s, no rio Pará de 73.456 m³/s e 62.642 m³/s e no rio Jacaré Grande de 31.271 m³/s e 40.771 m³/s, respectivamente durante a vazante e a enchente. No período chuvoso também se observou as maiores intensidades de velocidades, as quais variaram de acordo com a maré, sendo as velocidades máximas de 0,82 e 0,98 m/s no rio Jacaré, de 0,8 e 0,6 m/s no rio Pará e de 0,8 e 0,9 m/s no rio Tocantins, respectivamente durante a vazante e a enchente. No período seco as intensidades da corrente são menores, com perdas de 16 a 18% na vazante e na enchente a redução foi maior nos rios Jacaré Grande e Tocantins, com variações de 10 a 21%.

No período chuvoso houve um aumento da área da seção e consequentemente um maior transporte de volume, sendo confirmada por Matos (2009) na costa do Amapá na região

dos Lagos. Similarmente Medeiros e Kjerfve (2003); Dias (2007) encontraram a mesma tendência de domínio do transporte de vazante no período chuvoso nos estuários de Itamaracá e do Rio Jaguaribe, respectivamente.

4.1.1.2 Relação entre transporte de volume e variação da maré

O transporte de volume resultante durante o período seco no rio Jacaré Grande foi de -90.970,32 m³ em direção ao rio Amazonas, enquanto que no período chuvoso foi de 178.448,64 m³ em direção ao rio Pará. A curva de maré medida no rio Jacaré Grande no período chuvoso mostrou uma variação de 2,18 a 3,73 m, com uma altura de maré de 1,55 m, sendo medido em maré de sizígia que explica uma maior altura da maré. No período seco não houve medição de maré (figuras 14 A e B).

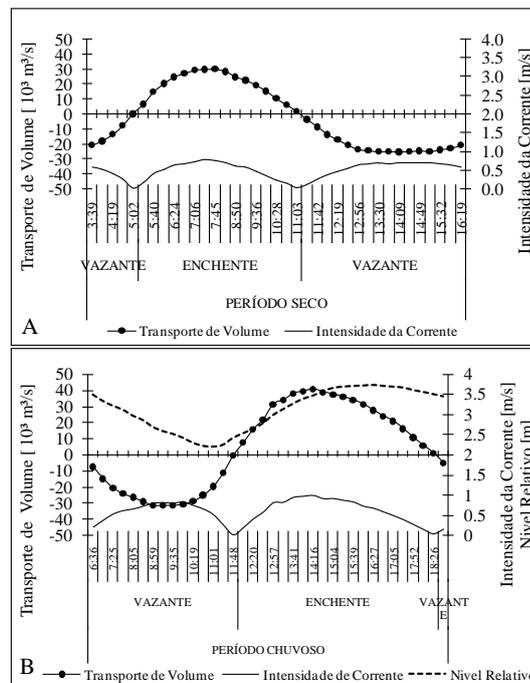


Figura 14: Transporte de volume, nível relativo de maré e velocidade no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Jacaré Grande.

O transporte de volume resultante no período seco no rio Pará foi de -63.540,165 m³ e no chuvoso foi de -159.100,99 m³ ambos em direção a baía de Marajó. A curva de maré medida no rio Pará, período seco, mostrou uma variação de 0,03 a 0,98 m, com uma altura de maré de 0,95 m e no período chuvoso a curva de maré variou de 0,69 a 1,78 m, com uma altura de maré de 1,08 m. Apesar da baixa diferença na altura de maré entre os períodos, esse acréscimo de 13 cm de quadratura para sizígia provoca grandes alterações biogeoquímicas na área e relevante no cálculo de prisma de maré (figura 15 A e B).

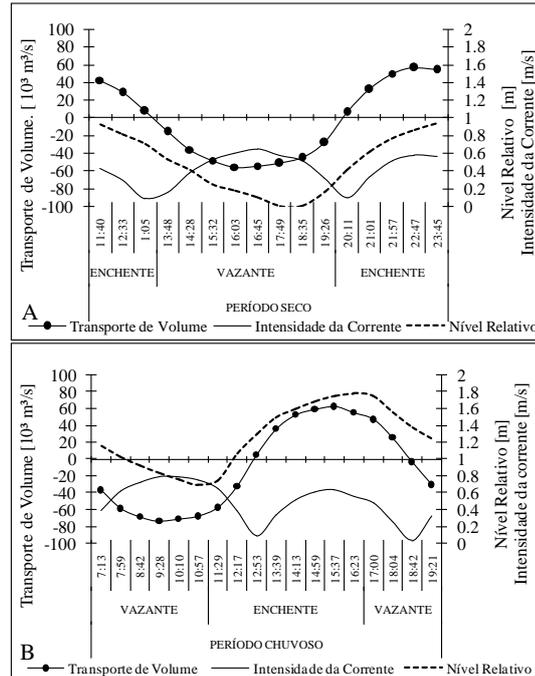


Figura 15: Transporte de volume, nível relativo de maré e velocidade no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Pará.

O transporte resultante no período seco no rio Tocantins foi de 92.414 m^3 , em direção a montante, e no chuvoso foi de -149.123 m^3 , em direção a jusante. A curva de maré medida no rio Tocantins no período seco mostrou uma variação de 0,04 a 1,99 m, com uma altura de maré de 1,95 m. No período chuvoso a curva de maré mostrou uma variação de 0,31 a 3,53 m, com uma altura de maré de 3,21 m. A diferença na altura de maré entre os períodos foi significativa, com acréscimo de 1,26 m de quadratura para sizígia provocando possivelmente grandes alterações biogeoquímicas na área devido ao aumento do prisma de maré nesse período, mas também podemos destacar o aumento do nível de base do rio Tocantins (figura 16 A e B).

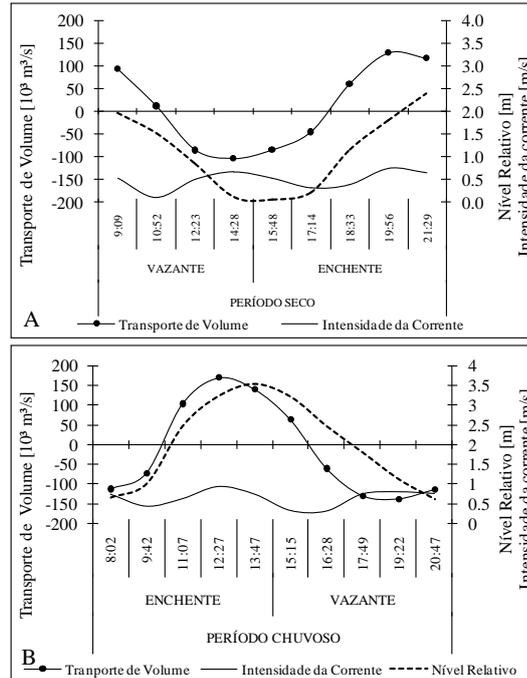


Figura 16: Transporte de volume, nível relativo de maré e velocidade no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Tocantins.

A relação do transporte de volume com a curva de maré oferece uma avaliação do comportamento hidrodinâmico, quanto à competência e capacidade de transporte de sedimentos em suspensão durante esses eventos. As figuras acima mostram a relação entre o transporte e a variação do nível relativo de maré no período seco e chuvoso. Nos estágios de transição da maré (estofa) há a inversão gradual da maré, promovendo apenas uma redução no volume transportado, mas mantendo uma direção preferencial do fluxo de enchente ou vazante até a sua inversão completa.

No período seco, com a intensidade do transporte fluvial reduzida, confirma a importação de sedimentos em decorrência da atenuação da componente fluvial, caracterizando o transporte positivo (maré vazante) menor do que o transporte negativo (maré enchente), exceto nos casos dos rios Jacaré Grande e do Pará que tem respostas inversas ao período analisado, figuras 15 A e B.

O transporte de volume apresentou variabilidade sazonal, tendo os casos de inversão no transporte resultante de volume como nos rios Jacaré Grande e do Tocantins, e no rio Pará houve apenas a uma redução no volume resultante transportado, mas mantendo o mesmo sentido.

O rio Pará funcionou independente do período analisado como exportador de volume, havendo apenas uma redução de 60% do volume no período seco, considerado normal devido

ao período, e a água que aporta nesse sistema é controlada pelos níveis de base dos rios Amazonas e Tocantins.

O rio Tocantins mostrou um padrão normal do transporte de acordo com a sazonalidade. Porém esse ciclo de transporte foi modificado com seu represamento, o seu nível de base é controlado "artificialmente", havendo maior retenção no período seco na represa, ocasionado uma diminuição do nível de base, é conseqüentemente uma maior penetração da maré e simultaneamente de material particulado em suspensão. No período chuvoso há um aumento do nível de base a qual dificulta uma maior penetração da maré em direção a montante do rio.

O transporte de volume rio Jacaré Grande mostrou que é controlado pelo nível de base do rio Amazonas, que funciona como uma barreira para as bacias ou rios menores. Assim quando o nível de base do rio Amazonas é reduzido (período seco), o rio Jacaré Grande controla o transporte resultante, e isso se inverte no período chuvoso, quando o nível de base do rio Amazonas é aumentado, sendo que existe uma troca natural entre corpos aquosos só havendo uma alternância no transporte resultante.

No período chuvoso quando a vazão do rio Amazonas é máxima, exerce maior pressão sobre os outros rios da região (rio Jacaré Grande). Essa maior resistência diminui a exportação de água em direção ao rio Amazonas ou inverte o fluxo, por exemplo, direcionando o fluxo do rio Amazonas para o rio Jacaré Grande e ocorrendo o inverso no período seco. Similarmente Blanton *et al.* (2001) e Ferreira (2013) identificaram processo similar nos estuário de Satilla (Georgia - EUA) e no rio Paracauari, respectivamente.

Considerando as variações sazonais, o transporte resultante de volume do rio Jacaré Grande corrobora com os observados por Silva (2009) para o período chuvoso, com um transporte de 30.102,42 m³ em 2007 e de 138.232 m³ em 2008, ambos em direção ao rio Pará. O transporte analisado no período seco, contudo, mostrou um volume de 3.965,51 m³ em direção ao rio Pará, diferentemente do verificado nesta pesquisa, que demonstrou um padrão de exportação para o rio Amazonas. Essa divergência no transporte de volume pode ser explicada pela disparidade nos números de transectos realizados por Silva (2009), o que impossibilitou uma melhor correlação entre os dados.

A energia de maré tem grande capacidade modeladora, devido à intensificação do transporte longitudinal no período seco ou chuvoso, principalmente em maré de sizígia e equinocial, dependendo do local, haja vista que a maré pode chegar a longas distâncias e uma parte permanecer no sistema (tempo de residência), nas planícies de inundação, mesmo em eventos de maré vazante. Podendo ser o caso do rio Tocantins que tem seu nível de base

rebaixado no período seco ou do rio Jacaré Grande no caso do período chuvoso que tem influência do nível de base do rio Amazonas, estabelecendo uma hipótese de funcionarem como um reservatório de material em suspensão nesses períodos.

A turbulência e a velocidade do fluxo relacionam-se com o trabalho que o rio exerce (erosão, transporte e deposição), sendo mais intenso no período chuvoso. Os fatores hidrodinâmicos juntamente com as características morfológicas e tipo de fundo (rugosidade) geram atritos com zonas de máxima e mínima velocidade (turbidez).

Segundo Christofolletti (1980) a força de fricção ou atrito, George (1995) e Truccolo (2005) a variação na descarga fluvial, acarretam em dissipação de energia devido ao atrito nas laterais e no fundo do estuário, sendo aumentado em períodos chuvosos devido há um maior fluxo contrário a co-oscilação da maré estuário adentro, resultando numa onda extremamente deformada (GODIN, 1985), e outro fator que exerce influência em menor grau e o atrito com o ar (vento) que tem comportamento ambíguo, ampliando ou reduzindo o efeito da maré (enchente ou vazante) ou das ondas de acordo com a direção.

4.1.1.3 Métodos de Transporte de volume

Um dos maiores problemas para o cálculo do transporte de volume são as dimensões quilométricas dos rios Amazônicos, pois em uma única leitura na seção de medição (travessia) as condições de maré mudam rapidamente e como a leitura do ADCP é instantânea, isso acarreta notoriamente em um erro. Porém o ADCP é o método mais perto do ideal que está disponível, apesar de toda essa ressalva foi proposto o modelo de transporte de volume. Por isso foram utilizados dois métodos de transporte de volume para a região, representado por 1 para o ADCP e 2 para o adaptado de Miranda *et al.* (2002).

A variação entre os métodos no transporte de volume nas seções de medições do rio Jacaré Grande mostrou uma diferença média de 2.100 m³ e 2.600 m³ em cada seção medida, respectivamente para o período seco e chuvoso. Essa diferença momentaneamente parece baixa, mas ao final do ciclo de maré é bem significativa no transporte resultante, mostrando uma diferença de 10,6% a 27,5%, sendo que o transporte resultante no método 1 foi de - 90.970 m³/cm (metros cúbicos por ciclo de maré) e de 178.448 m³/cm; e no método 2 foi de - 101.766 m³/cm e de 129.527 m³/cm, respectivamente para o período seco e chuvoso (figura 17 A e B).

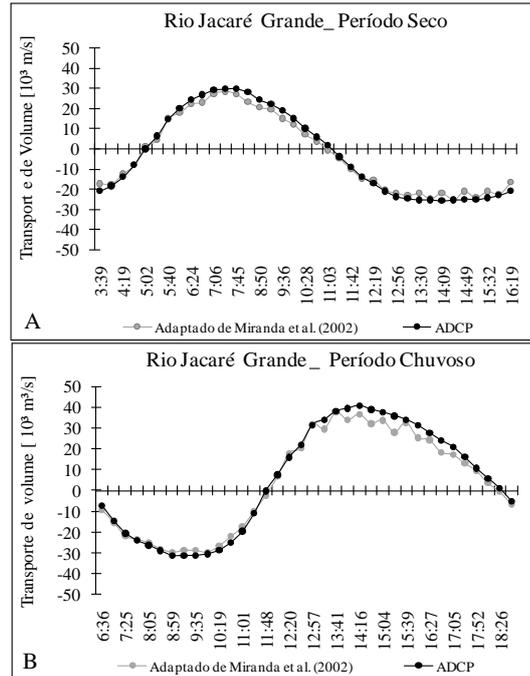


Figura 17: Transporte de volume no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Jacaré Grande.

A variação entre os métodos no transporte de volume nas seções de medições do rio Pará mostrou uma diferença média de 2.600 m^3 e 2.900 m^3 em cada seção medida, respectivamente para o período seco e chuvoso. O transporte resultante mostrou uma diferença de 7,6% e 10,1%, sendo que o transporte resultante no método 1 foi de $63.540 \text{ m}^3/\text{cm}$ e de $159.100 \text{ m}^3/\text{cm}$ e no método 2 foi de $70.656 \text{ m}^3/\text{cm}$ e de $156.477 \text{ m}^3/\text{cm}$, respectivamente para o período seco e chuvoso (figura 18 A e B).

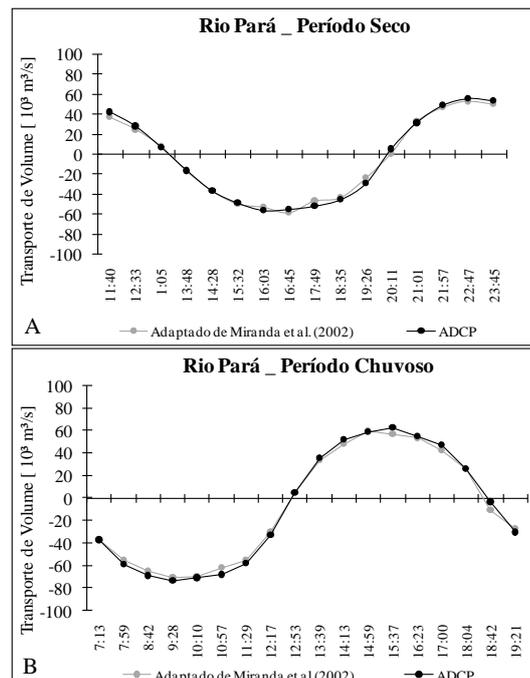


Figura 18: Transporte de volume no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Pará.

A variação entre os métodos no transporte de volume nas seções de medições do rio Tocantins mostrou uma diferença média de 9.500 m^3 e 17.600 m^3 em cada seção medida, respectivamente para o período seco e chuvoso. O transporte resultante mostrou uma diferença de 33%, sendo que o transporte resultante do método 1 foi de $92.414 \text{ m}^3/\text{cm}$ e de $-149.123 \text{ m}^3/\text{cm}$ e no método 2 foi de $61.991 \text{ m}^3/\text{cm}$ e de $-99.316 \text{ m}^3/\text{cm}$, respectivamente para o período seco e chuvoso (figura 19 A e B).

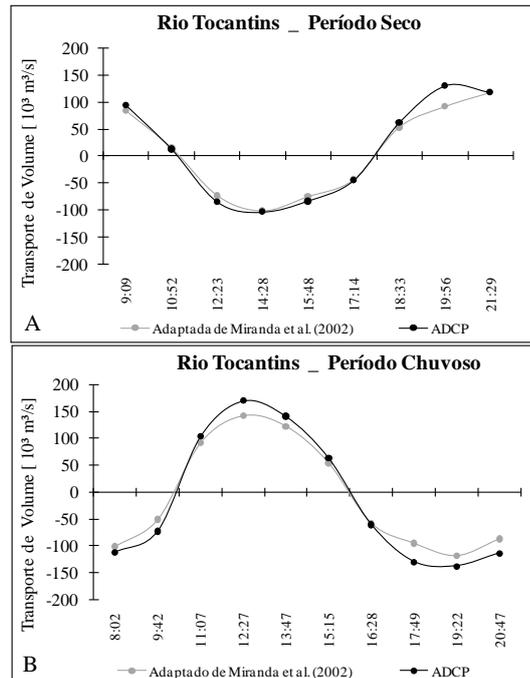


Figura 19: Transporte de volume no período seco (A) e chuvoso (B) no rio Tocantins.

