

CONTRIBUIÇÃO HIDROSEDIMENTAR DO RIO PARÁ PARA A ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA

Hydro-sedimentary contribution of the Pará River to the Amazon coastal zone

Maurício Costa

Universidade Federal do Pará, Brasil
mauricio.oceo@gmail.com

Sury Monteiro

Universidade Federal do Pará, Brasil
sury@ufpa.br

Marcelo Rollnic

Universidade Federal do Pará, Brasil
rollnic@ufpa.br

Recebido: 24/04/2025
Aceito: 06/06/2025

Resumo

A Zona Costeira Amazônica Brasileira é marcada por uma complexa interação entre os rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins, que conectam as bacias Amazônica e Tocantins-Araguaia. Este estudo analisou a dinâmica dos fluxos de massa e volume, com ênfase na contribuição sazonal do rio Pará. O rio Pará atua como elemento de equilíbrio do sistema, enquanto o rio Tocantins é o principal contribuidor durante o período chuvoso. Os parâmetros de turbidez e material em suspensão mostraram correlação direta com os máximos de corrente. Durante o período seco, o fluxo hídrico dirige-se tanto ao rio Amazonas quanto à baía de Marajó, já no período chuvoso apenas à baía de Marajó. A contribuição do rio Amazonas foi entre 4 vezes superior em volume e 12,5 vezes em massa, em relação ao rio Pará. Os resultados destacam o papel hidrológico do rio Pará, colocando-o como terceiro rio mundial em volume de água.

Palavras-chave: baía de Marajó, Estrito de Breves, rio Tocantins, MPS e fluxo de água doce.

Abstract

The Brazilian Amazon Coastal Zone is shaped by the complex interaction of the Jacaré Grande, Pará, and Tocantins rivers, which link the Amazon and Tocantins-Araguaia basins. This study investigated mass and volume flux dynamics, with emphasis on the Pará River's seasonal contribution. The Pará river functions as a stabilising element in the system, while the Tocantins dominates during the rainy season. Turbidity and suspended matter showed a strong correlation with peak currents. In the dry season, flow is directed to both the Amazon River and Marajó Bay, whereas in the wet season, it flows solely toward Marajó Bay. The Amazon's contribution was up to four times greater in volume and 12.5 times in mass compared to the Pará. Findings underscore the hydrological importance of the Pará River, ranking it as the world's third-largest river by discharge volume.

Keywords: Marajó Bay; Breves Strait; Tocantins River; SPM; Freshwater Fluxes.

1. INTRODUÇÃO

A Zona Costeira Amazônica Brasileira (ZCAB) compreende as bacias Amazônica e Tocantins-Araguaia, caracterizada por uma complexa rede de canais e interconexões. Nesse sistema os rios Amazonas e Pará exercem funções centrais, atuando na regulação do transporte hídrico e sedimentar regional.

A área do Estreito de Breves representa a principal conexão entre as duas bacias. Desde o século XIX, essa conexão tem sido alvo de trabalhos científicos. Entre 1861 e 1866, José da Costa Azevedo (Barão de Ladário) realizou as primeiras medições de fluxo na região, estimando um volume de $1.430 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ do rio Amazonas para o rio Pará (Huber, 1902). Posteriormente, em 1879, Herbert Smith descreveu em seu livro “Brazil, the Amazon and the Coastal” a comunicação entre os rios Amazonas e Pará durante as cheias.

Estudos mais recentes revelaram novas dinâmicas nessa interface. Por exemplo, Silva e Vinzon (2010) demonstraram que o transporte residual no rio Jacaré Grande é de 1.600 a $3.800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, principal canal do Estreito de Breves, e de acordo Huber (1902) a turbidez superior à dos rios Amazonas e Pará.

Além disso, há variações marcantes na influência das marés: enquanto no rio Amazonas a corrente permanece majoritariamente direcionada ao oceano (Gallo e Vinzon, 2015; Borba e Rollnic, 2016), no rio Pará ocorrem inversões significativas durante o ciclo de maré, impactando a dinâmica sedimentar e a ação da intrusão salina (Prestes *et al.*, 2014; Rosário *et al.*, 2016). Essas diferenças são cruciais para o entendimento dos processos hidrossedimentares na região costeira.

Nesse contexto, o rio Amazonas tem sido amplamente estudado ao longo do tempo e reforçam a magnitude desse sistema (Beardsley *et al.*, 1995; Gabioux *et al.*, 2005; Gallo e Vinzon, 2005; Le Bars *et al.*, 2010), com destaque para sua expressiva vazão média de $18 \times 10^4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (ANA, 2025) e volume anual estimado entre 4.955 e $7.280 \text{ km}^3.\text{ano}^{-1}$ (Oltman, 1968; Mikhailov, 2009). A contribuição sedimentar também é significativa, com $0,6$ a $1,3$ bilhões de toneladas por ano (Meade *et al.*, 1985; Filizola; Guyot, 2011).

Por outro lado, o rio Pará tem ganhado destaque em investigações recentes voltadas ao transporte de volume, intrusão salina e zonas de turbidez (Prestes *et al.*, 2014; Borba e Rollnic, 2016; Rosário *et al.*, 2016; Mascarenhas *et al.*, 2016; Prestes *et al.*, 2017; Prestes *et al.*, 2020; Carneiro *et al.*, 2020). O transporte residual do rio Pará varia entre $10,8$ e $74,3 \times 10^3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Prestes *et al.*, 2014), enquanto o aporte sedimentar anual é

estimado em $3,2 \times 10^6$ toneladas.ano $^{-1}$ (Lima *et al.*, 2004). A contribuição do rio Tocantins é relevante, com vazão na ordem de 11×10^3 m 3 .s $^{-1}$ (ONS, 2025).

Considerando a relevância econômica e ambiental da ZCAB, que abriga atividades como portos, pesca artesanal/industrial e áreas de conservação, torna-se essencial o manejo adequado desses recursos. A gestão integrada e o monitoramento contínuo dos fluxos hídricos e sedimentares são fundamentais para mitigar impactos ambientais e assegurar o equilíbrio ecológico da região.

Nesse contexto, o presente estudo pretende compreender a correlação entre os fluxos de massa e volume dos rios Amazonas e Pará, com foco na contribuição sazonal do rio Pará na dinâmica hidrossedimentar da zona costeira.

2. MATERIAS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo abrange o sistema fluvio-estuarino dos rios Jacaré Grande (RJG), Pará (RP) e Tocantins (RT), todos com influência de maré. O rio Tocantins tem origem no planalto central brasileiro, enquanto o rio Jacaré Grande atua como canal de ligação entre os rios Amazonas e Pará, por meio do Estreito de Breves.

O rio Pará não possui uma nascente definida. Ele é formado a partir da confluência entre as bacias Amazônica e Tocantins-Araguaia, sendo considerado uma desembocadura compartilhada que forma a ZCAB. A sua formação ocorre no limite sul da ilha de Marajó, na região conhecida como baía das Bocas, composta por um conjunto de baías e enseadas, entre as quais se destaca a baía de Marajó, também denominada estuário do rio Pará (Figura 1).

O clima da região segue um padrão bem definido: um período chuvoso entre dezembro e junho, e um período seco de julho a novembro. Aproximadamente 80% da precipitação anual ocorre no primeiro semestre, com totais que variam de 1.850 e 3.050 mm anuais (INMET, 2023). A sazonalidade das chuvas é controlada pela migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que oscila entre 14°N em agosto-setembro e 2°S em março-abril (Souza Filho *et al.*, 2009), com picos de precipitação entre março e abril, e aumento da vazão fluvial nos meses seguintes.

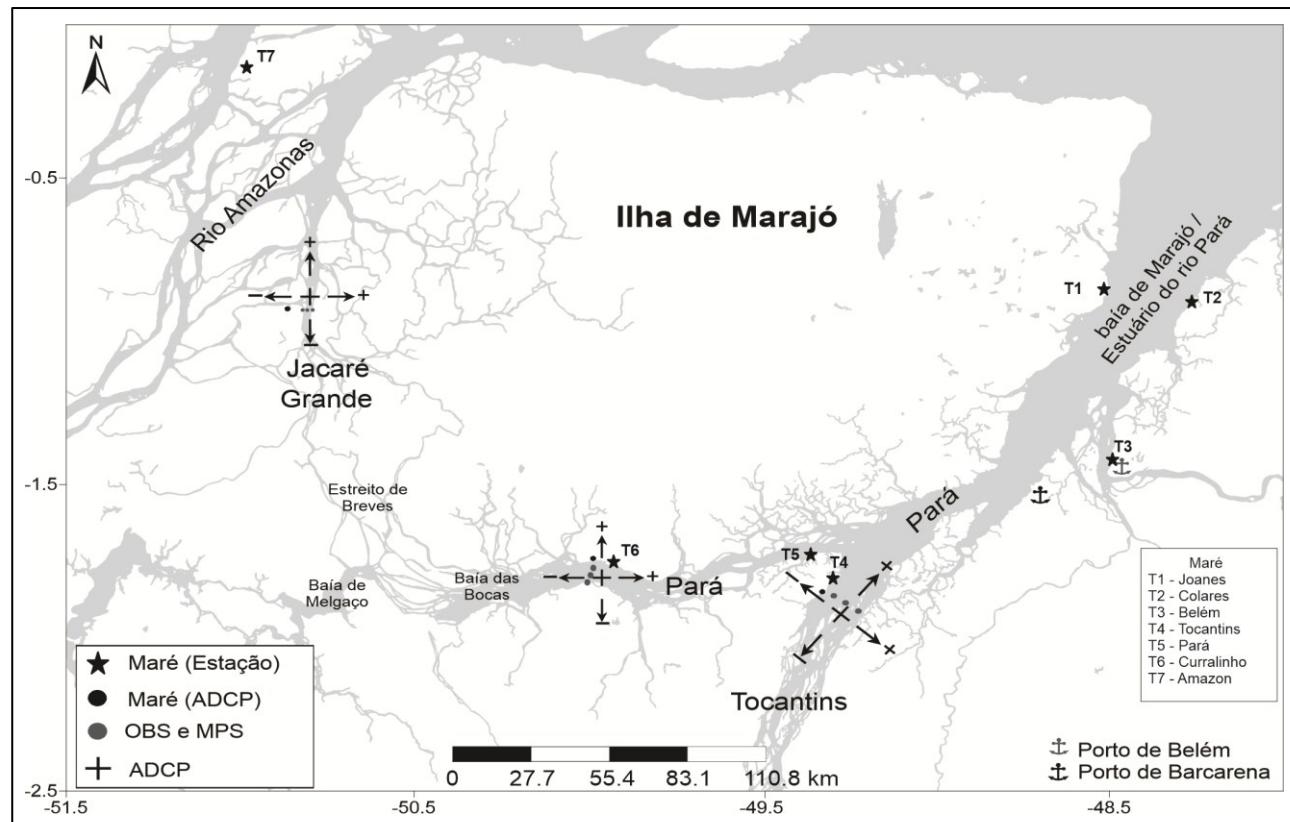


Figura 1 - Área de estudo: pontos de amostragem e a rotação dos canais que foram rotacionados para alinhar-se à orientação do canal, jusante (positivo – vazante) e montante (negativo – enchente).

Fonte: Elaborado pelos autores

2.2. Amostragens e Instrumentação

Foram realizadas duas campanhas, representando os períodos secos (novembro de 2012) e chuvosos (junho de 2013), com o objetivo de caracterizar os fluxos hidrossedimentares e os processos físicos nas seções dos rios RJG, RP e RT. Cada campanha contemplou um ciclo completo de maré (~13 hora) em cada seção. A coleta de dados enfrentou desafios logísticos devido à extensão das seções e a duração das seções: RJG (2 km e 22 min), RP (8 km e 40 min) e RT (15 km e 85 min).

As variáveis físicas foram obtidas por meio dos seguintes equipamentos e procedimentos. Nível da coluna d'água: sensores de pressão Solinst Levelogger, com registros a cada 15 minutos. Da série longa de monitoramento, apenas Curralinho (estação S6) obteve o menor período de medição, Tabela 1. Corrente e vazão: medição contínua de margem a margem com ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), modelo Workhorse Rio Grande 600 kHz. Turbidez: sensores ópticos OBS (Optical Backscatter Sensor), com perfis verticais de turbidez e taxa de aquisição a cada 2 segundos. Material particulado em suspensão (MPS): amostras coletadas em superfície e fundo, nas margens e centro da seção, com frequência de 1 hora.

Tabela 1: Estações de monitoramento do nível da coluna d'água na região.

Estação	Parâmetro [m]	Período	Dias de Amostragens
T1	Nível	Seco	55
T2	Nível	Seco	42
T3	Nível	Seco / Chuvoso	365
T4	Nível	Seco / Chuvoso	139
T5	Nível	Seco / Chuvoso	109
T6	Nível	Chuvoso	15
T7	Nível	Chuvoso	110

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados de nível foram analisados com base na razão de amplitude, relação de fase e defasagem para indicar distorção e o número de forma, segundo Defant (1960), considerando a sincronia entre estações para determinar a propagação da onda de maré.