A partir de uma análise integrada dos três rios, sendo considerado como um único sistema isolado em cada período e com os devidos cuidados em decorrência do tipo de maré em cada coleta (quadratura e sizígia), sendo proposto um modelo (hipotético) de exportação ou importação de volume para o sistema.

No período seco o sistema, na somatória geral, funcionou como exportador de volume com duas rotas de exportação, com um volume entre $\sim 63 \text{ mil m}^3/\text{cm}$ (1) a $110 \text{ mil m}^3/\text{cm}$ (2) para o rio Amazonas e a baía do Marajó. Teoricamente tudo seria transportado para o rio Amazonas, através do rio Jacaré Grande, e os rios Pará e Tocantins teriam um balanço negativo, mas sem a inclusão de outros sistemas de drenagens menores, seriam perceptíveis valores de salinidade na área. Contudo existe uma contribuição de outros sistemas e sendo difícil quantificar esse volume transportado para a baía do Marajó, gerando um balanço positivo para o sistema (figura 20).

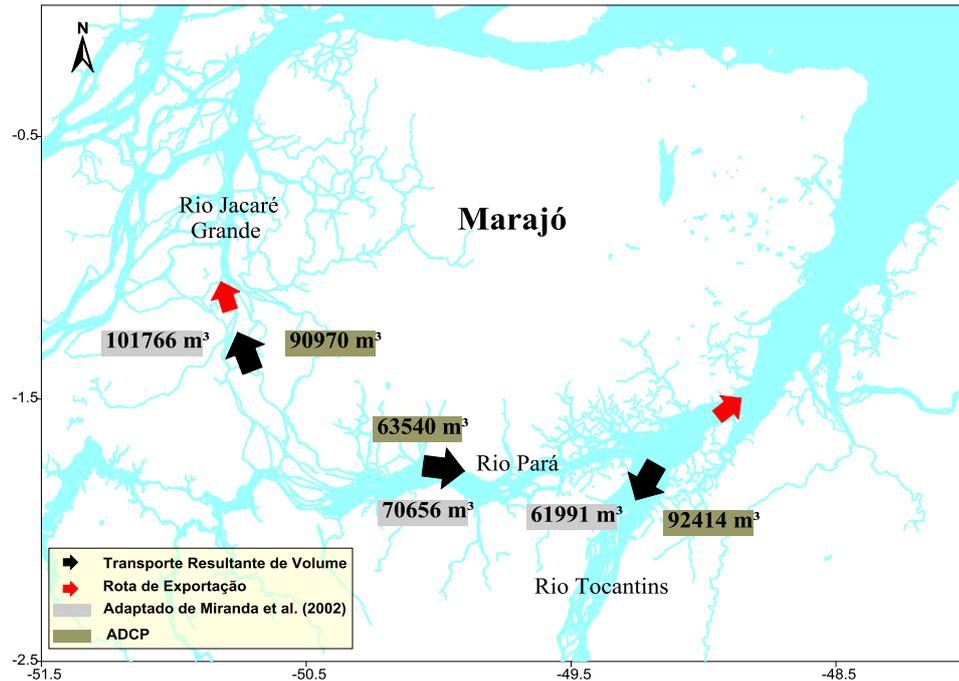


Figura 20: Direção do Transporte resultante de volume de cada rio e as rotas de exportação no período seco, com base nos métodos do ADCP e adaptado de Miranda *et al.* (2002).

O sistema no período chuvoso há apenas uma rota de exportação em direção a baía do Marajó, devido possivelmente ao aumento do nível de base do rio Amazonas e do rio Tocantins direcionando entre ~ 256 mil m³/cm (2) a 310 mil m³/cm (1) para a baía do Marajó (figura 21).

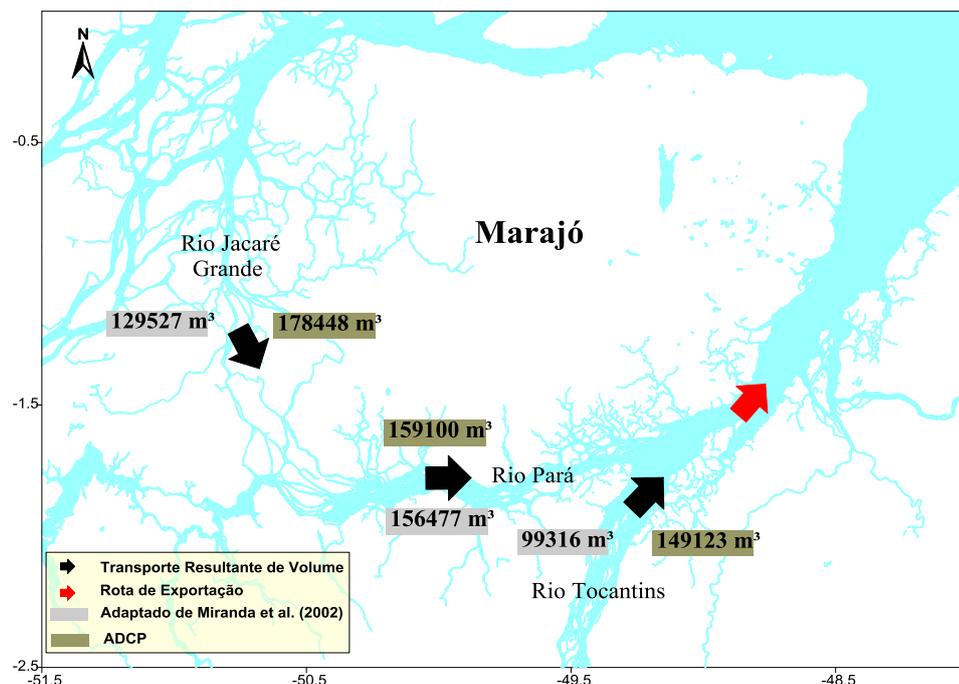


Figura 21: Direção do Transporte resultante de volume de cada rio e as rotas de exportação no período chuvoso, com base nos métodos do ADCP e adaptado de Miranda *et al.* (2002).

Confirmando esse balanço positivo para a baía do Marajó independente do período, Preste (2013) analisou o transporte resultante de volume no rio Pará num setor mais ao norte, entre os municípios de Ponta de Pedras e Abaetetuba, onde recebe a contribuição do setor sudoeste do rio Pará, rio Tocantins e seus afluentes durante um ciclo de maré. Como mostra os dados de transporte resultante de volume, ocorrendo uma oscilação entre os períodos analisados que foi de 970.648,1 m³/cm no período chuvoso de 2011; de 541.395,4 m³/cm no período seco de 2011; e de 510.336,6 m³/cm no período chuvoso de 2013, mas ambos em direção a baía do Marajó e mostrando a tendência de um balanço positivo para o sistema.

Barthem & Schwassmann (1994) analisaram a condutividade ao longo do estuário do rio Pará por três anos, identificando a influência do rio Amazonas e da intrusão salina, e concluíram que no período chuvoso, a maior descarga do rio Tocantins e de seus afluentes barram a entrada de água do rio Amazonas pelo Estreito de Breves, bem como a intrusão salina pela baía do Marajó, enquanto que no período seco, há uma redução da descarga do rio Tocantins o que permite a entrada de água do rio Amazonas pelo estreito de Breves e de água marinha na baía do Marajó. Mas a partir dos dados de transporte de volume foi observado o oposto do resultado de Barthem & Schwassmann (1994).

Com base num menor transporte de volume no período seco, os rios não conseguem transportar o MPS totalmente para a zona costeira devido à ação da maré, que funciona como uma barreira. Este processo de sedimentação ao longo da área pode vir dificultar a navegação, restringindo a navegação apenas pelos canais, devido funcionarem como importadores de sedimento nesse período, como exemplo temos a navegação no rio Tocantins no período seco, que é dificultada ainda mais durante a baixa-mar.

4.1.1.4 Maré dinâmica na região

A altura média da maré foi obtida das principais constantes harmônicas foi de 2,12 m e 2,44 m, assim como o nível médio das preamares de sizígia foi de 2,35 m e 2,75 m e na quadratura de 1,5 m e 1,69 m, respectivamente para os rios Pará e Tocantins. Sendo a área caracterizada como de meso-maré (altura da maré < 4 m). A partir do Número de Forma [$Nf = (K1 + O1) / (M2 + S2)$], que é a razão entre as duas principais componentes diurnas e semidiurnas, indica o tipo de maré (DEFANT, 1960). O número de forma encontrado foi de 0,12 e 0,13 classificando como maré semidiurna, respectivamente os rios Pará e Tocantins.

Através da relação de fase ($2 \cdot M2 - M4$), o sistema foi classificado pelo domínio de correntes de enchente, com os valores obtidos entre os dois períodos de amostragem foi de 87° (rio Tocantins) e 99° (rio Pará). De acordo com Speer & Aubrey (1985) na relação de fase

se o valor obtido estiver entre 0° e 180° , o estuário é caracterizado como dominado por correntes de enchente, onde o tempo de duração da maré enchente é menor que o da maré vazante, resultando em correntes de enchente mais intensas; ou se estiver entre 180° e 360° , ocorre o inverso, sendo o sistema dominado por correntes de vazante.

A maré adentra o rio Pará a mais de 300 km, chegando até o município de Cametá no rio Tocantins e em Breves, sendo que possivelmente o rio Pará tem dois pontos de entrada de maré: um pelo rio Jacaré Grande (Estreito de Breves) e outro pela Baía de Marajó.

A maré possui um padrão assimétrico tanto as marés observadas no período seco quanto no período chuvoso foi identificado que a duração da corrente de vazante (média de 7,2 horas) é superior ao de enchente (média de 5,2 horas) para os três rios, ou seja, segundo Masselink & Hughes (2003), quando o tempo de vazante é superior ao tempo de enchente, o sistema torna-se um importador. A assimetria é um fator importante na relação de transporte de sedimentos que leva em consideração a profundidade e o atrito, assim como a descarga fluvial (figura 22).

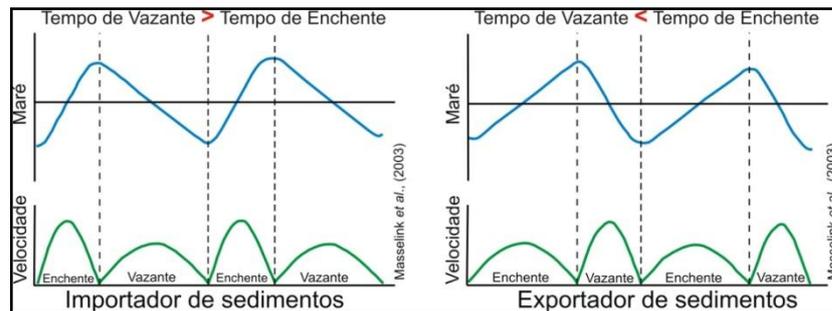


Figura 22: Modelo de propagação de maré (Masselink *et al.* 2003).

As marés que ocorrem ao longo do rio Pará são assimétricas, com domínio de macromaré a mesomaré é do tipo semidiurna.

As velocidades são maiores na enchente, em média de 10 a 15 % maiores do que na vazante. O sistema é regido pelo evento de menor duração (enchente) que apresenta as maiores velocidades, ou seja, o transporte de sedimentos em suspensão será maior na enchente do que na vazante, caracterizando como um sistema dominado pela maré no período seco (Miranda *et al.* 2002).

No período chuvoso as velocidades se equiparam, sendo por vezes superiores na vazante, onde o tempo de enchente é inferior ao de vazante. As velocidades do evento mais intenso aliado ao tempo de vazante regem o transporte de sedimentos (volume), caracteriza um sistema dominado pelo rio no período chuvoso.

O resultado obtido através da assimetria não pode ser generalizado para toda região, é certo que a enchente tem menor duração na região. Porém sendo específico de cada área analisada, tendo uma resposta diferenciada no tempo é nem sempre o evento de menor duração terá as maiores velocidades ou o transporte. Pois cada rio tem uma resposta diferente no mesmo período, ou seja, comportamentos inversos (rio Jacaré Grande e rio Tocantins) ou são indiferentes aos períodos seco e chuvoso (rio Pará).

O comportamento da maré não pode ser isolado do efeito da vazão, pois seria considerada apenas a deformação da maré, mas como a vazão se diferencia em cada período, ou seja, o volume de entrada varia de acordo com a maré (quadratura ou sizígia) e sendo diferente o volume que vaza (período seco ou chuvoso). Procurando estimar se houve uma maior entrada no período seco ou saída no período chuvoso, o que seria normal em virtude da variação do nível do médio do rio, que é rebaixado no período seco e aumentado no chuvoso.

4.1.2 hidrodinâmica dos canais

4.1.2.1 Rio Jacaré Grande

A velocidade longitudinal no período seco variou de -0,9 a 0,8 m/s ao longo da coluna d'água, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 h após a preamar, atingindo 0,8 m/s, e na enchente ocorreram 2 h após a baixa-mar, atingindo -0,9 m/s, com média de 0,43 m/s na vazante e de -0,4 m/s na enchente (figura 23 A). A velocidade no período chuvoso variou de -1,1 a 1 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 2 h antes da baixa-mar, atingindo 1 m/s, e na enchente, 3 h após a baixa-mar, atingindo -1,1 m/s, com média de 0,48 m/s na vazante e de -0,52 m/s na enchente (figura 23 B).

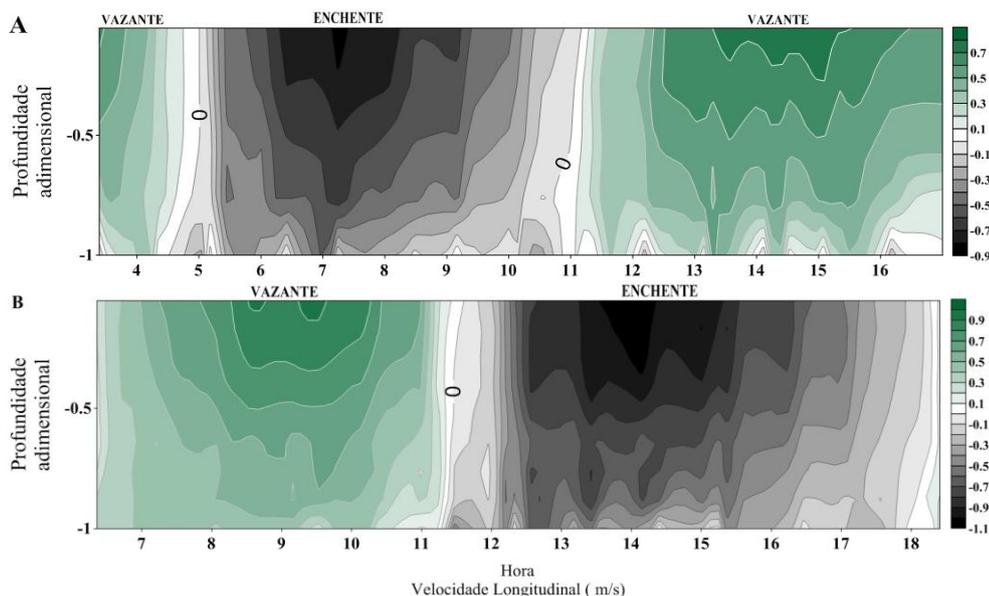


Figura 23: Perfil temporal de velocidade do rio Jacaré Grande no período seco (A) e chuvoso (B).

As velocidades no geral foram mais intensas no período chuvoso, mas para ambos os períodos as velocidades máximas foram registradas próximo à superfície durante a fase de enchente. A diminuição da velocidade com o aumento da profundidade foi uma característica nítida nos dois períodos como esperado. Essa redução pode ser atribuída a dois fatores: ao retardamento da corrente devido ao atrito com o fundo e pelo movimento relativo marcado pela inversão da corrente, iniciado pelo fundo no canal.

Além disso, verificou-se uma redução da velocidade da corrente em toda coluna d'água até o momento que ocorre a mudança da direção da corrente de enchente para vazante ou vice-versa. Durante esta mudança, as direções das correntes de fundo não obedecem a um padrão, provavelmente em função da turbulência originada pelo contato com o fundo.

4.1.2.2 Rio Pará

4.1.2.2.1 Período seco

A velocidade no canal 1 variou de -0,76 a 0,72 m/s, onde as velocidades máximas de vazante observadas ocorreram 3 horas após a preamar, atingindo 0,72 m/s, e na enchente ocorreram 2 horas e meia após a baixa-mar, atingindo -0,76 m/s, e o valor médio foi de 0,36 m/s tanto na vazante quanto na enchente (figura 24 A).

No canal 2 variou de -0,52 a 0,86 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas após a preamar, atingindo 0,86 m/s e média de 0,44 m/s, e na enchente ocorreram 2 horas após a baixa-mar, atingindo -0,52 m/s com média de -0,3 m/s (figura 24 B).

No canal 3 variou de -0,65 a 0,65 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 2 horas e meia após a preamar, atingindo 0,65 m/s e média de 0,29 m/s, e na enchente ocorreram 3 horas após a baixa-mar, atingindo -0,65 m/s e média de -0,32 m/s (figura 24 C).

Na seção completa variou de -0,6 a 0,7 m/s, onde as velocidades máximas de vazante observadas ocorreram na superfície 3 horas após preamar, atingindo 0,7 m/s e média de 0,38 m/s, e na enchente ocorreram 2 horas após a baixa-mar, atingindo -0,6 m/s e média de -0,34 m/s (figura 24 D).