A concentração de MPS foi determinada pelo método Gravimétrico de Volatização em mg.l^{-1} (Strickland e Parsons, 1972). A turbidez foi mensurada em FTU (Unidades de Turbidez Formazina), com precisão de $\pm 0,3$ FTU (0-1000 FTU). Estabeleceu-se uma curva de calibração entre turbidez e MPS, por meio de uma regressão polinomial, ($\text{MPS} = 0,0025 [\text{FTU}]^2 + 0,9542 [\text{FTU}] + 12,532$) com $R^2 = 0,73$.

Os dados do ADCP foram rotacionados para se alinhar à orientação do canal (Figura 1). Os vetores de correntes e direção foram decompostos em componente longitudinal (u), positivo para vazante e negativo para enchente.

O transporte de volume (T_V) foi calculado com base nas equações de fluxo e transporte de propriedades para um perfil vertical (Miranda *et al.*, 2017) (Eq. 1). A unidade é em metros ou quilômetros cúbicos por ciclo de maré ($\text{m}^3.\text{cm}^{-1}$ ou $\text{km}^3.\text{cm}^{-1}$).

O transporte de MPS (T) seguiu o mesmo princípio, adicionando a concentração média de MPS [C_{ss}] (Eq. 2), considerando os fluxos de enchente e vazante. A unidade é em toneladas por ciclo de maré (tons.cm^{-1}).

$$T_V = \frac{1}{t} \int_0^t \bar{u} A_t d_t \quad \text{Eq. 1}$$

Onde \bar{u} - corrente média; A - área da seção; t - tempo do ciclo de maré.

$$T = \frac{1}{t} \int_0^t \bar{u} A_t d_t = < \bar{u} C_{ss} A d_t >; \quad \text{Eq. 2}$$

Onde t - tempo de enchente ou vazante; \bar{u} - corrente média; A - área da seção; C_{ss} - concentração média do MPS.

As análises estatísticas incluíram estatística descritiva (média, desvio padrão, variância) e testes não paramétricos, adotando-se nível de significância de $\alpha = 0,05$. O teste de Kruskal-Wallis foi utilizado para comparar múltiplas amostras, seguido do teste de Dunn (post hoc) para identificar diferenças específicas. Para comparações entre duas amostras, aplicou-se o teste de Mann-Whitney.

A análise estatística incluiu estatísticas descritivas (média, desvio padrão, variância) e métodos não paramétricos para examinar diferenças espaciais e temporais significativas. Testes de Kruskal-Wallis foram utilizados para comparar múltiplas amostras, com Dunn's post hoc para identificar diferenças específicas. Para até duas amostras, o teste de Mann-Whitney foi aplicado. O nível de significância adotado foi de $\alpha = 0,05$.

3. RESULTADOS

3.1. Maré dinâmica

A análise das séries de nível registradas nas estações de monitoramento revelou uma redução progressiva da amplitude da maré em direção à montante (Tabela 2). A variação do nível médio da maré nas seções dos rios RJA (~2 m) e RP (~1,1 m) mostrou-se consistente em ambos os períodos amostrados. No RT, a variação foi mais acentuada, aumentando de 2 m no período seco para 3,2 m no período chuvoso.

As análises das constituintes harmônicas dominantes, M2 e S2, indicaram um regime predominantemente semidiurno, com fator de forma de 0,13, caracterizado por duas preamarés e duas baixamar por dia. As alturas máximas de maré apresentaram redução longitudinal: 4,4 m (T2) e 4,2 m (T1) a jusante no rio Pará, 3,8 na porção intermediária (T3) e valores entre 3,3 m (T5) e 2,8 m (T4) à montante.

A defasagem da maré entre as estações foi calculada com base na sincronia dos registros horários. A propagação inicia na estação T2 (margem direita do rio Pará), apresentando defasagem de 9,7 minutos em relação à T1 (margem esquerda). Entre T2 e T3, observa-se uma defasagem de 1,8 h; de T3 para T4/T5, cerca de 2,4 h. A defasagem interna entre Belém (T3) e Curralinho (T6) é de 6,5 h. Já a defasagem entre o rio Amazonas (T7) e as estações do rio Pará varia de 2,8 h (T3), 3,8 (T6) e 4,5 h (T2). Essa diferença gera uma onda de choque entre os fluxos de maré provenientes dos rios Amazonas e Pará, especialmente nas regiões da baía das Bocas e do Estreito de Breves.

Tabela 2: Média das alturas e do tempo da maré nas estações de medições de longo período.

Estação	T1	T2	T3	T4	T5	T7
Maré Média (m)	2,8	2,9	2,5	2,4	2,1	3,0
Média das marés altas de Sizígia (m)	3,3	3,4	3	2,7	2,4	3,5
Média das marés altas de Quadratura (m)	1,8	1,8	1,6	1,6	1,4	2,3
Tempo de Enchente (h)	5,8	5,6	5,4	5,2	5,1	5,5
Tempo de Vazante (h)	6,5	6,7	6,9	7,1	7,2	6,9

Fonte: Dados da pesquisa.

3.2. MPS e Turbidez

A concentração de material particulado em suspensão (MPS) e os valores da turbidez apresentaram variações espaciais e sazonais. Os maiores valores foram registrados no período chuvoso, com aumento progressivo de montante para a jusante, do RT para o RJG. A análise temporal pelo teste de Mann-Whitney do MPS indicou que não houve diferenças entre enchente e vazante. No entanto, observaram-se diferenças significativas na coluna d'água, com destaque para os rios RJG e RP em ambos os períodos, e para o RT apenas no período chuvoso ($p < 0,05$; Tabela 3).

Tabela 3: Teste estatístico para análise temporal nos períodos seco e chuvoso. Diferenças significativas ($\alpha = 0,05$; $p < 0,05$). Rios Jacaré Grande (RJG), Pará (RP) e Tocantins (RT).

Temporal (Mann-Whitney)	MPS			Turbidez		
	RJG	RP	RT	RJG	RP	RT
Período	$<10^{-4}$	0,17	0,03	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
Seco – Enchente / Vazante	0,95	0,34	0,37	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
Seco - Superfície / Fundo	0,01	$<10^{-3}$	0,34	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
Chuvoso – Enchente / Vazante	0,05	0,5	0,15	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$
Chuvoso - Superfície / Fundo	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-3}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$	$<10^{-4}$

Fonte: Dados da pesquisa.

A análise espacial por Kruskal-Wallis do MPS também mostrou diferenças significativas entre os períodos secos e chuvosos ($p < 0,05$). O teste de Dunn mostrou que, no período chuvoso, os rios RT e RJG apresentaram concentrações semelhantes de MPS, enquanto no período seco houve diferenciação entre todos os rios.

A turbidez seguiu comportamento similar ao MPS, com diferenças temporais e espaciais significativas ($p < 0,05$), segundo os testes de Mann-Whitney e Kruskal-Wallis. Os maiores valores foram registrados no RJG, seguidos por RP e RT. Em termos sazonais e de maré, os valores máximos de MPS se invertem entre períodos e fases da maré: no período seco, os maiores valores ocorreram na vazante (RJG e RP); no período

chuvisco, na enchente. A exceção foi o RT; a maior concentração foi registrada durante a enchente, com redução de aproximadamente 20% na vazante (Figuras 2 e 3).

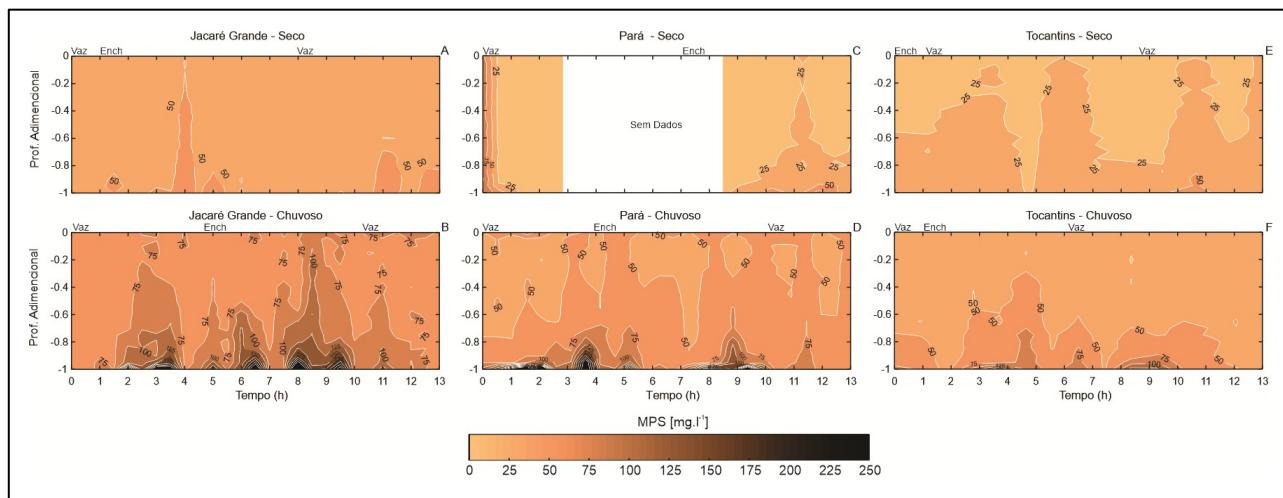


Figura 2 - Variação temporal do MPS nos rios Jacaré Grande (A, B), Pará (C, D) e Tocantins (E, F) durante o período seco e chuvoso. **Fonte:** Dados da pesquisa.

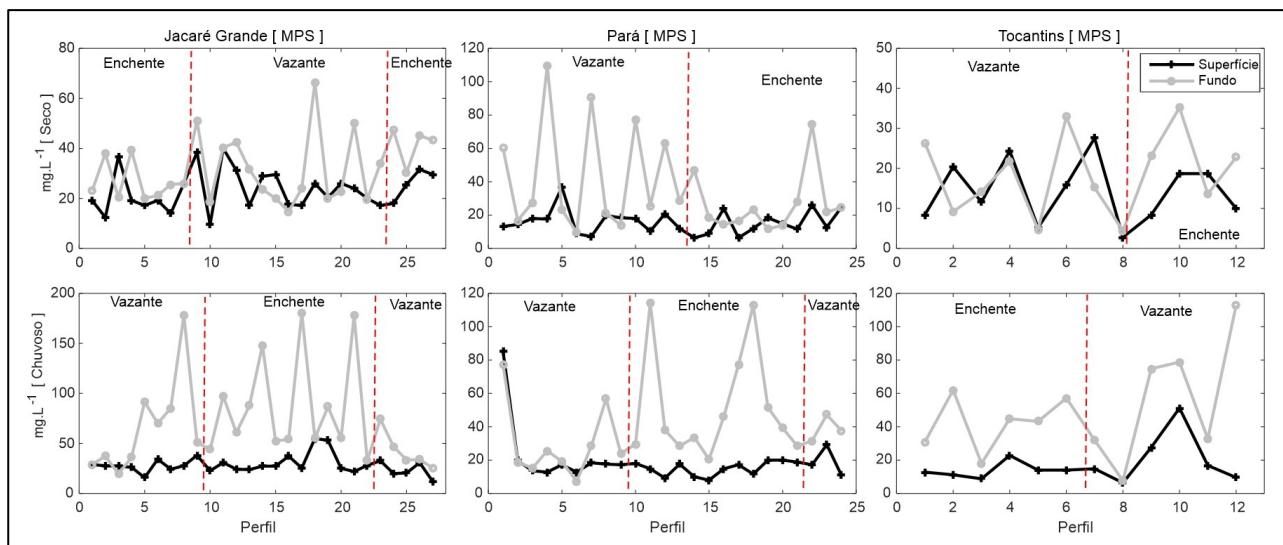


Figura 3 - Variações de MPS (Superfície e Fundo) nos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins durante o período seco e chuvoso. **Fonte:** Dados da pesquisa.

Em média, a concentração de MPS no período chuvoso foi aproximadamente o dobro da registrada no período seco (Tabela 4). A variabilidade dos dados refletiu as diferenças hidrodinâmicas e os mecanismos de ressuspensão predominantes em cada rio.

Tabela 4: Média, variância de MPS (mg.l⁻¹) e turbidez (FTU) nos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins.

Rio	Jacaré Grande		Pará		Tocantins	
	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
MPS						
Variância	9,6 - 66,8	11,9 - 180	6,4 - 109,6	7,2 - 114,4	2,8 - 35,6	6,4 - 112,8
Média	27,6	50,2	25,9	30,4	16,5	33,5
Vazante	27,9	41,3	30,1	27,5	15,8	31,8
Enchente	27,4	61,4	20,9	33,3	19,8	39,8
Turbidez						
Variância	19 - 70	38 - 230	13 - 104	25 - 216	3,8 - 50	10 - 122
Média	26,6	60	24	44,1	14	29,1
Vazante	26,3	57,6	26,5	42,9	12,6	27,8
Enchente	26,8	63,1	22,7	45,8	16,7	30,7

Fonte: Dados da pesquisa.

3.3. Hidrodinâmica e Transporte de Volume e MPS

As correntes no RJG apresentaram maior intensidade durante a maré de enchente, tanto no período seco ($-0,9 \text{ m.s}^{-1}$) quanto no chuvoso ($-1,1 \text{ m.s}^{-1}$). As médias nas fases de enchente e vazante foram iguais: $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ no período seco e $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ no chuvoso. O fluxo resultante foi em direção ao rio Amazonas no período seco ($0,05 \text{ m.s}^{-1}$) e para o rio Pará no período chuvoso ($-0,12 \text{ m.s}^{-1}$) (Figuras 4A e 6B).