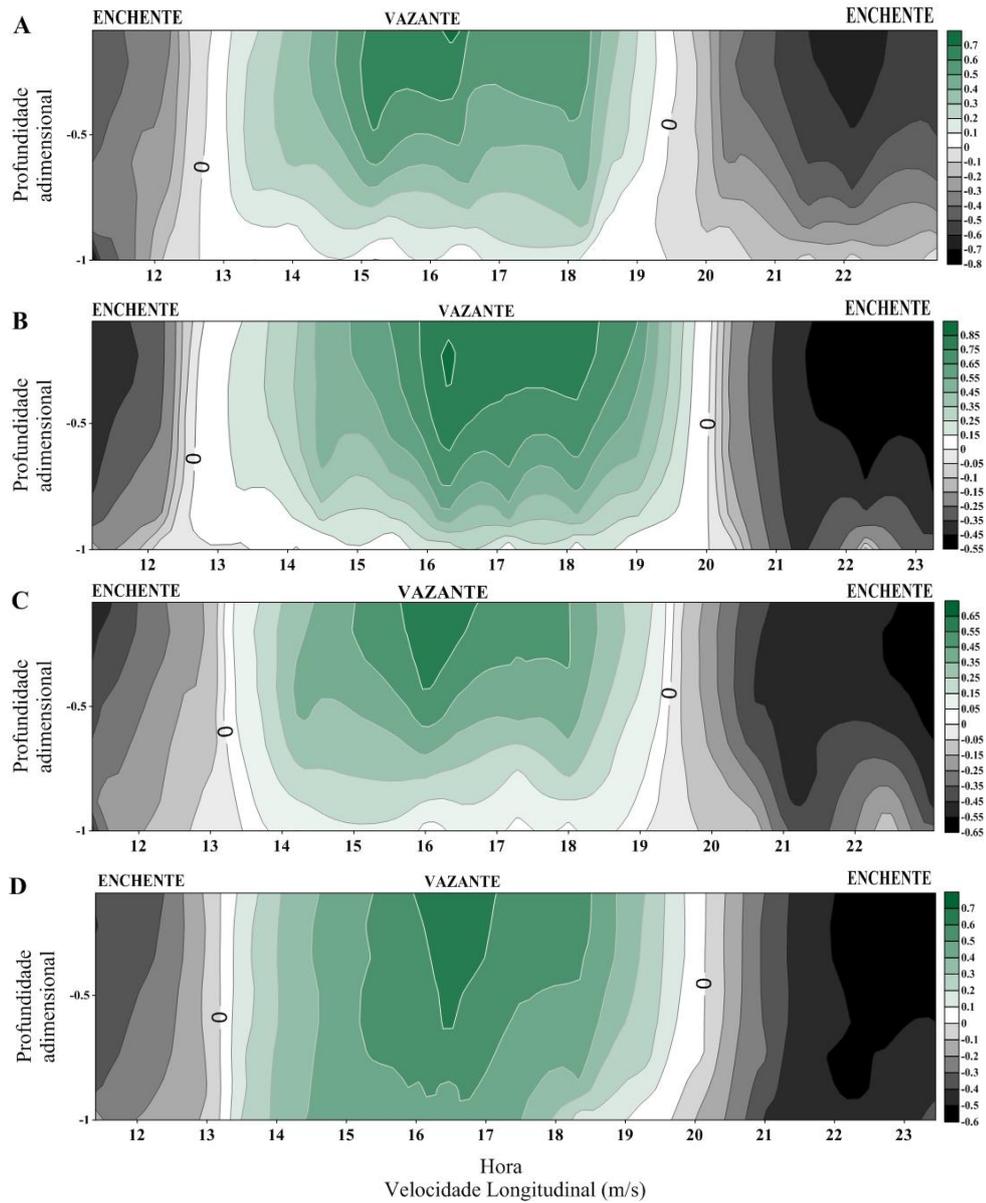


Figura 24: Perfil temporal de velocidade do rio Pará no período seco, sendo A (canal 1), B (canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).

As maiores velocidades foram registradas na enchente no canal 1 e 3, é na vazante no canal 2, sendo que a velocidade na vazante no canal 2 foi 54% mais forte que na enchente e similar a seção completo do rio Pará. No geral os máximos de velocidades tanto na enchente quanto na vazante foram similares, exceto no canal 2, que na média geral foi o mais atuante para o padrão geral do rio Pará no período seco.

Observou-se a redução da velocidade com a profundidade, sendo mais acentuado na vazante, principalmente no fundo. Foi evidenciando uma variação vertical (durante os máximos) e horizontal (durante os períodos de transição) em ambos os canais.

4.2.2.2.2 *Período chuvoso*

No canal 1 variou de -0,9 a 0,9 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram na superfície 2 horas e meia antes da baixa-mar, atingindo 0,9 m/s, e na enchente ocorreram 3 h após a baixa-mar, atingindo -0,9 m/s, e o valor médio foi de 0,5 m/s na vazante e de -0,45 m/s na enchente (figura 25 A).

No canal 2 variou de -1,18 a 0,68 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas antes da baixa-mar, atingindo 0,68 m/s, e na enchente ocorreram 3 horas após a baixa-mar, com -1,18 m/s, e o valor médio foi de 0,65 m/s na vazante e de -0,38 m/s na enchente (figura 25 B).

No canal 3 variou de -0,75 a 0,85 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas antes da baixa-mar, atingindo 0,85 m/s, e na enchente ocorreram 3 horas após a baixa-mar, atingindo -0,75 m/s, e o valor médio foi de 0,48 m/s na vazante e de -0,46 m/s na enchente (figura 25 C).

Na seção completa variou de -0,75 a 0,85 m/s, onde as velocidades máximas de vazante observadas ocorreram 3 horas antes da baixa-mar, atingindo 0,85 m/s, e na enchente ocorreram 3 horas após a baixa-mar, atingindo -0,75 m/s, e o valor médio foi de 0,51 m/s na vazante e de -0,39 m/s na enchente (figura 25 D).

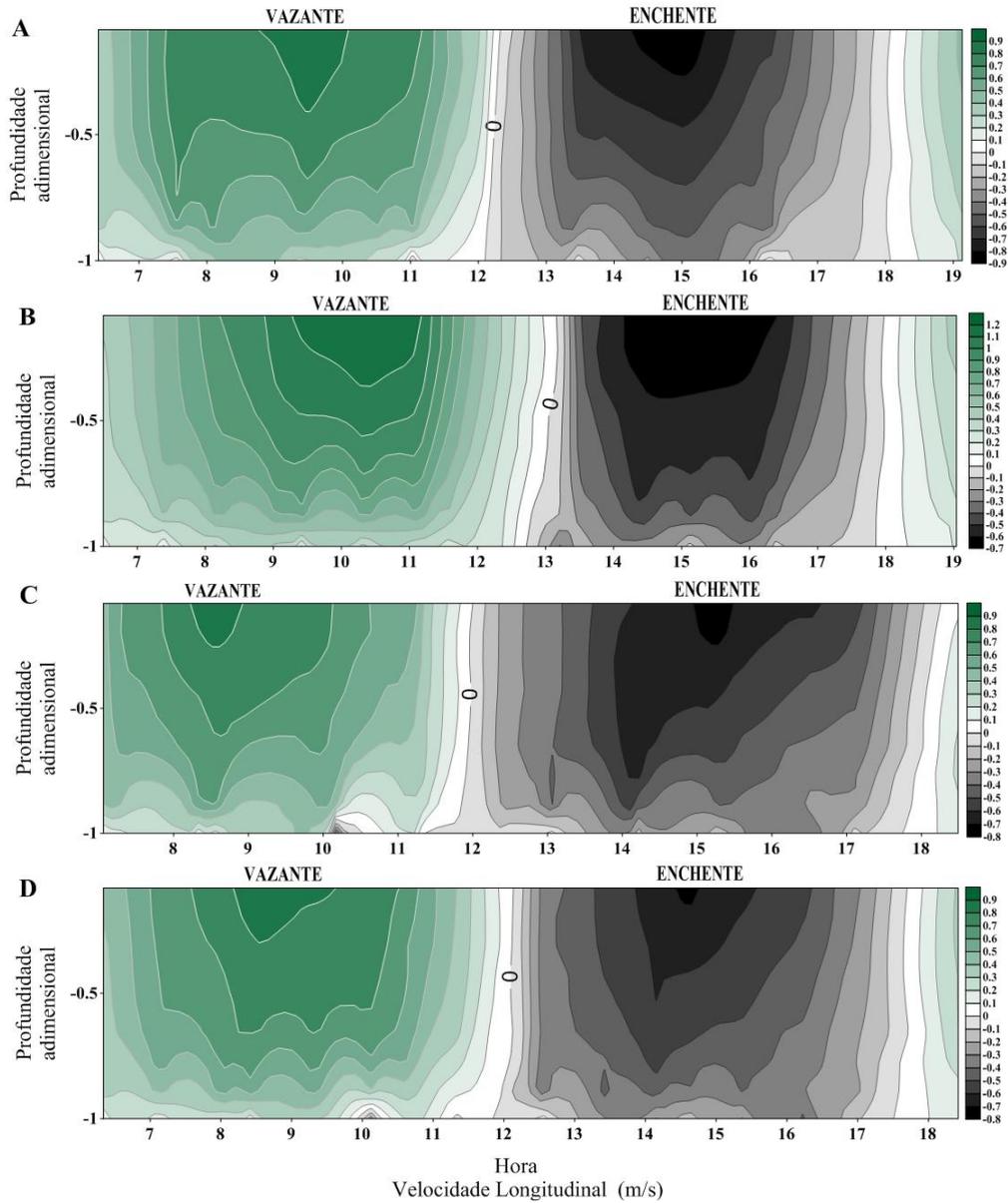


Figura 25: Perfil temporal de velocidade do rio Pará no período chuvoso sendo A (canal 1), B (canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).

As maiores velocidades da corrente foram similares tanto na enchente quanto na vazante, exceto no canal 2 que manteve o padrão com velocidades de vazante superior ao da enchente. A corrente de vazante no canal 2 foi quase o dobro da enchente, corroborando que é o principal canal, é assim como aconteceu no período seco à seção geral foi similar ao canal 2.

4.1.2.3 Rio Tocantins

4.1.2.3.1 Período seco

No canal 1 variou de $-0,65$ a $0,51$ m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 4 horas após a preamar, atingindo $0,51$ m/s, e na enchente ocorreram 3 horas após a

baixa-mar, atingindo $-0,65$ m/s, e a média foi de $0,28$ m/s na vazante e de $-0,26$ m/s na enchente (figura 26 A).

No canal 2 variou de $-0,7$ a $0,65$ m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas após a preamar, atingindo $0,65$ m/s, e na enchente ocorreram 2 horas e meia após a baixa-mar, atingindo $-0,7$ m/s, e a média foi de $0,38$ m/s na vazante e de $-0,33$ m/s na enchente (figura 26 B).

No canal 3 variou de $-0,65$ a $0,65$ m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 2 horas após a preamar e na enchente 1 hora e meia após a baixa-mar, com valores iguais a $0,65$ m/s, e a média foi de $0,33$ m/s na vazante e de $-0,3$ m/s na enchente (figura 26 C).

Na seção completa variou de $-0,65$ a $0,73$ m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas após a preamar, com $0,73$ m/s, e na enchente ocorreram 2 horas após a baixa-mar, com $-0,65$ m/s, e a média foi de $0,46$ m/s na vazante e de $-0,4$ m/s na enchente (figura 26 D).

As velocidades mantiveram o mesmo padrão para os três canais, com valores similares tanto na enchente quanto na vazante, sendo as maiores velocidades na superfície durante a enchente.

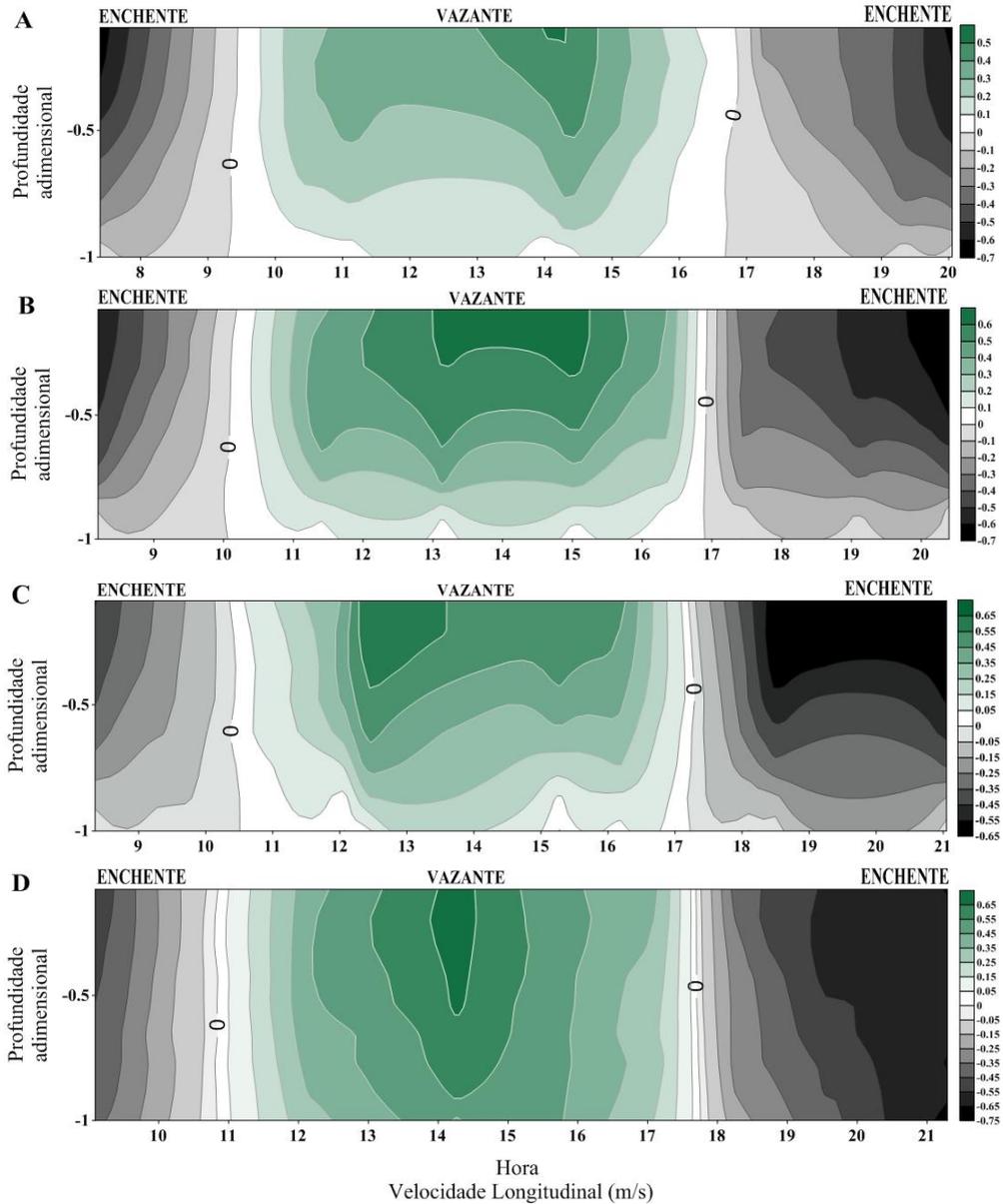


Figura 26: Perfil temporal de velocidade do rio Tocantins no período seco, sendo A (canal 1), B (canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).

4.1.2.3.2 Período chuvoso

No canal 1 variou de $-0,87$ a $0,92$ m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 2 horas e meia após a preamar, atingindo $0,92$ m/s, e na enchente ocorreram 2 horas e meia após a baixa-mar, atingindo $-0,87$ m/s, e a média foi de $0,41$ m/s na vazante e de $-0,39$ m/s na enchente (figura 27 A).

No canal 2 variou de $-1,04$ a $1,1$ m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas após a preamar, com $1,1$ m/s, e na enchente ocorreram 2 horas após a baixa-mar, com $-1,04$ m/s, e a média foi de $0,59$ m/s na vazante e de $-0,64$ m/s na enchente (figura 27 B).

No canal 3 variou de -0,82 a 0,92 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas após a preamar, atingindo 0,92 m/s e na enchente ocorreram 2 horas após a baixa-mar, atingindo -0,82 m/s, e a média foi de 0,53 m/s na vazante e de -0,47 m/s na enchente (figura 27 C).

Na seção completa variou de -0,9 a 0,82 m/s, onde as velocidades máximas de vazante ocorreram 3 horas após a preamar, atingindo 0,82 m/s, e na enchente ocorreram 2 horas e meia após a baixa-mar, atingindo -0,9 m/s, e a média foi de 0,52 m/s na vazante e de -0,54 m/s na enchente (figura 27 D).

De modo geral, as correntes são mais intensas nos canais, quando comparado às suas margens, especialmente na superfície, sendo mais intenso na enchente (período seco) ou na vazante (período chuvoso). Isto ocorre em função da geometria das seções, nas margens, que são regiões mais rasas com o atrito atuante nas laterais e no fundo é maior, se propagando até a camada superficial (MIRANDA *et al.* 2002). Já no canal, o efeito do atrito é mais forte no fundo e decrescendo até a superfície.