No RP, as correntes foram mais intensas na vazante em ambos os períodos, $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ no seco e $0,85 \text{ m.s}^{-1}$ no chuvoso. No período seco, as médias na enchente e vazante foram iguais ($0,4 \text{ m.s}^{-1}$), já no período chuvoso, a vazante ($0,5 \text{ m.s}^{-1}$) foi mais intensa que a enchente ($-0,4 \text{ m.s}^{-1}$). O fluxo resultante foi em direção à baía de Marajó em ambos os períodos: $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ no período seco e $0,07 \text{ m.s}^{-1}$ no chuvoso (Figuras 4C e 6D). As correntes foram mais intensas no canal central, sendo aproximadamente um terço maiores no período seco e o dobro no período chuvoso.

No RT, as correntes foram mais intensas na vazante durante o período seco ($0,73 \text{ m.s}^{-1}$) e na enchente no período chuvoso ($-0,9 \text{ m.s}^{-1}$). As médias foram de $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ no período seco e $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ no chuvoso. O fluxo resultante no RT foi para montante no período seco ($-0,02 \text{ m.s}^{-1}$, especialmente nas margens), e para jusante no período chuvoso ($0,08 \text{ m.s}^{-1}$, com maior intensidade na margem esquerda) (Figuras 4E e 6F).

O transporte residual total do período chuvoso foi aproximadamente quatro vezes maior que no seco. No RJG, o transporte residual foi em direção ao rio Amazonas no período seco ($975,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e em direção ao rio Pará no período chuvoso ($4.220,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). O RT seguiu padrão semelhante, com transporte residual em direção à montante no período seco ($4.768,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), e a jusante no período chuvoso ($14.532,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). No RP, o

transporte residual foi sempre em direção à baía de Marajó: período seco ($6891 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e chuvoso ($7.320 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

O transporte de volume aumentou em 75% no período chuvoso, com acréscimo de 17 a 40% durante a enchente e de 32 a 49% na vazante. A exceção foi o RJG, que apresentou redução de 18% na vazante, devido à influência do rio Amazonas (Figura 5). O balanço de fluxo indica que o RT importou no período seco e exportou no período chuvoso; o RJG apresentou comportamento inverso, exportando no período seco para o rio Amazonas e importando no período chuvoso para o rio Pará. O RP exportou em ambos os períodos, com menor volume no período chuvoso, associado à maré de sizígia

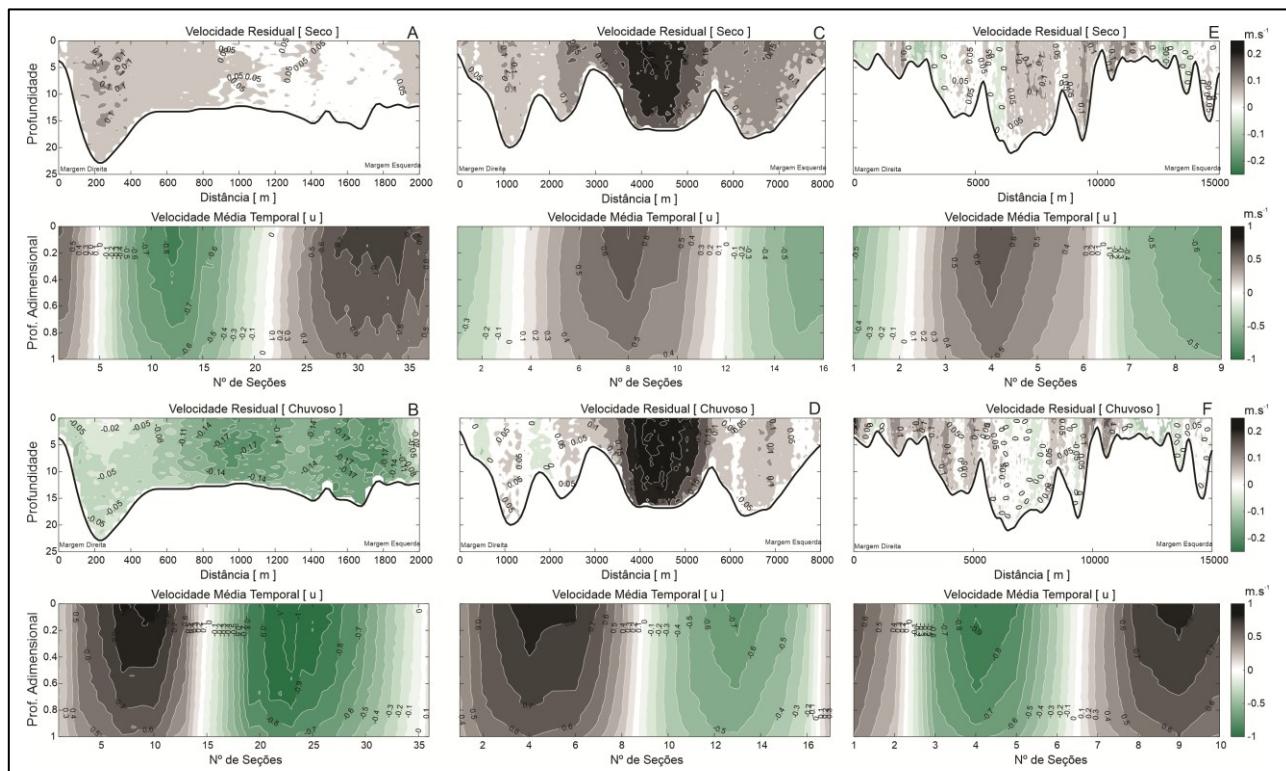


Figura 4 - Hidrodinâmica (fluxo resultante e velocidade média temporal) nos rios Jacaré Grande (A, B), Pará (C, D) e Tocantins (E, F) no período seco e chuvoso, enchente (verde) e vazante (preto).

Fonte: Dados da pesquisa.

A razão de fluxo (>1) mostrou a dominância fluvial no RP, enquanto RJG e RT apresentaram valores inferiores a 1, indicando inversões de controle entre maré e vazão. No período seco, o prisma de maré foi de $3,05 \text{ km}^3.\text{cm}^{-1}$ e a descarga fluvial foi de $3,2 \text{ km}^3.\text{cm}^{-1}$. No período chuvoso, ambos aumentaram: o prisma de maré em 18% ($3,73 \text{ km}^3.\text{cm}^{-1}$) e a descarga fluvial em 33% ($4,6 \text{ km}^3.\text{cm}^{-1}$), Tabela 5.

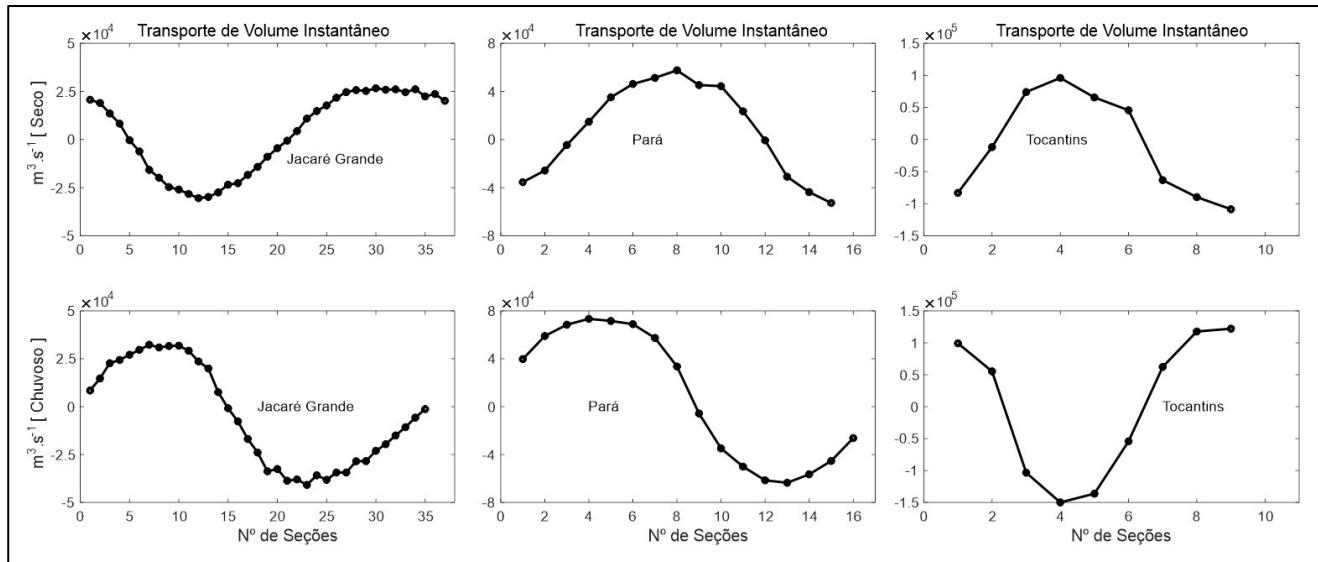


Figura 5 - Transporte de volume (Tv1 e Tv2) nos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins no período seco e chuvoso. **Fonte:** Dados da pesquisa.

Tabela 5: Balanço de volume: Prisma de maré, descarga fluvial, resultante e razão de fluxo durante um ciclo de maré no período seco e chuvoso. Em negrito os locais com inversão de fluxo sazonal.

Transporte de Volume [$\text{km}^3.\text{cm}^{-1}$]				
Período	Rio	Jacaré Grande	Pará	Tocantins
Seco	Vazante	0,47	0,88	1,67
	Enchente	-0,42	-0,56	-1,87
	Resultante	0,05	0,32	-0,2
	Taxa de Fluxo	1,1	1,5	0,9
Chuvoso	Vazante	0,43	1,15	2,7
	Enchente	-0,61	-0,85	-2,1
	Resultante	-0,18	0,29	0,62
	Taxa de Fluxo	0,7	1,3	1,3

Fonte: Dados da pesquisa.

O transporte resultante de MPS foi também maior no período chuvoso, com aumento de onze vezes no RJG e de três vezes no RT, em comparação ao período seco. O RP foi exceção, com redução de 50% no período chuvoso. O RJG exportou para o rio Amazonas no período seco e importou do mesmo no período chuvoso. O RT importou no período seco e exportou no período chuvoso. Já o RP exportou MPS para à baía de Marajó em ambos os períodos (Tabela 6). Assim, RJG e RT apresentaram inversões sazonais no transporte de MPS, enquanto o RP manteve exportação contínua.

Tabela 6: Transporte de MPS em toneladas por ciclo de maré nos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins durante um ciclo de maré no período seco e chuvoso.

Transporte de MPS [10^3 ton.cm $^{-1}$]				
Período	Rio	Jacaré Grande	Pará	Tocantins
Seco	Vazante	13,1	26,7	24,7
	Enchente	-11,5	-15,1	-32,9
	Resultante	1,6	11,6	-8,2
Chuvoso	Vazante	19,2	32,3	92,9
	Enchente	-37,2	-26,6	-71,1
	Resultante	-17,9	5,6	21,7

Fonte: Dados da pesquisa.

4. DISCUSSÃO

4.1. Maré

O sistema analisado é dominado pela influência da maré, sendo esta fundamental para o transporte e redistribuição dos sedimentos, conforme destacado por Boyd *et al.* (2006). As correntes promovem processos de ressuspensão e deposição ao longo do estuário. A interação entre a descarga fluvial e a maré influencia a distribuição dos sedimentos, podendo gerar padrões distintos de transporte e deposição (Valle-Levinson, 2010; MacCready; Geyer, 2010; Geyer; MacCready, 2014).

Nas áreas de amostragem, a maré atua dinamicamente, mas sem presença de salinidade, configurando-se como "rios com maré" ou zona de maré do rio, segundo as classificações de Wells (1995), Dyer (1997), Kjerfve (1987) e Pritchard (1955). Apesar disso, o sistema apresenta características morfológicas e sedimentológicas típicas de estuários, influenciadas pela propagação da onda de maré.

A configuração da região também se aproxima de um sistema hiposíncrono, aquele que a geometria dos canais amortece a maré à medida que ela avança à montante. O sistema apresenta zonas de macromaré (T2), mesomaré (T3, T7 e RJG) e micromaré (T6 e baía de Melgaço), de acordo os critérios de amplitude definidos por Pugh (1987).

A zona de micromaré, localizada entre o estreito de Breves, baía das Bocas e baía de Melgaço, funciona paralelamente como zona de convergência barotrópica. Esse tipo de convergência resulta do encontro de ondas de maré vindas dos rios Amazonas e Pará, o que pode reduzir a amplitude da maré (< 1,6 m) e favorecer a deposição de sedimentos. A maré atinge 0,8 m na baía de Melgaço (Costa *et al.*, 2016), 1,5 m no Estreito de Breves (Gregório e Florentino, 2015) e 1 m próximo à baía das Bocas (estação T6).

Em sistema hiposíncrono, a entrada de sedimentos não ocorre em sincronia com as correntes de maré. A interação entre esses tipos de sistema e zonas de convergência barotrópica é complexa e depende de múltiplos fatores. Segundo Warner *et al.* (2003), os sistemas hiposíncronos destacam-se pela complexidade, essa configuração pode gerar padrões distintos de deposição e erosão, como observado na baía de São Francisco e na baía de San Pablo (Warner *et al.*, 2003; Warner *et al.*, 2002). As zonas de convergência de maré são associadas a alta taxa de deposição, conforme evidenciado na baía de San Pablo (Warner *et al.*, 2002).