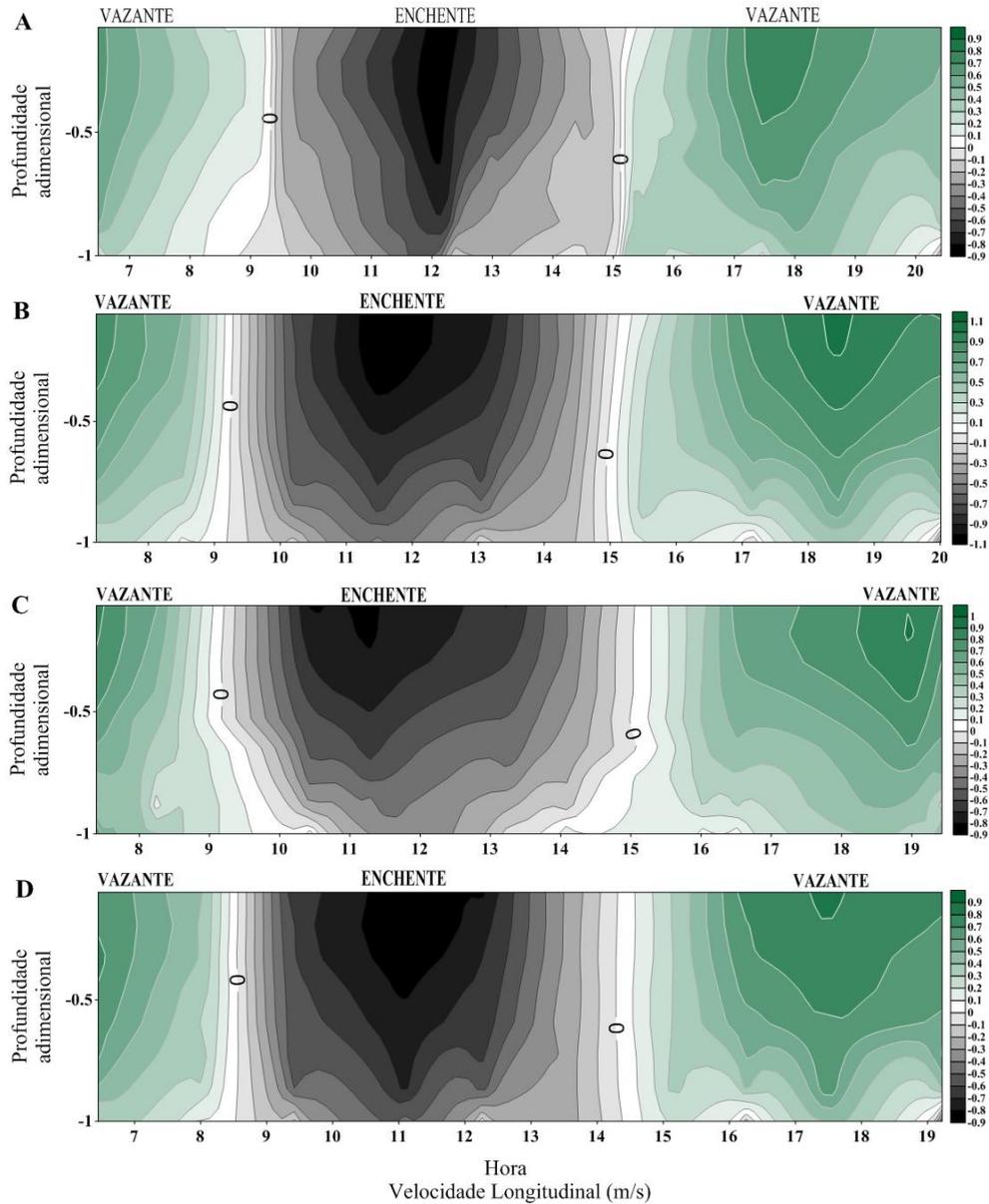


Figura 27: Perfil temporal de velocidade do rio Tocantins no período chuvoso, sendo A (canal 1), B (canal 2), C (canal 3) e D (Seção Completa).

Miranda (2012) e Monteiro (2009) analisando a zona costeira bragantina constataram que no período chuvoso as maiores intensidades de correntes foram registradas na vazante atingindo valores de 1,2 m/s até 1,8 m/s, e no período seco ocorre o inverso, com as maiores intensidades na enchente, de 0,5 m/s até 1,4 m/s. Similarmente Zhang *et al.* (2007) analisando o estuário Changjiang (rio Yangtzé) no período chuvoso, observou que as velocidades de vazante (0,5 – 1,0 m/s) foram superiores que a de enchente (0,2 – 0,4 m/s).

Reafirmado as altas intensidades das correntes no canal conforme identificado a partir dos dados de Ferreira (2012) no rio Paracauari, no período seco as velocidades no canal são 70% mais intensas do que nas margens, enquanto que no período chuvoso as velocidades são

de 19% até 70% mais intensas do que nas margens. E também no período chuvoso as correntes são 30% mais intensa, principalmente as de vazante.

De acordo com a geometria, a altura de maré e a descarga fluvial líquida, cada estuário pode apresentar diversos padrões de assimetria, de nível d'água e correntes. Neste contexto dá pra diferenciar dois padrões: estuários dominados por fricção, por exemplo, o estuário do Taperaçu onde 82% do volume de água fica em transito durante cada ciclo de maré (ASP *et al.* 2012), ou estuários dominado por rio, onde a descarga fluvial é a variável dominante nos processos de mistura na maior parte do tempo (D'AQUINO *et al.* 2010 e 2011). No primeiro a mudança na assimetria é causada principalmente pela geometria, e no segundo pela descarga fluvial, somam-se a isto, as variações sazonais, que em casos extremos podem fazer um estuário se comportar de uma maneira no período seco e de outra no período chuvoso.

Friedrichs *et al.* (1992), demonstraram que os estuários rasos onde a amplitude da maré é grande em relação à profundidade do canal, pode ocorrer a dominância de enchente e relacionado com o prisma de maré, que corresponde ao volume de água que entra no estuário durante a maré enchente. Porém diversos fatores devem ser abordados; a profundidade média dos rios varia de 10 a 15 m, com máximos de 30 m; a maré tem altura média de 1,5 a 1,69 na quadratura e de 2,35 a 2,75 na sizígia, podendo apresentar valores bem acima; e outro e a área de cada rio, que são grandes, tendo extensas planícies de inundação e são conectadas.

Segundo Herz (1991), para determina o prisma de maré, se consideraria a altura máxima da maré e a área superficial do estuário, mas devido às condicionantes acima citadas séria meio duvidoso esse valor, sendo mais fácil fazer um balanço do fluxo de entrada e saída, como feito no tópico de relação entre transporte de volume e variação de maré. E isso mostra a real tendência de retenção ou não do fluxo em cada rio e o tempo de renovação desses fluxos.

4.2 MATERIAL EM SUSPENSÃO E TRANSPORTE DE MASSA

O material particulado em suspensão (MPS) em sistemas aquáticos é constituído por uma combinação de materiais inorgânicos e orgânicos (WAREM & ZIRMMEMAM, 1993). O MPS tem as suas dimensões controladas por diversos fatores: tipo de agente transportador (água, vento, gelo); variações climáticas (período chuvoso ou seco); e do tipo da área (vegetada ou não vegetada, etc.). A variação da competência do agente transportador é quem gera as diferenças granulométricas ao longo do rio, disponibiliza a quantidade de material há ser erodido, transportado e também regula a capacidade de solubilidade do meio.

A turbidez é outra forma de determinar a quantidade de sólidos suspensos na água, e os materiais suspensos incluem partículas como silte, argila, plâncton, e outras inúmeras substâncias.

O rio é o principal agente transportador da região Amazônica, que tem a capacidade de carrear toneladas de sedimento por dia, tanto em suspensão como carga de leito, e como todo esse sedimento erodido tende naturalmente a depositar, provocando inúmeras modificações morfológicas. Esse processo tem sérias implicações na navegação relacionadas às variações batimétricas devido à formação de bancos arenoso e expansão das planícies, e a oscilação dos níveis de água em decorrência da maré, restringindo ainda mais a navegação.

No mundo vários trabalhos têm provido informações sobre a concentração de sólidos em suspensão (Tabela 4). No presente trabalho informações sobre a distribuição são fornecidas, bem como o volume de MPS transportado e a implicação desse transporte na morfologia da área.

Tabela 4: Quantificação de MPS em vários sistemas a nível global.

Autores	Local	Concentração MPS
Manheim et al., 1970; Emery et al., 1974	Atlântico Norte	0,04 a 1,60 mg/L
Abrantes et al., 1994	Atlântico Norte (zonas de vórtices)	100 mg/L
Amos, 1996	Baía de Fundy	3500 mg/L
Uncles & Smith, 2005	Pacífico Norte	3 a 80 mg/L
Bradley & Philip (1999)	Estuário Annan - Austrália	3 a 115 mg/L
Freitas & Abrantes, 2002	Mediterrâneo (região costeiras)	0,03 a 0,94 mg/L
Framinã & Brown, 1996	Rio da Prata	200 mg/L
Salomão et al., 2001	Bacia inferior do rio Paraíba do Sul	23 a 45 mg/L
Souza et al., 2003	Bacia inferior do rio São Francisco	13 a 90 mg/L
Dias 2005	Estuário do rio Jaguaribe	7,06 a 608 mg/L
Miranda, 2012	Estuário do rio Caeté (Furo do Meio)	190 a 461 mg/L
Monteiro, 2009	Rio Paracauari	12,14 a 115,66 mg/L
Ferreira, 2013	Rio Paracauari	7,1 a 145,7 mg/L
Biggs, 1987	Estuário do rio Amazonas	2000 mg/L

4.2.1 Material em suspensão

4.2.1.1 Rio Jacaré Grande

Os valores de MPS, seja no período seco ou no chuvoso, foram maiores no fundo do rio com valores de 14,8 a 66,4 mg.L⁻¹ e média de 31,82 mg.L⁻¹, período seco, e de 19,61 a 180 mg.L⁻¹ com média de 72 mg.L⁻¹, período chuvoso. Enquanto que na superfície houve variação de 9,6 a 40 mg.L⁻¹ com média de 23,41 mg.L⁻¹, período seco, e de 11,91 a 53 mg.L⁻¹ com média de 28,43 mg.L⁻¹, período chuvoso (figura 28 A e B).

No período seco, sob influência de maré de quadratura os valores de MPS entre a superfície e o fundo foram similares, sendo que na maré enchente variou de 9,6 a 51,2 mg.L⁻¹, em direção ao rio Pará, e na vazante de 14,8 a 66,4 mg.L⁻¹, em direção ao rio Amazonas.

No período chuvoso, sob influência de maré de sizígia, na maré vazante num primeiro momento seguiu uma tendência crescente e depois decresceu, e durante a maré enchente seguiu uma tendência crescente. Na maré vazante os valores de MPS variaram de 15,7 a 178 mg.L⁻¹, em direção ao rio Amazonas, e na maré enchente de 22 a 178 mg.L⁻¹, em direção ao rio Pará.

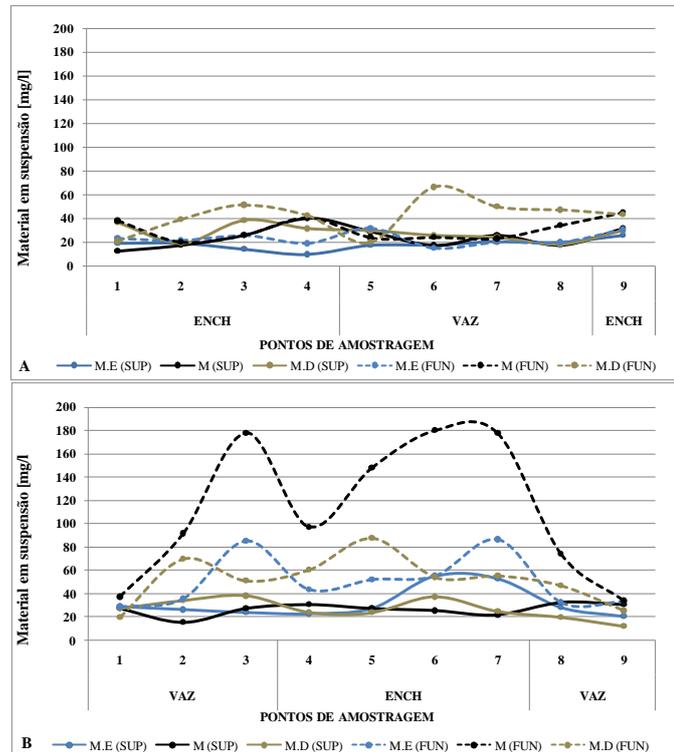


Figura 28: Variação espacial e temporal do MPS em superfície e no fundo no rio Jacaré Grande no período seco (A) e no chuvoso (B).

Os valores de MPS no rio Jacaré Grande, assim como nos demais rios, são regidas pela sazonalidade e também pela oscilação diária da maré. À medida que os índices

pluviométricos aumentam e o nível das águas dos rios também sobe, promove um crescimento no carreamento de material particulado para os rios.

Comparando os três pontos do período seco, percebeu-se que tanto em superfície como no fundo a margem direita (MD) obteve as maiores concentrações de MPS seguidas do meio do canal (M) e da margem esquerda (ME). Em relação ao período chuvoso, a margem esquerda obteve os maiores valores de MPS em superfície seguido do meio do canal e da margem direita, e no fundo foi o meio do canal que teve os maiores valores seguido da margem direita e esquerda.

Relacionando sazonalmente os três pontos, no período seco a margem direita obteve os maiores valores enquanto que no período chuvoso o meio do canal alcançou os maiores valores de MPS dos dois períodos, no fundo. Constatou-se que no período chuvoso houve um aumento de 13,2% na margem direita, 101% margem esquerda e de 157% no meio do canal na concentração de MPS, em relação ao período seco.

4.2.1.2 Rio Pará

No rio Pará os valores de MPS foram maiores no fundo, com uma variação de 11,6 a 109,6 mg.L⁻¹ com média de 37,3 mg.L⁻¹ no período seco, e de 7,2 a 114,4 mg.L⁻¹ com média de 42 mg.L⁻¹ no período chuvoso. Os valores na superfície variaram de 6,4 a 36,8 mg.L⁻¹ com média 15,89 mg.L⁻¹, período seco, e de 8 a 85,2 mg.L⁻¹ com média de 18,81 mg.L⁻¹, período chuvoso (figura 29 A e B).

No período seco, sob influência de maré de quadratura, os valores de MPS na superfície foram baixos tanto na enchente quanto na vazante, e no fundo seguiram relativamente um padrão com um pico no final da vazante no canal 1 e 2. No canal 3 teve um comportamento de uma senoide com valores altos, e ao longo do ciclo de maré variou entre 7,2 a 109,6 mg.L⁻¹ na vazante e de 6,4 a 74,4 mg.L⁻¹ na enchente.

No período chuvoso, sob influência de maré de sizígia, os valores de MPS na superfície se mantiveram uniformes tanto na enchente quanto na vazante, enquanto que no fundo não seguiu nenhum padrão sendo mais intenso na enchente, variando de 7,2 a 85,2 mg.L⁻¹ na vazante e de 8 a 114,4 mg.L⁻¹ na enchente.

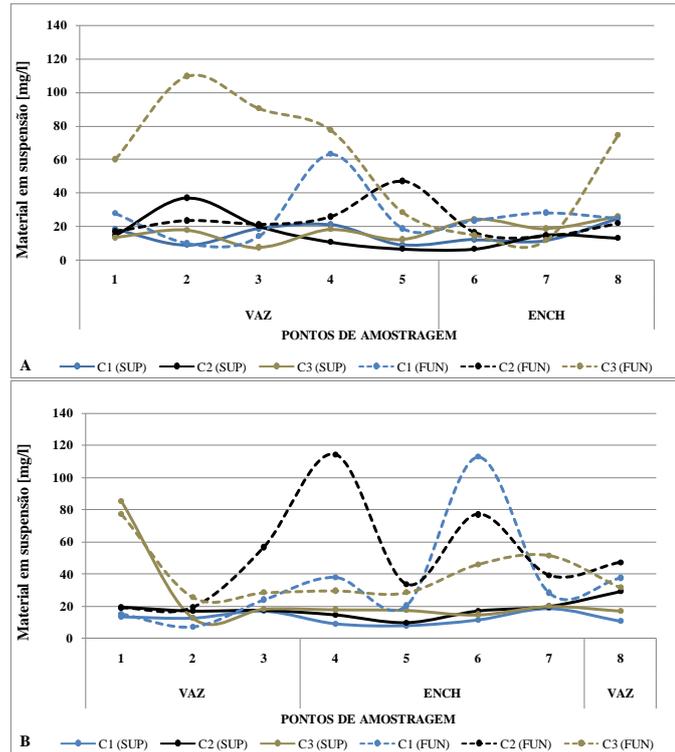


Figura 29: Variação espacial e temporal do MPS em superfície e no fundo no rio Pará no período seco (A) e no chuvoso (B).

A análise dos três canais no período seco indicou que o canal 3, C3, obteve os maiores valores de MPS tanto em superfície como no fundo seguido do canal 1, C1, e do canal 2, C2. No período chuvoso, em superfície, concluiu-se que o canal 3 obteve os maiores valores, devido uma maior concentração no ponto inicial, e no fundo o canal 2 teve as maiores concentrações seguido do canal 3 e do canal 1, sendo na média geral o canal 2 mais expressivo.

A comparação sazonal estabeleceu que o canal 3, período seco, e o canal 2, período chuvoso, obtiveram os maiores valores como mostra as porcentagens de aumento de MPS para o período chuvoso: 15,6% no canal 1 e de 79,6% no canal 2, e uma diminuição de 13,4% no canal 3, em relação ao período seco.

4.2.1.3 Rio Tocantins

Os valores na superfície variaram de 2,8 a 27,6 mg.L⁻¹ com média de 14,33 mg.L⁻¹, período seco, e de 6,4 a 51,2 mg.L⁻¹ com média de 17,5 mg.L⁻¹, período chuvoso; a variação no fundo foi de 4,4 a 35,2 mg.L⁻¹ com média de 18,64 mg.L⁻¹, período seco, e de 7,6 a 112,8 mg.L⁻¹ com média de 49,5 mg.L⁻¹, período chuvoso (figura 30 A e B).

No período seco, sob influência de maré de quadratura, os valores de MPS tanto na superfície quanto no fundo se mantiveram uniformes na enchente e na vazante, com certa estabilidade, variando de 2,8 a 32,9 mg.L⁻¹ na vazante e de 10 a 35,2 mg.L⁻¹ na enchente.

No período chuvoso, sob influência de maré de sizígia, o valor de MPS na superfície se manteve relativamente uniforme tanto na enchente quanto na vazante, apenas com um pico no canal 3 durante a vazante, enquanto que no fundo não seguiu nenhum padrão, mas com valores superiores ao do período seco, variando de 6,4 a 112,8 mg.L⁻¹ na vazante e de 11,2 a 78,8 mg.L⁻¹ na enchente.

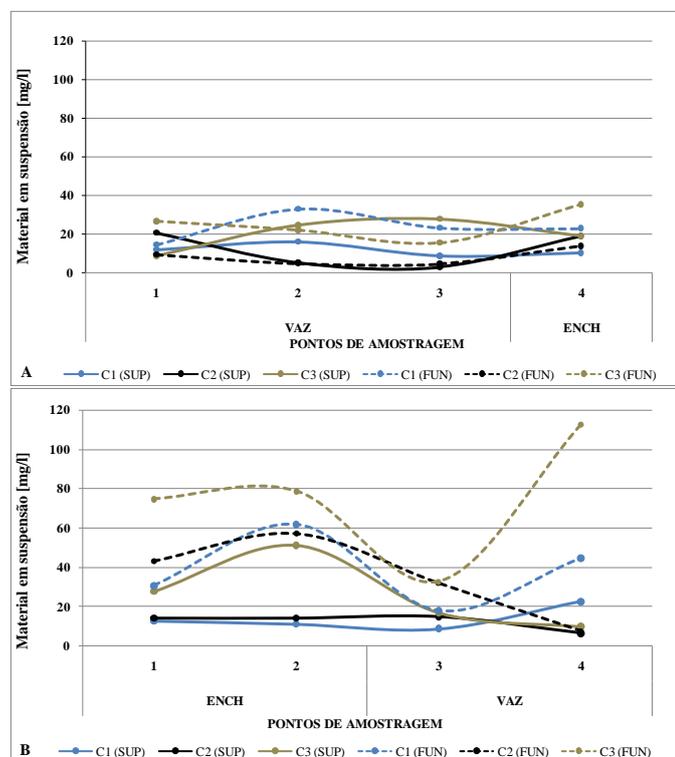


Figura 30: Variação espacial e temporal do MPS em superfície e no fundo no rio Tocantins no período seco (A) e no chuvoso (B).

Comparando os três canais de amostragem, o canal 3 obteve os maiores valores seguido do canal 1 e do canal 2, sendo que o canal 2 teve as mais baixas concentrações de MPS. Enquanto que no período chuvoso, o canal 3 novamente obteve as maiores concentrações tanto em superfície como no fundo seguido do canal 1 e do canal 2.

Sazonalmente o canal 3 obteve os maiores valores tanto no período seco como no chuvoso, como mostra as porcentagens de aumento de MPS no período chuvoso de 51,7% no canal 1, 138,8% no canal 2 e de 127,7% no canal 3, em relação ao período seco.

Resumidamente a concentração de MPS respondeu a sazonalidade nesse sistema tendo as maiores no período chuvoso e a seguinte ordem de valores foi estabelecida entre os rios

analisados: rio Jacaré Grande obteve os maiores valores (9,6 a 66,4 mg.L⁻¹ e 15,7 a 178 mg.L⁻¹), o rio Pará com valores intermediários (6,4 a 109,6 mg.L⁻¹ e 7,2 a 114,4 mg.L⁻¹), e o rio Tocantins com os valores mais baixos (2,8 a 35,2 mg.L⁻¹ e 6,4 a 112,8 mg.L⁻¹), respectivamente período seco e chuvoso.

Comparativamente Kineke & Sternberg (1992, 1995) no âmbito do projeto do AmasSeds (A Multidisciplinary Amazon Shelf Sediment Study) identificaram na zona costeira amazônica a concentração de MPS na ordem de 10 até 100 mg.L⁻¹, observadas nas camadas inferiores entre 2 - 4 m na região interna e no meio da plataforma.

Cavalcante (2007) analisando a propagação da pluma na região costeira do rio Caeté até 200 km na plataforma. Observou que a partir da região do rio Caeté até ~17 km a concentração de MPS variou de 80 - 90 mg.L⁻¹, após 15 km a concentração de MPS ficou abaixo de 21 mg.L⁻¹ no período chuvoso de 2004. Enquanto que na região entorno do estuário do rio Caeté encontrou concentrações máximas de MPS de 80000 mg.L⁻¹, estação 1, e de 6500 mg.L⁻¹, estação 2, no período chuvoso de 2003.

Monteiro (2009) analisando longitudinalmente o valor de MPS no rio Paracauari em três períodos distintos, na região interna do rio Pará, encontrou no período chuvoso valores entre 62 mg.L⁻¹ até 115,66 mg.L⁻¹ com média 93,72 mg.L⁻¹; no intermediário valores entre 19,33 até 63 com média de 37,19 mg.L⁻¹; e no período seco valores entre 12,14 até 18,91 com média de 15,18 mg.L⁻¹. Confirmando que as maiores concentrações de MPS ocorrem no período chuvoso, também encontrado por Ferreira (2013) no rio Paracauari.

Similarmente Zhang *et al.* (2007) realizou amostragem no estuário Changjiang (rio Yangtze), encontrou concentrações de MPS variando entre 100-500 mg.L⁻¹ na estação Datong, que está 625 km a montante da foz, enquanto que na estação de Xuliujing, próximo da foz, variou entre 50-250 mg.L⁻¹ na superfície e de 75-500 mg.L⁻¹ no fundo. Na zona de máxima turbidez do estuário do Changjiang alcançou concentrações perto do fundo entre 1500 e 3000 mg.L⁻¹, sendo 5 vezes maior do que na superfície, enquanto mais afastadas da costa a concentração diminuí até 50 mg.L⁻¹.

4.2.2 Turbidez

4.2.2.1 Rio Jacaré Grande

As águas da margem esquerda rio Jacaré Grande apresentaram níveis de turbidez pouco variáveis nos dois períodos analisados, com média de 24 FTU e variações de 19,2 a 51,2 FTU no período seco (figura 31 A e B). No período chuvoso apresentou média de 60 FTU com variações de 41,8 a 201 FTU, o máximo de turbidez coincide com os máximos de

velocidade tanto na vazante quanto na enchente, porém apresentando os maiores valores de turbidez no fundo.

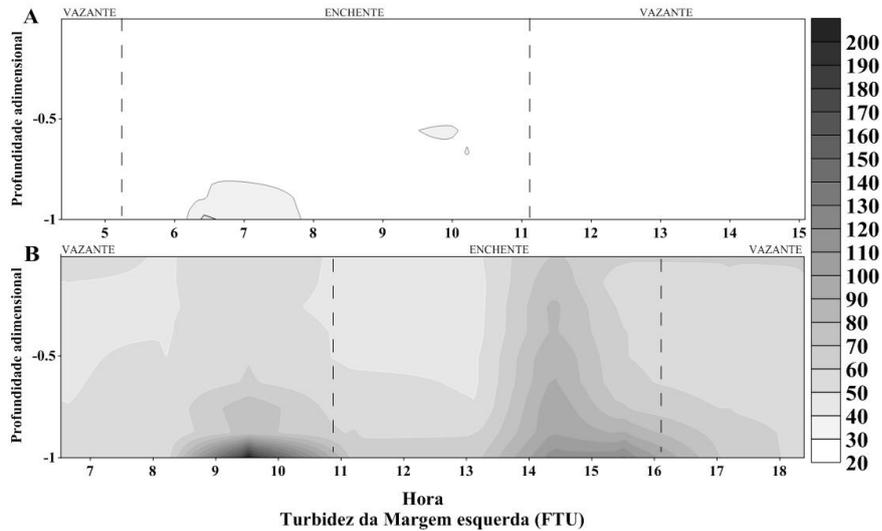


Figura 31: Variação temporal da turbidez na margem esquerda do rio Jacaré Grande no período seco (A) e período chuvoso (B).

A turbidez média no meio do canal no período seco foi de 28 FTU, com variações de 19 a 70 FTU, tendo comportamento similar na enchente e na vazante com picos de turbidez no fundo (figura 32 A e B). Os valores de turbidez no meio do canal seguiram a mesma tendência com máximos valores de turbidez do período com média de 63 FTU e variações de 41 a 230 FTU.

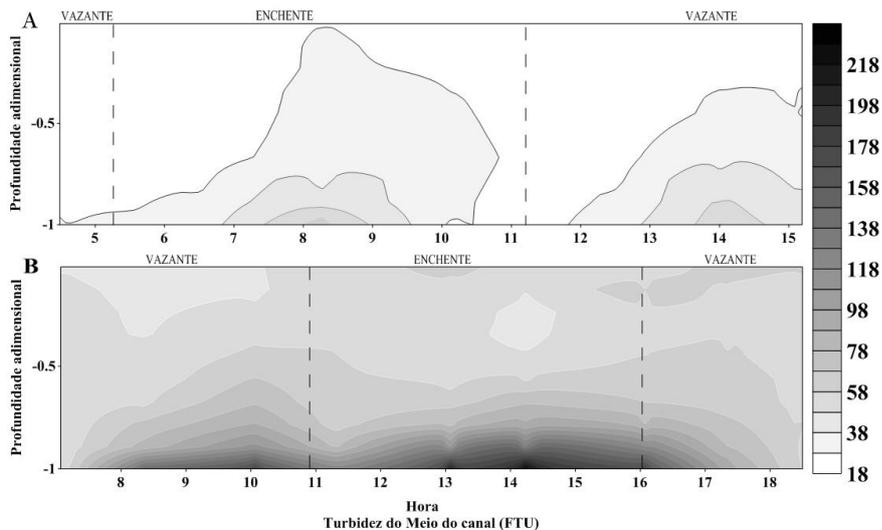


Figura 32: Variação temporal da turbidez no meio do canal do rio Jacaré Grande no período seco (A) e período chuvoso (B).

A turbidez média na margem direita foi de 31,6 FTU, com variações de 21 a 61 FTU no período seco (figura 33 A e B). A turbidez média na margem direita foi de 56 FTU com variação de 38 a 121 FTU no período chuvoso.

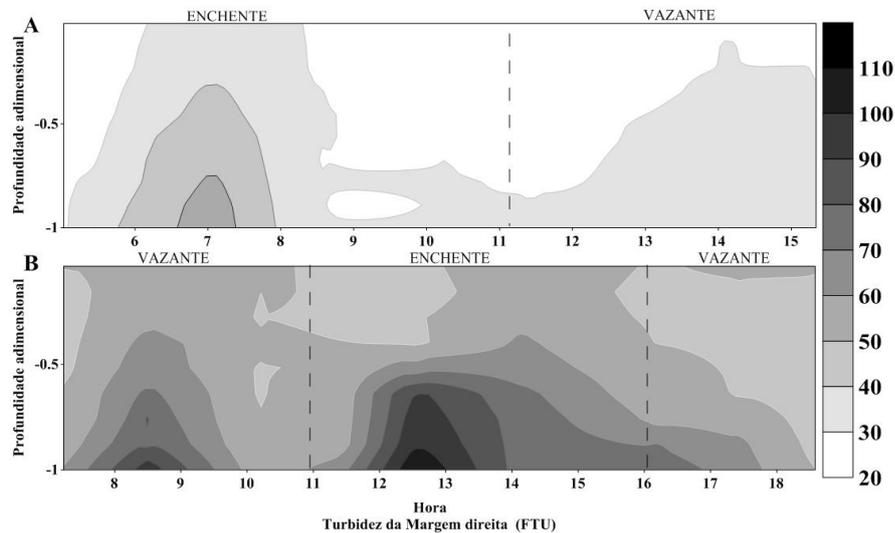


Figura 33: Variação temporal da turbidez na margem direita do rio Jacaré Grande no período seco (A) e período chuvoso (B).

A margem esquerda no período seco durante a vazante a turbidez apresentou valores menores que 30 FTU e na enchente ficando bastante similar, mas com os maiores valores no fundo devido possivelmente à turbulência no máximo da enchente. A turbidez no período chuvoso foi quatro vezes maior em relação ao período seco e o segundo maior em variação de turbidez para o período chuvoso, mas essa alta variação foi pontual durante o máximo da velocidade na vazante.

No meio do canal os valores de turbidez se mostraram o mais expressivo durante o período seco. No período chuvoso se apresentou mais estratificado, diferentemente do período seco que evidenciou máximos isolados, devido à maior turbulência no meio tanto na enchente como na vazante, com os maiores valores no fundo.

A turbidez na margem direita durante o período seco foi desigual, com valores na enchente superiores ao da vazante. Assim como nos demais, os maiores valores foram no fundo, durante os máximos de velocidade, sendo na vazante com o máximo de turbidez mais discreto e não apresentando a mesma resposta da enchente. No período chuvoso ficou com os valores mais baixos entre os três perfis, mas com o dobro da turbidez em relação ao período seco. Os máximos de velocidade causaram maior heterogeneidade na coluna d'água tanto na enchente como na vazante, apresentando os máximos de turbidez no fundo, na enchente.

Comparando os pontos do período seco, a margem direita (média de 31,6 FTU) obteve as maiores concentrações de turbidez seguido do meio do canal (média de 28 FTU) e da margem esquerda (média de 24 FTU). No período chuvoso o meio do canal (média de 63 FTU) que obteve as maiores concentrações seguido da margem esquerda (média de 60 FTU) e da margem direita (média de 56 FTU).

No período seco a margem direita obteve maiores concentrações e no período chuvoso o meio do canal, como mostra as porcentagens de aumento de turbidez de 150 % na margem esquerda, 125 % no meio do canal e de 77,2 % na margem direita, em relação ao período seco.

4.2.2.2 Rio Pará

Os valores de turbidez no canal 1 durante o período seco, a partir dos perfis realizados variou de 13 a 30 FTU. No período chuvoso valores de turbidez no canal 1 apresentaram a menor variação dos três canais, com valores entre 30 a 162 FTU e média de 44 FTU, sendo que na superfície ficou quase homogêneo tanto na enchente como na vazante e no fundo apresentou os maiores valores, mas especificamente durante os máximos de velocidade (figura 34 A e B).

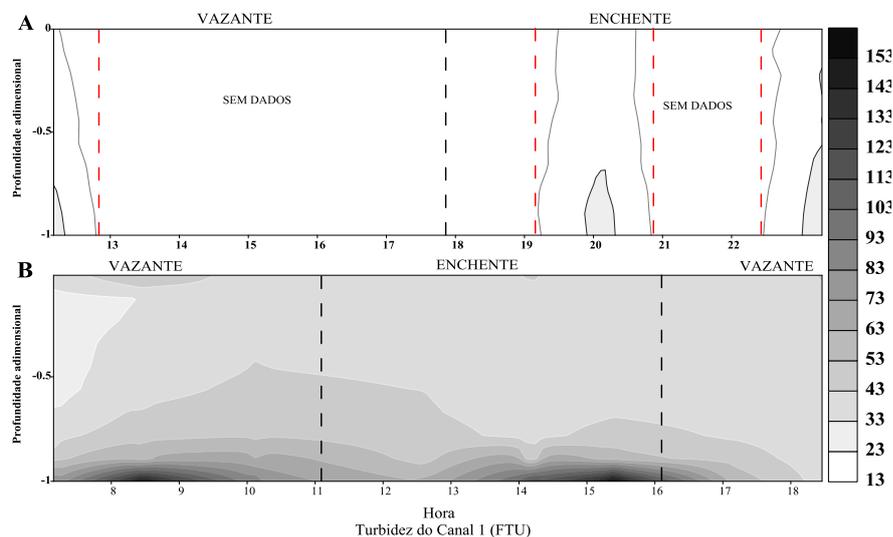


Figura 34: variação temporal da turbidez no canal 1 do rio Pará no período seco (A), as linhas tracejadas em vermelho indicam ausência de dados, e no período chuvoso (B).

Os valores de turbidez no canal 2 durante o período seco, a partir dos perfis realizados variou de 14 a 65 FTU. No período chuvoso os valores de turbidez no canal 2 mostraram a maior variação, com variações de 30 a 216 FTU e média de 47 FTU (figura 35 A e B). A turbidez se comportou similar ao canal 1, sendo quase homogêneo na superfície e

apresentando os maiores valores no fundo durante os máximos de velocidade, com a turbidez da vazante quase o dobro da enchente no fundo.