A localização da zona de convergência é influenciada pela variabilidade sazonal das descargas dos rios Amazonas, Pará e Tocantins, mas permeia a região dos estreitos. Essa oscilação impacta a retenção e redistribuição de sedimentos, sobretudo em áreas com baixas tensões de cisalhamento no fundo. Assim, compreender a interação entre a morfologia do sistema, a maré e as descargas fluviais são essenciais para interpretar os padrões sedimentares e planejar estratégias de manejo ambiental. Estudos como os de Kennish (2012; 2022) e Wolanski (2007) oferecem contribuições relevantes para a gestão de estuários dominados por maré em contextos de mudanças climáticas e pressões antrópicas.

4.2. Hidrodinâmica

A dinâmica das correntes revelou padrões distintos entre os rios analisados. No RJG predominam as correntes de enchente; no RP, as de vazante; no RT, observam-se inversões sazonais. Essas inversões no RT estão possivelmente associadas às variações na descarga fluvial e à influência da maré sazonalmente. O rio Tocantins possui diversos barramentos ao longo do seu curso, e o controle dos reservatórios no período seco pode reduzir a vazão para valores em torno de $4.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ em Tucuruí (ONS, 2025).

De forma geral, observou-se maior intensidade das correntes durante a enchente no período seco, e durante a vazante no período chuvoso. Esse padrão também foi descrito em grandes sistemas estuarinos como o Yangtzé, onde as correntes de vazante no período chuvoso são o dobro das de enchente (Zhang *et al.*, 2007).

A diferenciação espacial das correntes também foi evidente. Na porção montante do sistema, como na baía de Melgaço, as correntes são inferiores a $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Costa *et al.*, 2016), enquanto nas áreas mais próximas da costa, as velocidades se intensificam, alcançando até $1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na vazante durante o período chuvoso, e $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na enchente

no período seco (Pereira *et al.*, 2009). Esse aumento pode ser atribuído ao estreitamento dos canais e à amplificação da maré.

A intensidade das correntes está diretamente relacionada à amplitude da maré: quanto maior a oscilação do nível da coluna d'água, maior a energia disponível para movimentar as massas de água. Em estuários dominados por fricção, aproximadamente 82% do volume de água é transportado durante um ciclo de maré, enquanto em estuários de domínio fluvial, a descarga do rio é o principal mecanismo de mistura (Asp *et al.*, 2012; D'Aquino *et al.*, 2010).

Em regiões de interferência entre sistemas, o curso d'água de maior descarga tende a suprimir o menor. Esse efeito já foi observado no estuário do rio Satilla, na Geórgia (EUA), conforme Blanton *et al.* (2001). No presente estudo, esse fenômeno pode ocorrer entre os rios Amazonas e Pará em relação ao RJG, influenciando a direção e a intensidade dos fluxos.

4.3. MPS e Turbidez

As variações na concentração de material particulado em suspensão (MPS) e turbidez estão fortemente associadas à sazonalidade regional. Durante o período chuvoso, há aumento da precipitação e do aporte de sedimentos à bacia de drenagem, intensificando a ressuspensão e o transporte de partículas. Além disso, os maiores valores de MPS foram registrados em marés de sizígia, quando as correntes são mais intensas.

A estrutura vertical das concentrações variou conforme a profundidade e o regime de cheia e maré. Essa variação foi mais expressiva no período chuvoso, especialmente no RT, onde diferenças significativas foram observadas apenas em relação à profundidade (teste de Mann-Whitney; $p < 0,05$). Não foram detectadas diferenças significativas entre enchente e vazante para o MPS em nenhum dos rios no mesmo ciclo.

Os processos de ressuspensão são mais intensos nas regiões a jusante, próximo à costa, onde a velocidade da corrente pode ultrapassar $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ (Pereira *et al.*, 2009; Mascarenhas *et al.*, 2018). Já nas porções montante, como na baía de Melgaço, as velocidades são menores e o MPS é mais controlado por processos barotrópicos (oscilações do nível d'água) (Costa *et al.*, 2016). Nas áreas costeiras, além dos processos barotrópicos, a intrusão salina contribui com processos baroclínicos, afetando a distribuição vertical do MPS.

A alta energia dos ambientes analisados justifica as elevadas concentrações de MPS e turbidez observadas, compatíveis com registros anteriores na região: 235 mg.l⁻¹ (Meade *et al.*, 1985), 67-168 mg.l⁻¹ (Torres, 1997), 0.01-100 g.l⁻¹ (Kineke e Sternberg, 1995), 15,2-93,7 mg.l⁻¹ (Monteiro *et al.*, 2015) e 7-300 mg.l⁻¹ (Carneiro *et al.*, 2020). Em outros setores da borda leste da ZCAB, como os rios Urumajó (0,1-0,8 g.l⁻¹) e Caeté (237-382 mg.l⁻¹), valores semelhantes também foram reportados (Asp *et al.*, 2016; 2018).

Em rios com elevada concentração, como os rios Solimões, Amazonas e Madeira, são classificados como de "águas brancas" (Sioli, 1968). Já em ambientes de baixa energia, como a baía de Melgaço (13 mg.l⁻¹; Costa *et al.*, 2016), as concentrações de MPS são menores, resultantes da fraca ação hidrodinâmica e da baixa ressuspensão natural de sedimentos.

No caso do rio Tocantins, as menores concentrações de MPS observadas à montante (9 mg.l⁻¹; Lima *et al.*, 2004) não refletem apenas características naturais do ambiente, mas são fortemente influenciadas pelos barramentos, especialmente a hidrelétrica de Tucuruí. O represamento modifica o regime hidrológico e reduz a carga sedimentar, favorecendo a deposição à montante e limitando o fluxo de sedimentos a jusante (Fearnside, 2001). Assim, diferentemente da baía de Melgaço, onde predomina a baixa energia natural, no rio Tocantins a redução da carga sedimentar tem componente antrópica.

4.4. Transporte de Volume

O balanço hídrico no RP foi positivo em ambos os períodos analisados. Já os rios RJG e RT apresentaram inversões sazonais. No RT, o saldo foi negativo no período seco (importação), mas se tornou positivo no período chuvoso, quando se destacou como o principal contribuinte para o rio Pará. No RJG, observou-se exportação para o rio Amazonas no período seco e importação no chuvoso. Esse comportamento reforça o papel dinâmico do rio Pará como componente regulador do sistema.