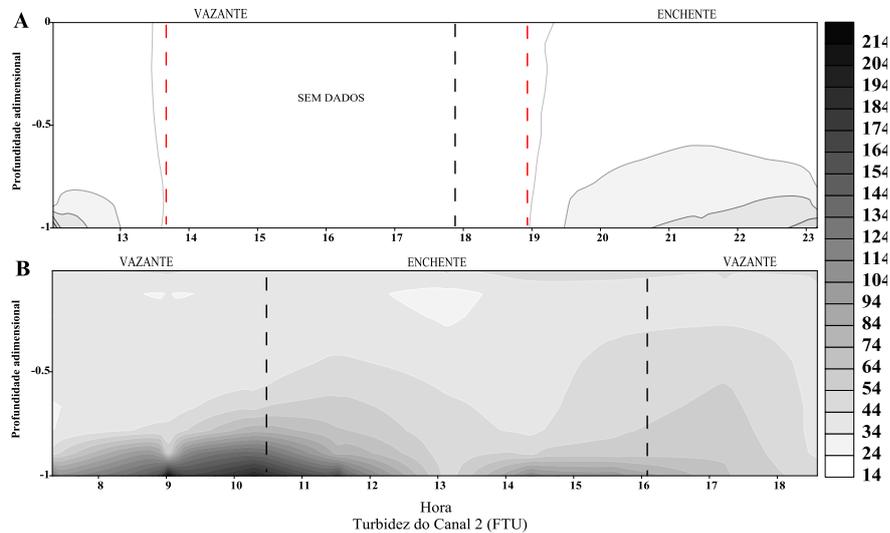


Figura 35: variação temporal da turbidez no canal 2 do rio Pará no período seco (A), as linhas tracejadas em vermelho indicam ausência de dados, e no período chuvoso (B).

Os valores de turbidez no canal 3 durante o período seco, a partir dos perfis realizados variou de 13 a 104 FTU. No período chuvoso os valores de turbidez no canal 3 apresentaram valores altos com uma maior variação de 25 a 193 FTU e média de 40 FTU (figura 36 A e B). O corpo se comportou similar aos outros canais, com os maiores valores no fundo durante e com a turbidez da vazante quase o dobro da enchente no fundo.

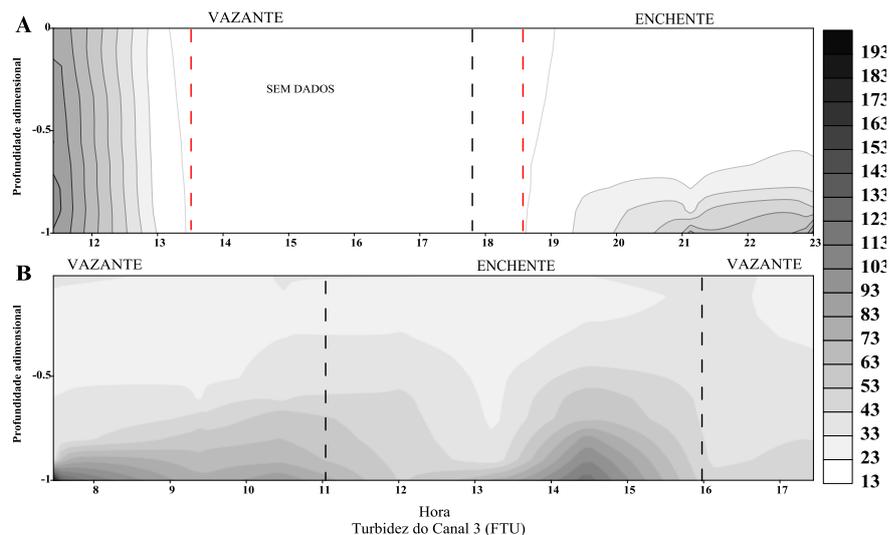


Figura 36: Variação temporal da turbidez no canal 3 do rio Pará no período seco (2012), as linhas tracejadas em vermelho indicam ausência de dados, e no período chuvoso (B).

Análise da turbidez do rio Pará no período seco ficou prejudicado, dificultando a extração de qualquer afirmação mais detalhada. No canal 1 registramos valores de 13 a 30

FTU, canal 2 de 14 a 65 FTU e no canal 3 de 13 a 104 FTU. No período chuvoso o canal 2 (média de 47 FTU) obteve as maiores concentrações, seguido do canal 1 (média de 44 FTU) e do canal 3 (média de 40 FTU).

4.2.2.3 Rio Tocantins

A turbidez no canal 1 durante o período seco apresentou a menor variação com valores de 7 a 36,5 FTU e média de 15,6 FTU. No geral apresentou um corpo quase homogêneo tanto na enchente como na vazante, mas com um máximo de turbidez no fundo durante a vazante (figura 37 A). No período chuvoso o canal 1 triplicou os valores de turbidez em relação ao período seco, com valores entre 12 a 107 FTU, com média de 28 FTU. Diferentemente do ano anterior apresentou um corpo mais estratificado, com os máximos de turbidez coincidente com os máximos de velocidade (figura 37 B).

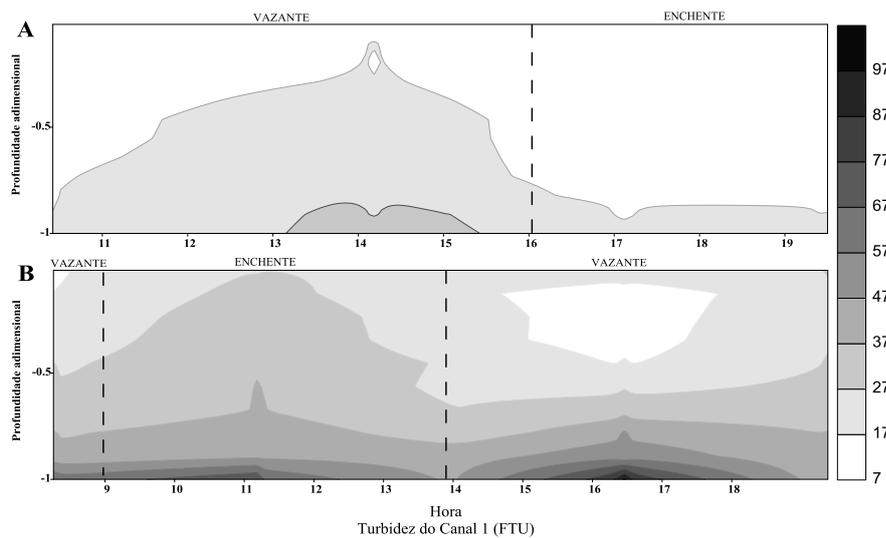


Figura 37: Variação temporal da turbidez do Canal 1 do rio Tocantins no período seco (A) e período chuvoso (B).

A turbidez do canal 2 no período seco foi baixa, com uma variação de 3,8 a 38 FTU e média de 10 FTU. O corpo se apresentou homogêneo durante todo o ciclo de maré, com um máximo de turbidez durante a baixa-mar no fundo (figura 38 A). No período chuvoso o canal 2 atingiu o triplo da turbidez do período seco, com variações de 10 a 122 FTU e média de 32 FTU. O corpo se apresentou estratificado durante todo o ciclo de maré, com dos picos de turbidez no fundo na enchente e na vazante (figura 38 B).

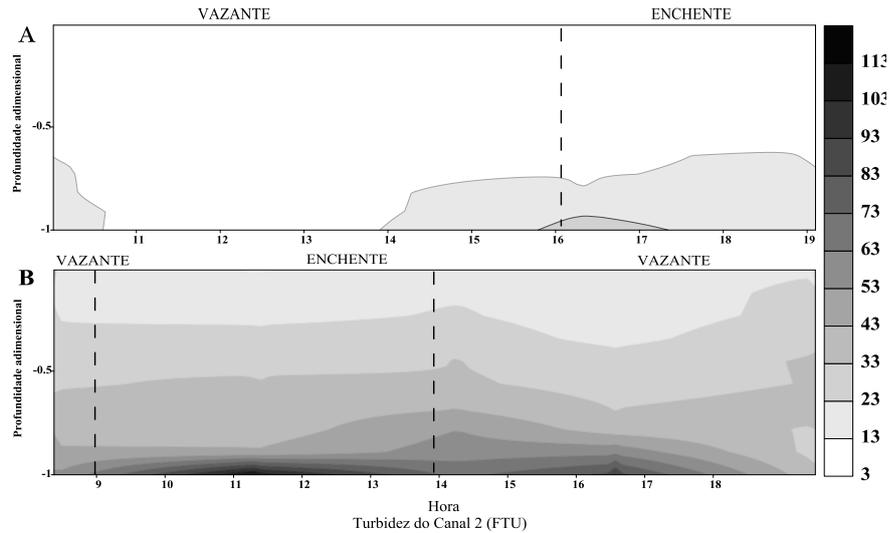


Figura 38: Variação temporal da turbidez do Canal 2 do rio Tocantins no período seco (A) e período chuvoso (B).

No período seco o canal 3 apresentou os maiores valores de turbidez, com variação entre 4,2 a 50 FTU e média de 16,4 FTU. O sistema se apresentou similar tanto na enchente como na vazante, com os valores máximos no fundo durante a enchente (figura 39 A). No período chuvoso o canal 3 apresentou valores baixos com variação de 11 a 75 FTU e média de 26 FTU, mas superiores ao período seco. O corpo se apresentou similar durante o ciclo de maré tanto, com os maiores estratificações na enchente (figura 39 B).

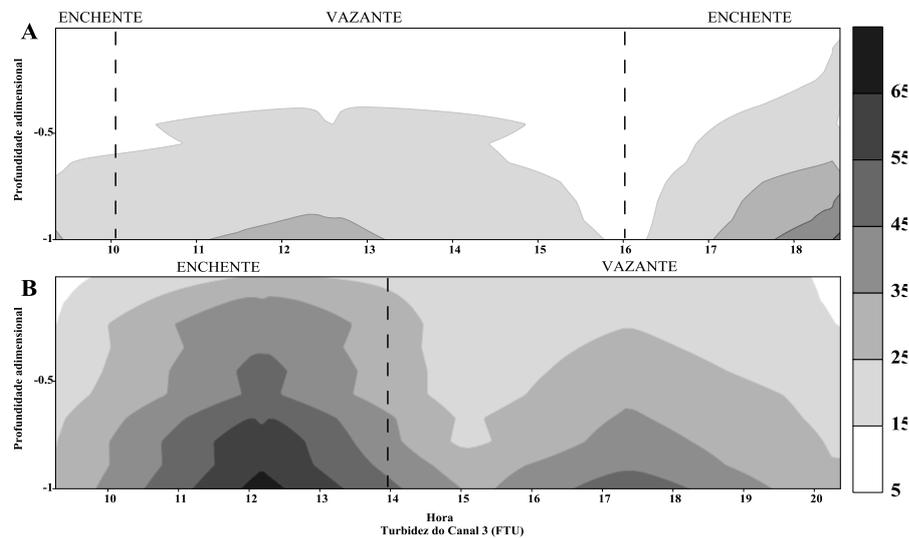


Figura 39: Variação temporal da turbidez do Canal 3 do rio Tocantins no período seco (A) e período chuvoso (B).

A análise dos canais no período seco indicou que o canal 3 (média de 16,4 FTU) apresentou os maiores valores de turbidez, seguido pelo canal 1 (média de 15,6 FTU) e do canal 2 (média de 10 FTU). No período chuvoso houve uma mudança nessa ordem, o canal 2

(média de 32 FTU) mostrou os maiores valores, seguido do canal 1 (média de 28 FTU) e do canal 3 (média de 26 FTU).

Comparando sazonalmente o canal 3 no período seco teve maior influência e o canal 2 no período chuvoso, como mostra as porcentagens de aumento de turbidez que é de 79,4 % no canal 1, 220 % no canal 2 e de 58,2 % no canal 3, em relação ao período seco.

Hughes *et al.*, (1998) realizou amostragens longitudinais de turbidez durante dois ciclo de maré no rio Hawkesbury (Austrália), estuário de micromaré, encontrou valor médio de 90 FTU ao longo da coluna d'água, máximo de 228 FTU ao fundo e mínimo de 5 FTU em superfície. Sendo que na cabeça do estuário o fornecimento de sedimentos é muito baixo, os valores de concentração de MPS encontrados são menores que 5 mg.L^{-1} de acordo com Hooper & Humphreys (1993).

4.2.3 Transporte de MPS

A tabela 5 apresenta todas as etapas do transporte resultante de MPS que é a diferença entre o transporte de enchente e o de vazante, em cada rio analisado ao longo de um ciclo de maré em cada período. Sendo que o sinal de + ou - indica importação (+) ou exportação (-) em toneladas por ciclo de maré. Os dois métodos será representado por um (1) para o método adaptado de Colby (1957) e dois (2) para o método adaptado de Miranda *et al.* (2002).

O transporte resultante de MPS no rio Jacaré Grande durante o período seco foi de -3232,8 t/cm (1) e de -3806,9 t/cm. (2), em direção ao rio Amazonas. O transporte no período chuvoso foi de 16204,6 t/cm (1) e 14787,7 t/cm (2), tabela 5.

No rio Pará durante o período seco, o transporte resultante de MPS foi de -13946 t/cm. (1) e de -10871,6 t/cm (2), ambos em direção a baía do Marajó. No período chuvoso o transporte de MPS foi de -2493,2 t/cm (1) e de -7640,5 t/cm (2), em direção a baía de Marajó, tabela 5.

O transporte resultante de MPS no rio Tocantins foi de 7613,6 t/cm (1) e de 7219,6 t/cm (2), em direção a montante do rio. No período chuvoso o transporte foi de -17750,7 t/cm (1) e de -19592,2 t/cm (2), em direção a jusante, tabela 5.

Tabela 5: Métodos de Transporte de MPS em toneladas por ciclo de maré.

		Transporte de MPS		
		Maré/Resultante	Adaptado de Colby, 1957	adaptado de Miranda et al. 2002
RIO JACARÉ GRANDE	SECO	Vazante	-12.925,9	-12.107,4
		Enchente	9.693,0	8.300,4
		Resultante	-3.232,8	-3.806,9
	CHUVOSO	Vazante	-20.817,0	-18.426,8
		Enchente	37.021,5	33.145,6
		Resultante	16.204,5	14.718,7
RIO PARÁ	SECO	Vazante	-30.129,5	-16.482,0
		Enchente	16.183,6	27.263,6
		Resultante	-13.946,0	-10.781,6
	CHUVOSO	Vazante	-32.887,4	-33.870,8
		Enchente	30.394,2	26.230,3
		Resultante	-2.493,2	-7.640,5
RIO TOCANTINS	SECO	Vazante	-28.842,3	-26.054,1
		Enchente	36.455,9	33.273,7
		Resultante	7.613,6	7.219,6
	CHUVOSO	Vazante	-105.441,1	-87.800,1
		Enchente	87.690,4	68.207,9
		Resultante	-17.750,7	-19.592,2

O rio Jacaré Grande atuou como exportador de sedimento para o rio Amazonas durante o período seco e invertendo (importador) sua direção para o rio Pará no período chuvoso. O transporte de sedimento no período chuvoso foi 5 vezes maior que no período seco. A diferença no transporte resultante de MPS com base nos métodos aplicados foi de 15% no período seco e de 10,1% no período chuvoso.

No período chuvoso houve um grande transporte de MPS em direção ao rio Pará, através do rio Jacaré Grande, sendo que apenas um terço desse volume passou na seção analisada no rio Pará (Currálinho) no mesmo período analisado, e o restante teoricamente se depositou nesse percurso.

O rio Pará tanto durante o período seco como no chuvoso se comportou como exportador de MPS, ambos em direção a baía do Marajó. Porém no período chuvoso houve uma redução no transporte de MPS para a baía de Marajó de cerca 1/3. A diferença no transporte resultante de MPS com base nos métodos aplicados foi de 29,4% no período seco e no período chuvoso de 67,4%.

O rio Tocantins apresentou-se como um importador de MPS no período seco, influenciado pela maré, em direção a montante do rio. Enquanto que durante o período chuvoso, como o sistema foi controlado pela componente fluvial, comportou-se como um

exportador de sedimento. A diferença no transporte resultante de MPS com base nos métodos aplicados foi de 5,4% no período seco e no período chuvoso de 9,4%.

Comparando os valores de transporte apresentados na tabela 5, observou-se que os transportes apresentam a mesma direção, porém com valores de massas diferentes ao longo do ciclo de maré. Além disso, a diferença em porcentagem entre os métodos variou de 5,4 a 29,4% no período seco e de 9,4 a 67,4% no período chuvoso, as quais são aceitáveis. Pois as variáveis utilizadas no cálculo são abordadas de modos diferentes e o rio Pará no período chuvoso mostrou a maior diferença devido uma disparidade no transporte de enchente causando essa ambigüidade entre os métodos. Os dois métodos evidenciaram a mesma tendência de transporte de MPS, com os maiores valores de MPS e transporte no período chuvoso, mostrando-se confiável a sua aplicação dos dois métodos na região.

O transporte de MPS calculado em diferentes momentos de maré mostrou a contribuição de cada forçante no processo, vazante (fluvial) e enchente (maré), as quais apresentam grandezas diferenciadas em função da sazonalidade. Durante o ciclo de maré, teve-se uma forte relação entre as velocidades de correntes com o transporte e as concentrações MPS, assim como descrita por Nichols (1986); Kjerfve & Wolaver (1988) e Dyer (1988).

O transporte de massas entre os sistemas forneceu estimativas de valores de exportação e/ou importação de água e materiais em um ciclo de maré, com os quais é possível detectar variações no aporte de sedimentos, padrões de erosão e sedimentação, associados às mudanças morfológicas na região. Comparativamente, os três rios funcionam como um sistema exportador em diferentes períodos sazonais. Contudo, no período seco há duas rotas de exportação de MPS: o rio Amazonas e a baía do Marajó, exportando entre 7,3 a 9,5 mil toneladas de MPS (figura 40).

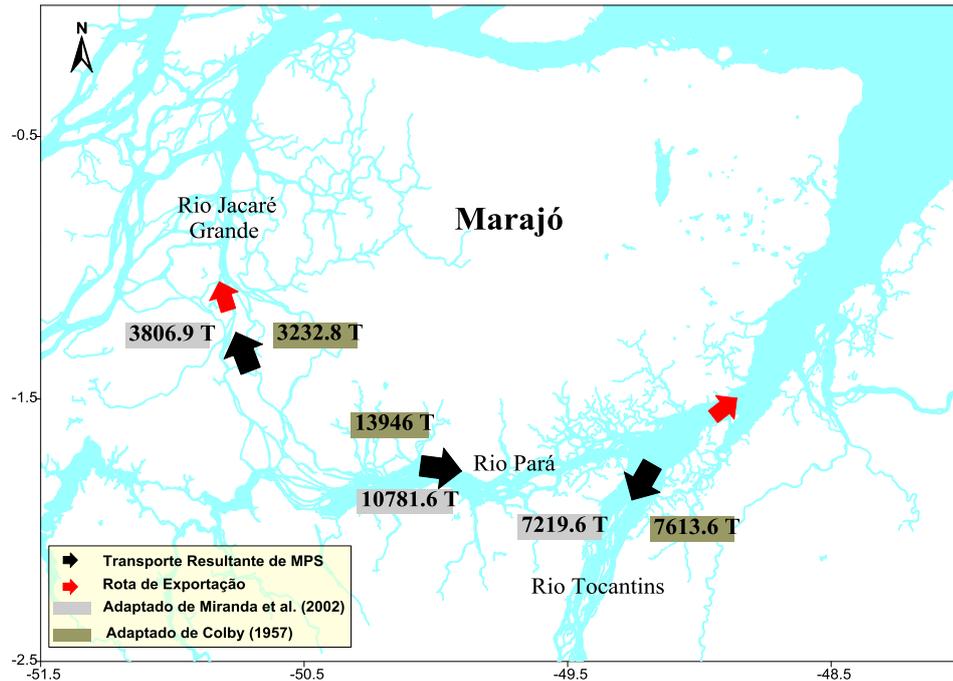


Figura 40: Direção do Transporte resultante de MPS de cada rio e as rotas de exportação no período seco, com base nos métodos adaptados de Colby (1957) e de Miranda *et al.* (2002).

Enquanto que no período chuvoso há apenas uma rota de exportação em direção a baía do Marajó, devido possivelmente ao aumento do nível de base do rio Amazonas e do rio Tocantins direcionando entre 4 a 12,5 mil toneladas de MPS para a baía do Marajó (figura 41).

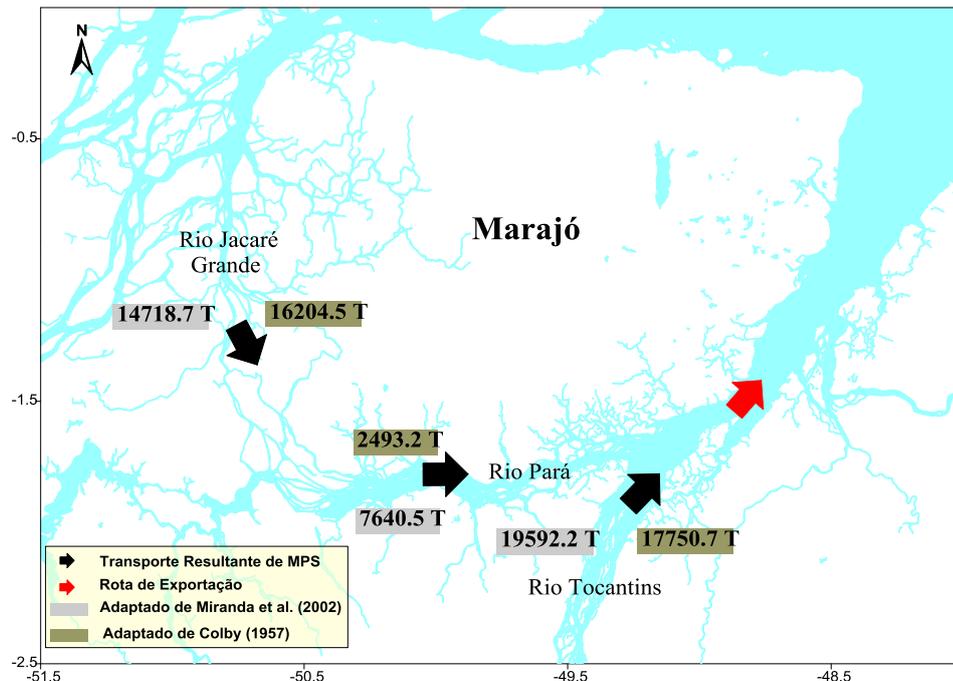


Figura 41: Direção do Transporte resultante de MPS de cada rio e as rotas de exportação no período chuvoso, com base nos métodos adaptado de Colby (1957) e de Miranda *et al.* (2002).

Lima *et al.* (2005), estimou a exportação anual de MPS pela bacia Araguaia-Tocantins para a região oceânica de $3,06 \times 10^6$ toneladas de MPS. Nesta estimativa, não se considerou as contribuições do rio Para e da baía do Marajó. A partir dos valores de transporte de MPS no período seco e chuvoso, estimou que o sistema transporte anualmente entre 5 a $7,2 \times 10^6$ toneladas para o rio Amazonas e a baía do Marajó, sendo que possivelmente o que vai para a baía do Marajó (entre $3,7$ a $5,8 \times 10^6$ toneladas) é bem superior ao proposto por Lima *et al.* (2005), sendo que possivelmente o valor total de MPS exportado para a região oceânica seja bem superior a este valor.

O transporte de MPS na região é mais intenso no chuvoso, podendo possivelmente provocar modificações morfológicas em um curto período. Essas modificações morfológicas foram observadas a partir de carta náutica, carta 305 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da foz do rio Tocantins, nos levantamentos feitos nos anos de 1985/1992, sendo mais de 80% feito em 1985 e 1992 limitado ao setor noroeste (Banco do Frechal), comparado com o levantamento de 2010.

Em aproximadamente três décadas o rio Tocantins, apresenta feições bastantes irregulares com evidentes alterações de escavamento e preenchimento do canal pela corrente de enchente (figuras 42 e 43), possivelmente em função da instalação da represa alterou (reduziu) as taxas de transporte de volume e MPS. O rio Tocantins foi represado totalmente no início de setembro de 1984 e reaberto somente na segunda quinzena de novembro, ficando o rio sem alimentação de montante por um período de dois meses e meio, ocasionando inúmeras modificações hidráulicas até encontrar sua estabilidade.

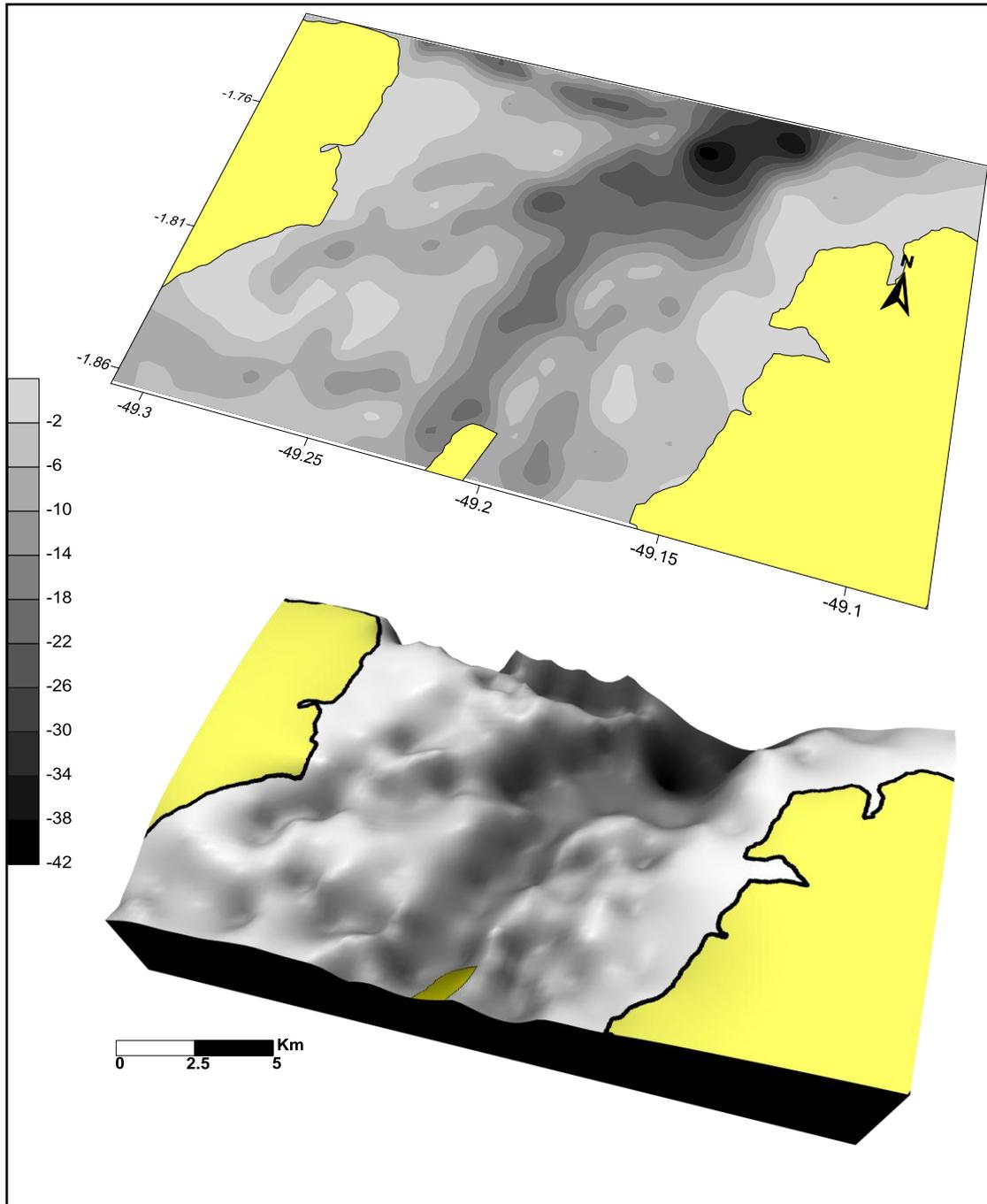


Figura 42: Carta batimétrica da Foz do rio Tocantins (1985/1992).

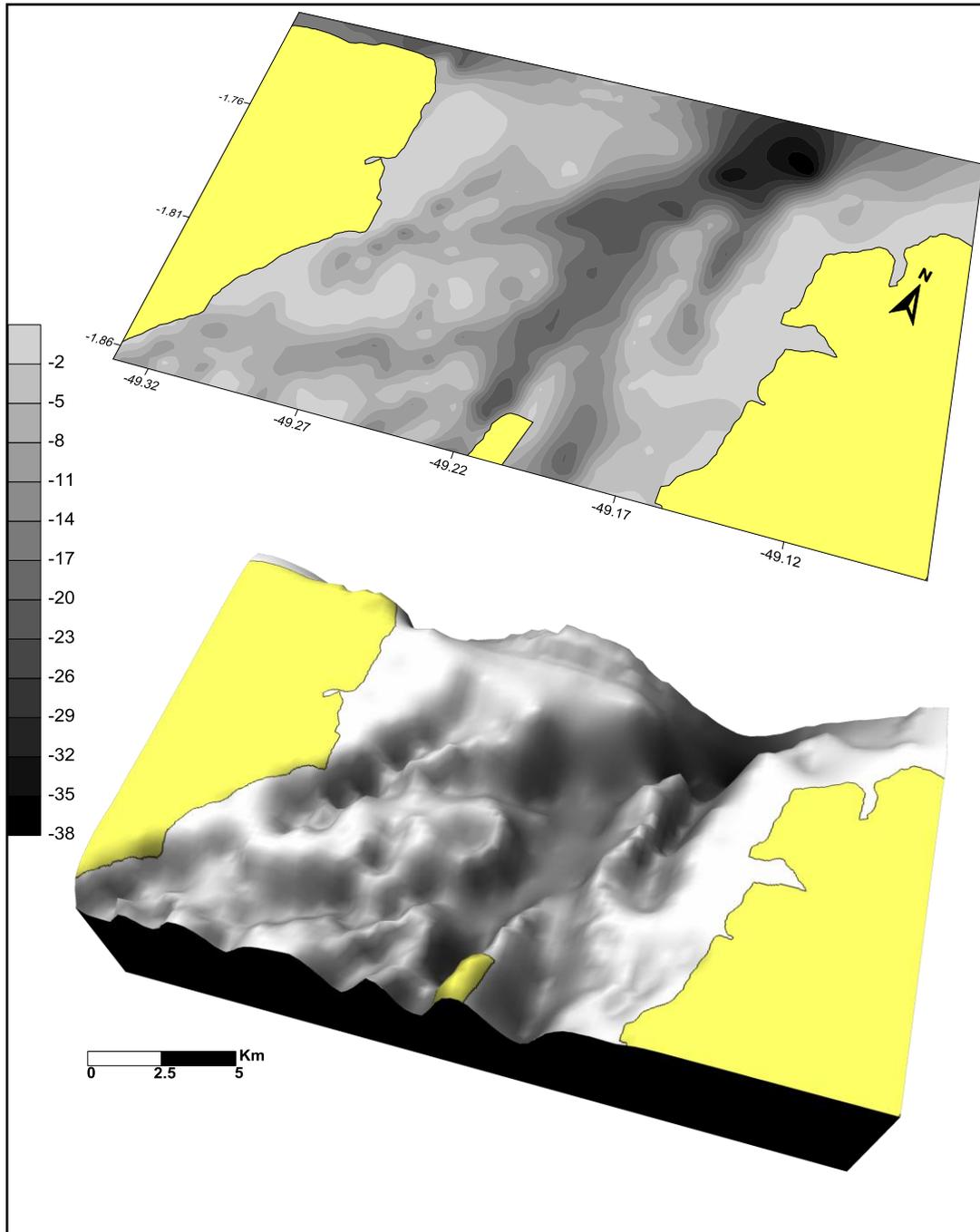


Figura 43: Figura: Carta batimétrica da Foz do rio Tocantins (2010).

Similarmente a baía do Guajará em um período de 60 anos passou por intensos processos morfodinâmicos de erosão e sedimentação. Mas especificamente processos de escavamento, deslocamento, formação e destruição de canais relacionados principalmente á hidrodinâmica local, descrito na literatura por Santos (1982); Pinheiro (1987); Silveira (1989); Mendes *et al.*, (2004); Miranda e Mendes (2007); e Gregório (2006; 2008; 2009

5 CONCLUSÕES

A ZCIT e o ENSO provocaram pequenos episódios de *El Niño* ou *La Niña*, evidenciando fenômenos de baixa intensidade, que afetaram a região e ocasionado a baixa precipitação na área.

No período de janeiro a junho, em condições normais atingem altas taxas fluviais e pluviais, proporcionando um acréscimo no nível de base, como mostrou o transporte de volume no período chuvoso. O rio Pará funcionou como exportador de volume, nos dois períodos. O rio Tocantins evidenciou um padrão de importação no período seco e de exportação no período chuvoso. O rio Jacaré Grande mostrou a influência do rio Amazonas, apresentando um padrão inverso, de importação no período chuvoso e de exportação no período seco.

A análise dos métodos de transporte de volume foi bem satisfatória, verificou-se uma tendência de exportação (63 mil a 110 mil m³/cm) em direção ao rio Amazonas e a baía do Marajó no período seco, enquanto no período chuvoso em direção (256 mil a 310 mil m³/cm) a baía do Marajó.

A maré na área foi caracterizada como de meso-maré e do tipo semidiurna. A maré possui um padrão assimétrico com a duração da vazante superior a de enchente. A assimetria mostrou a particularidade de cada área, onde nem sempre o evento de menor duração apresentou as maiores velocidades ou transporte.

A velocidade no rio Jacaré Grande foi mais intensa na enchente nos dois períodos. O rio Pará as velocidades o canal 2 (o meio) foram superiores nos dois períodos, com taxas de 50 a 100% maiores. O rio Tocantins obteve velocidades similares nos canais, com as maiores na enchente no período seco e na vazante no período chuvoso.

O transporte de MPS na região é regido pela sazonalidade e pela oscilação da maré, assim como a turbidez. Os valores de MPS no período chuvoso foram maiores, sendo decrescente do rio Jacaré Grande até o rio Tocantins, respectivamente período seco e chuvoso. A turbidez seguiu a mesma tendência de MPS com a maré, tendo os valores máximos durante a enchente.

Com base nos métodos de transporte de MPS, mostrou valores similares e que obedecia a mesma direção, portanto revelando ser uma ferramenta positiva. O transporte mostrou que o rio Jacaré Grande atuou como exportador no período seco e importador no período chuvoso, o rio Pará como exportador nos dois períodos e o rio Tocantins como importador no período seco e exportador no período chuvoso.

O sistema formado pelos três rios mostrou a mesma tendência de exportação nos dois períodos, tendo no período seco duas rotas de exportação, o rio Amazonas e a baía do Marajó, e no período chuvoso uma rota de exportação, a baía do Marajó. Anualmente o sistema exporta entre 5 a 7,2 milhões de toneladas, sendo que possivelmente a baía do Marajó recebe entre 3,7 a 5,8 milhões de toneladas, podendo o volume transportado para a região oceânica ser bem maior.

Os fluxos de MPS associado à variabilidade das condicionantes ambientais modelam a região estuarina, como na foz do rio Tocantins e na Baía do Guajará, sendo preciso um monitoramento contínuo devido a possíveis acidentes náuticos ou a derramamentos de óleo ou qualquer contaminante na região que acarrete danos ao meio. Avaliando os dados de transporte de volume, MPS e hidrodinâmicos existem indícios de mutabilidade do ambiente em um curto período (rio Tocantins), que dificultam previsões e medidas de mitigação sem o monitoramento adequado da região, como nos casos de obras portuárias e de represamento (Hidrelétricas).

REFERÊNCIAS

- Ab'sáber, A. N. 2010. Zoneamento fisiográfico e ecológico do espaço total da Amazônia Brasileira. *Estudos avançados* 24 (68).
- Abrantes, F.; Ambar, I.; Zenk, W.; Hinrichsen, H.; Zahn, R. 1994. Suspended matter of the Mediterranean water outflow off Portugal. In: *Proceedings of the Oceans Sciences Meeting*, American Geophysical Union, San Diego.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). 2011. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/portalsnrh/Principal/tabid/36/Default.aspx>. Acesso em: 03/2011.
- Amos, C. 1996. Siliciclastic tidal flats. In: Perillo, G. M. E. (ed.), *Geomorphology and sedimentology of estuaries* (2nd edition), Elsevier, Amsterdam, pag. 273-306.
- Aragão, J. O. R., 1986. A general circulation model investigation of the atmospheric response to El Nino. *NCAR/CT - 100*: 144p.
- Asp, N. E.; Schettini, C. A. F.; Eduardo Siegle, E.; Silva, M. S.; Brito, R. N. R. 2012. The Dynamics of a Frictionally - Dominated Amazonian Estuary. *Brazilian Journal of Oceanography*, 60 (3): 391-403.
- Barthem, R. B.; Schwassmann, H. O. 1994. Amazon river influence on the seasonal displacement of the salt wedge in the Tocantins river estuary, Brazil, 1983-1985. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Zoologia*, 10 (1).
- Baumgarten, M. G. Z. *et al.* 1996. *Manual de análises em Oceanografia Química*, Editoras FURG/Pallotti, 142 pag.
- Biggs, R. J. 1987. Sources of estuarine cohesive sediment and their coagulation. In: *Sedimentation control to reduce maintenance dredging of navigational facilities in estuaries. Report and Symposium Proceedings*, National Academy Press, Washington, D.C., 32-52.
- Blanton, J.; Alber, M.; Sheldon, J. 2001. Salinity Response of the Satilla River Estuary to Seasonal Changes in Freshwater Discharge. *Proceedings of the 2001 Georgia Water Resources Conference*, March 26-27.
- Boyd, R.; Dalrymple, R.W.; Zaitlin, B.A. 2006. Estuarine and incised-valley facies models. In: Posamentier, H.W.; Walker, R.G. (Eds.). *Facies Models Revisited*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication n 84, pag. 171-235.
- Bradley, E. & Philip, B. 1999. A comparative study of nutrient behavior along the salinity gradient of tropical and temperate estuaries. *Estuaries*. v.22, n. 2A, pag. 313 -326.
- Cavalcante, G. H. 2007. *Processos oceanográficos na região costeira e Estuarina do rio Caeté, Pará, Brasil. Tese (doutorado em Geoquímica Ambiental)*. Universidade Federal Fluminense.
- Christofolletti, A. 1980. *Geomorfologia*. 2. Ed. São Paulo: Edgard Blucher.

- Colby, B. R. 1957. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. Transactions, Amer. Geophys. Union. Vol. 38, n. 5, oct, pag.708-719.
- COMISSÃO MUNDIAL DE BARRAGENS. 2000. Estudos de Caso da Comissão Mundial de Barragens: Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Brasil). RELATÓRIO FINAL. Disponível em: http://www.lima.coppe.ufrj.br/files/projetos/ema/tucurui_rel_final.pdf.
- Cunha, H. B.; Pascoaloto, D. 2006. Hidroquímica dos rios da Amazônia. Centro Cultural dos Povos da Amazônia. Disponível em: http://www.povosamazonia.am.gov.br/pdf/hid_qui.pdf.
- D'Aquino C. A; Filho, J. P. & Schettini C. A. F. 2010. Fluvial Modulation of Hydrodynamics and Salt Transport in a Highly Stratified Estuary. Brazilian Journal of Oceanography, 58 (2):165-175.
- D'Aquino C. A; Andrade Neto J. S.; Barreto G. A. M & Schettini C. A. F. 2011. Caracterização Oceanográfica e do Transporte de Sedimentos em Suspensão no Estuário do rio Mampituba, SC. Revista Brasileira de Geofísica 29(2): 217-230.
- Defant, A. Physical Oceanography. Oxford, Pergamon, vol. 2, 1960.
- Dias, F. J. S. 2005. Avaliação da descarga e geoquímica do material em suspensão no estuário do rio Jaguaribe – CE. Departamento de Geologia. Monografia. Universidade Federal do Ceará. 107 pag.
- Dias, F. J. S. 2007. Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE). Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais. Universidade Federal do Ceará.
- Dyer, K. R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo, G.M.E. (Ed.) *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries Developments in Sedimentology*. New York, Elsevier Science B.V., pag. 423-449.
- Dyer, K. R. 1997. Estuaries: A physical introduction (2 nd Edition). New York, John Wiley and Sons, 195 pag.
- Dyer, K. R. 1988. Fine sediment particle transport in estuaries. In: Physical Processes in Estuaries. J. Dronkers & W.V. Leussen (Eds). Springer-Verlag, New York, p: 295-310.
- Emery, K. O.; Lepple, F.; Toner, L.; Uchupi, E.; Rioux, R. H.; Pople, W.; Hulburt, E. M. 1974. Suspended matter and other properties of surface waters of the North-eastern Atlantic Ocean. Journal Sedimentary Petrology 44, pag. 1087-1110.
- Ferreira, G. P. 2013. Caracterização hidrodinâmica e do transporte de sedimentos na região fluvio-estuarina do rio Paracauari – ilha de Marajó – Pará. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. Universidade Federal de Pernambuco.
- Framinã, M. B.; Brown, O. B. 1996. Study of the Río de la Plata turbidity front, Part 1: Spatial and temporal distribution. Continental Shelf Research, 16, pag. 1259-1282

- Freitas, P. S. & Abrantes, F. 2002. Suspended particulate matter in the Mediterranean water at the Gulf of Cadiz and off the southwest coast of the Iberian Península. *Deep -Sea Research II* 49 (2002), pag. 4245 - 4261.
- Freitas, P. T. A. 2011. Distorção e atenuação da maré em um tidal river Amazônico: Efeitos da Sazonalidade da Vazão Fluvial e Geomorfologia (Sistema Guamá - Capim). Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Biologia Ambiental da Universidade Federal do Pará - Campus de Bragança.
- Friedrichs, C. T.; Lynch, D. R.; Aubrey, D. G. Velocity asymmetries in frictionally-dominated tidal embayments: longitudinal and lateral variability. In: D.Prandle (Ed). *Dynamics and exchanges in estuaries and th coastal zone*. Wshington, DC: American Geophysical Union, 1992. p. 277-312.
- FUNDAÇÃO ESTUDOS DO MAR - FEMAR. 2012. Catálogo de estações maregráficas brasileira. 2012. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas>.
- Gabioux, M. 2002. Influência da lama em suspensão na propagação da maré na plataforma Amazônica. Dissertação de mestrado. COPPE - Programa de Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gallo, M. N. 2004. A influência da vazão fluvial sobre a propagação da maré no estuário do rio Amazonas. Dissertação de mestrado. COPPE - Programa de Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gallo, M. N. 2009. Escoamentos em Planícies de Marés com Influência Fluvial – Canal Norte do Rio Amazonas. Tese de doutorado. COPPE - Programa de Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- George, K. L. 1995. *Tides for marine studies*. University of Plymouth. Institute of Marine Science (2 ed.). 180 pag.
- Godin, G. 1985. Modification of river tides by the discharge. *Jour. of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 111(2): 257-274.
- Gordon, R. L. 1989. Acoustic Measurement of River Discharge.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 7, July 1989, pag. 925-936.
- Gregório, A. M. S. 2008. Contribuição à Gestão Ambiental da Baía de Guajará (Belém - Pará - Amazônia) Através de Estudo Batimétrico e Sedimentológico. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gregório, A. M. S., Mendes, A. C., 2009, “Characterization of Sedimentary Deposits at the Confluence of Two Tributaries of the Pará River Estuary (Guajará Bay, Amazon)”, *Continental Shelf Research*, v. 29, n. 3, pag. 609-618.

- Gregório, A. M. S., Mendes, A., Silva, C. A., *et al.*, 2006, “Depósitos Lamosos da Baía de Guajará (Pará, Amazônia, Brasil)”. In: I Semana Acadêmica dos Alunos de Pós-Graduação em Geociências, pag. 63-66, Porto Alegre.
- Hooper, C. and Humphreys, S. 1993. Water Quality in the Hawkesbury - Nepean River and its Tributaries: Maldon Weir to Flint and Steel Point July 1991 to June 1992. Water Board, AWT Science and Environment, Report no. 92/56.
- Hughes, M. G.; Harris, P. T. and Hubble, T. C. T. 1998. Dynamics of the turbidity maximum zone in a micro-tidal estuary: Hawkesbury River, Australia. *Sedimentology* 45, 397 - 410.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA_INMET. 2013. Acessado em Novembro/2013. Disponível em : http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes-auto-graf.
- Kineke, G. C., Sternberg, R. W. 1992. Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. *Marine Geology*. v.108, pg. 253-258.
- Kineke, G. C., Sternberg, R. W. 1995. Distribution of fluid mud on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*. v.125, n.3/4, pag .193-233.
- Kjerfve, B. & Wolander. 1988. Sampling optimization for studies of tidal transport in estuaries. *American Fisheries Society Symposium*, vol. 3, pag. 26-33.
- Kjerfve, B. 1987. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: Day Jr.; Hall, C.H.A.S.; Kemp, W.M.; Yáñez-Aranciba, A. (Eds.). *Estuarine Ecology*. New York, Wiley, pag. 47-78.
- Latrubesse, E. M. & Stevaux, J. C. 2002. Geomorphology and environmental aspects of the Araguaia fluvial basin, Brazil. *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 129:pag. 109-127.
- Latrubesse, E. M.; Stevaux, J. C. & Sinha, R. 2005. Tropical rivers. *Geomorphology*, 70: 187-206.
- Lima *et al.* 2005. Suspended sediment fluxes in the large river basins of Brazil. *Sediment Budgets 1* (Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). *IAHS Publ.* 291, pag. 355 - 363.
- Lima, J. E. F. W. ; Santos, P. M. C.; Carvalho, N. O. ; Silva, E. M. 2004. Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Brasília, DF: ANEEL: ANA.
- Manheim, F.; Meade, R.; Bond, G. 1970. Suspended matter in the surface waters of the Atlantic continental margin from Cape Cod to the Florida Keys. *Science* 167, pg. 371-376.
- Mantelli, L. R & Rossetti, D. F. 2009. Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da ilha do Marajó. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 39 (1).

- Masselink, G.; Hughes, M. 2003. An introduction to coastal processes and geomorphology. Hodder & Stoughton, London, 354 pag.
- Matos, M. F. A. 2009. Caracterização de processos morfodinâmicos e hidrodinâmicos do cinturão lacustre meridional da reserva biológica do lago Piratuba, Amapá. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Meade, R. H. 1999. Large rivers and their floodplain as conveyers and storers of sediment: an overview. In: Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale Rivers Basins Conference, pp. 1-4, Manaus, Brazil, 15-19 nover.
- Medeiros, C.; Kjerfve, B. 1993. Hydrology of a tropical estuarine system: Itamaracá, Brazil. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 36: pag. 495-515.
- Mendes, A. C., Silva, C. A., Frazão, E. P., 2004, “Levantamento Batimétrico da Baía de Guajará, Belém/PA”. In: III Workshop Técnico-Científico do Projeto Petrorisco, pp.1-3, 3, Belém, Set. 2004.
- MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO. 2012. 4º Balanço do Programa de Aceleração do Crescimento (Janeiro/Abril de 2012). Disponível em: <http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/divulgacao-do-balanco/balanco-completo>. Consultado em 06/2012.
- Miranda, A. G. O. 2012. Hidrodinâmica e transporte de sedimentos em uma área de manguezal na Planície Costeira de Bragança, Amazônia Oriental - Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Universidade Federal do Pará.
- Miranda, A. G., Mendes, A.C., 2007, “Evolução Batimétrica da Baía de Guajará, Belém/PA”. In: XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, pp. 1-60, Belém, Abr. 2007.
- Miranda, L. B.; Castro, B. M. & Kjerfve, B. 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo, EDUSP, pag. 424.
- Molinier, M., Guyot, J. L., Oliveira, E. DE, Guimarães, V. & Chaves, A. 1994. Hidrologia da Bacia do Rio Amazonas. A Água em Revista 2 (i), pag. 31-36.
- Monteiro, C. M. 2009. Aspectos hidrodinâmicos, hidrológicos e microbiológicos do estuário do Caeté-PA (Brasil). Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Biologia Ambiental. Universidade Federal do Pará.
- Monteiro, S. M. 2009. Dinâmica dos parâmetros abióticos na zona de mistura do estuário do rio Paracauari, ilha do Marajó-Pa. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica - Universidade Federal do Pará.
- Nichols, M. M. 1986. Effects of fine sediment resuspension in estuaries. In: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. A. J. Mehta (Ed.), Spring-Verlag, New York, vol. 14, pag. 5-4.

- Nittrouer, C. A., Wright, L. D. 1994. Transport of particles across continental shelves. *Reviews of Geophysics*, 32, pag. 85-113.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). 2012. RE-3/262/2011 - Atualização de séries históricas de vazões - Período 1931 a 2010. Disponível em: http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx. Consultado em 04/2012.
- Paphitis, D. E Collins, M. B. 2005. Sediment resuspension events within the (microtidal) coastal waters of Thermaikos Gulf, northern Greece. *Continental Shelf Research*, n° 25, p. 2350-2365.
- Pinheiro, R. V. L., 1987. Estudo Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário Guajará - Belém (Pará). Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará.
- Preste, Y. O. 2013. Transporte de volume na zona limite da camada de mistura do rio Pará, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Oceanografia - Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará, Belém - PA.
- Pritchard, D. W. 1955. Estuarine circulation patterns. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, v. 81, n. 717, 1-11 pag.
- REDE ESTADUAL DE PREVISÃO CLIMÁTICA E HIDROMETEOROLÓGICA DO PARÁ - RPCH. Boletim de análise e previsão climática. Ano VI, N° 61 ao 71, 2012.
- REDE ESTADUAL DE PREVISÃO CLIMÁTICA E HIDROMETEOROLÓGICA DO PARÁ - RPCH. Boletim de análise e previsão climática. Ano VII, N° 74 ao 79, 2013.
- Salomão, M. S. M. B.; Molisani, M. M.; Ovale, A. R. C.; Rezende, C. E.; Lacerda, L. D.; Carvalho, C. E. V. 2001. Particulate heavy metal transport in the lower Paraíba do Sul River basin, southeastern, Brazil. *Hydrological Processes*. Vol. 15. (4). 587-593.
- Santos, J. A., 1982. Porto de Belém - Análise dos estudos realizados sobre a sedimentação na área portuária. Relatório INPH 80/82 código 107/01. 2v . Rio de Janeiro. 160 pag.
- Santos, R. R. L.; Silveira, O. F. M. 2012. Análise textural, mineralógica e análise dos sedimentos de fundo do rio Tocantins na área de abrangência do projeto monitoramento integrado da zona costeira amazônica. Relatório final de Iniciação Científica (PIBIC-UFFPA).
- SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE – SECTAM. 2005. Política de Recursos Hídricos do Estado do Pará: Lei n° 6.381/01 e legislação complementar / Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Belém: SECTAM.
- Silva, I. O. 2009. Distribuição da Vazão Fluvial no Estuário do Rio Amazonas. Dissertação (mestrado) – COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- Silveira, O. F. M., 1989. Estudo Batimétrico / Sonográfico do Estuário Guajará, Belém -PA. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará.
- Simpson, M. R. 2001. "Discharge Measurement Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current". United States Geological Survey – USGS, Open-file: Report 01-1.
- Simpson, M. R. and Oltmann, R. N. 1990. An Acoustic Doppler Discharge Measurement System. Proceedings of the 1990 National Conference on Hydraulic Engineering, Vol. 2, 903-908.
- Souza, R. R. 2006. Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA) / Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 159 pag.
- Souza, W. F. L.; Knoppers, B.; Balzer, W.; Leipe, T. 2003. Geoquímica e fluxos de nutrientes, Ferro e Manganês para a costa leste do Brasil. *Geochimica Brasiliensis*. 17(2). 130-144.
- Speer, P. E. & Aubrey, D. G. 1985. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21: 207-224.
- Strickland, J. D. H. & Parsons, T. R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2° ed. Ottawa, Fisheries Research Board of Canada. 310 p. (Bulletin 167).
- Tong, J.; Qiang, Z.; Deming, Z. & Yijin, W. 2006. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470–2003). *Quaternary International* 144, 144: 29-37.
- Truccolo, E. C. 2005. Hidrodinâmica de Estuários em Freqüência Mareal e Submareal. Tese de Doutorado em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 101 pag.
- Uncles, R. J.; Smith, R.E. 2005. A note on the comparative turbidity of some estuaries or Americas. *Journal of Coastal Research*. 21. 4. 845 - 852.
- Warem, L. A. Zimmermam, A. P. 1993. Trace metal/SPM associations in a fluvial system: physical and chemical influences. In: particulate matter and aquatic contaminants. Ed. Rao SS. Lewis Publishers. P. 425.
- Wells, J. T. 1995. Tide-dominated estuaries and tidal rivers. In: Perillo, G. M. E. (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries (Developments in Sedimentology)*, vol. 53. Elsevier, New York, 179-205 pag.
- Williams, G. P. & Wolman, M. G. 1985. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Washington, Geological Survey Professional Paper 1286. 83 p.
- Zhang, J.; Wu, Y.; Jennerjahn, T.C; Ittekkot, V.; He, Q. 2007. Distribution of organic matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and their stable carbon and nitrogen isotopic ratios: Implications for source discrimination and sedimentary dynamics. *Marine Chemistry* 106, pag. 111–126.