A descarga do rio Amazonas exerce uma pressão hidráulica sobre os rios menores, como o RJG, no período chuvoso, impedindo o escoamento para jusante e favorecendo a inversão do fluxo (Blanton *et al.*, 2001).

Estimativas anteriores indicavam transporte residual no RJG variando entre 1.600 e 4.200 m³.s⁻¹ em direção ao rio Pará (Silva e Vinzon, 2010; Callède, 2010). Este último autor também sugeriu que o furo Tajapuru possui fluxo semelhante (2.500 m³.s⁻¹), e que

os demais afluentes do setor leste do Marajó (rios Aramá, Anajás, Cajari e Charapucu) contribuem com cerca de $948 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, totalizando aproximadamente $5.900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($\pm 20\%$), em direção ao rio Pará.

Os resultados deste estudo no período chuvoso ($4.220,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, em direção ao rio Pará) são coerentes com os valores anteriores. Entretanto, no período seco, o fluxo foi invertido ($975,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, em direção ao rio Amazonas), o que pode explicado por diferenças metodológicas, como tempo de mediação em cada seção e o número de seções executadas nos estudos anteriores.

A análise do transporte residual mostrou um padrão sazonal claro: no período chuvoso, o fluxo do rio Amazonas para o rio Pará correspondeu a 2,35% da descarga do Amazonas, enquanto no período seco, o fluxo inverso, do rio Pará para o Amazonas, foi de apenas de 0,55%. O transporte residual anual é dominado pelo rio Amazonas, com $2.940 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, considerando apenas a contribuição do RJG.

A taxa de renovação hídrica também apresenta forte sazonalidade: no período chuvoso, cerca de 33% do volume é renovado a cada ciclo de maré, contra 12% no período seco. No período seco, o volume exportado pelos três rios (RJG, RP e RT) foi de $0,12 \text{ km}^3 \cdot \text{cm}^{-1}$, direcionando 30% para o rio Amazonas e 70% a baía de Marajó.

No período chuvoso, o volume exportado para a baía de Marajó foi de $0,92 \text{ km}^3 \cdot \text{cm}^{-1}$. Desse total, 32,1% foram escoados pelo RP, sendo que 19,6% correspondem à contribuição do rio Amazonas via RJG e 12,5% oriunda diretamente do RP, e 67,9% proveniente do RT (Figura 6).

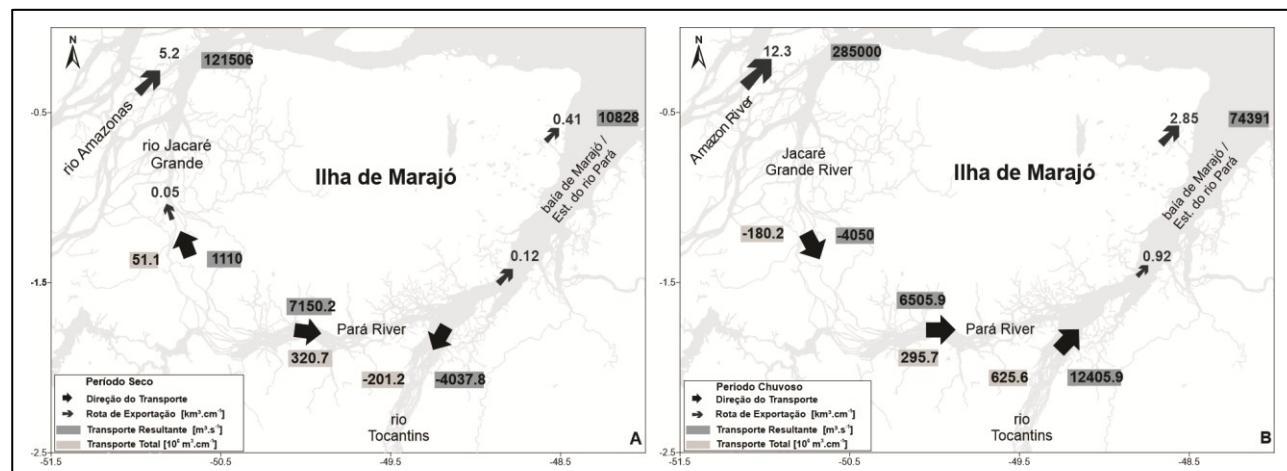


Figura 6 - Transporte de volume no período seco (A) e chuvoso (B) na ZCAB, negativo (importação) e positivo (exportação). **Fonte:** Dados da pesquisa.

Tabela 7: Distribuição da vazão (Maranhão, Pará e Amapá) na Zona Costeira Amazônica. Em destaque os tributários dos rios Amazonas (A) e Pará (P).

Estação	Rio	Taxa de Fluxo $m^3.s^{-1}$	Autor	Fluxo Total $km^3.ano^{-1}$
Amapá	¹ Cunani	17,44	ANA (2020)	0,5
	² Amapari	342,7	ANA (2020)	10,8
	³ Araguari	979,61	ANA (2020)	30,9
	⁴ Jari ^A	1.093,76	ANA (2020)	---
Pará	⁵ Amazonas (Óbidos) ^A	17.4887,54	ANA (2020)	6.409,8
	⁶ Tapajós ^A	11.818,89	ANA (2020)	---
	⁷ Xingu ^A	7.930,98	ANA (2020)	---
	⁸ Pará	10.800 / 74.300	Prestes <i>et al.</i> , 2014	1.190,4
	⁹ Tocantins ^P	10.935,24	ANA (2020)	---
	¹⁰ Guamá ^P	127,26	ANA (2020)	---
	¹¹ Capim ^P	565,59	ANA (2020)	---
	¹² Caeté	43,42	ANA (2020)	1,4
	¹³ Piriá	76,99	ANA (2020)	2,4
	¹⁴ Mocajuba	11	Asp, <i>et al.</i> , 2013	0,3
	¹⁵ Mojuim	60,6	OCA ¹	1,9
	¹⁶ Caeté	41,5	Asp, <i>et al.</i> , 2013	1,3
	¹⁷ Taperaçu	~0	Asp, <i>et al.</i> , 2012	0,0
	¹⁸ Urumajó	10	Asp, <i>et al.</i> , 2016	0,3
	¹⁹ Gurupi	476,78	Asp, <i>et al.</i> , 2013 / ANA (2020)	15,0
Maranhão	²⁰ Maracaçumé	59,51	ANA (2020)	1,9
	²¹ Turiaçu	84,89	ANA (2020)	2,7
	²² Pindaré	204,2	ANA (2020)	6,4
	²³ Grajau	104,7	ANA (2020)	3,3

¹OCA: Banco de dados do Observatório da Costa Amazônica.**Fonte:** Dados da pesquisa.

A contribuição das sub-bacias auxilia no equilíbrio do sistema, compensando os fluxos de entrada e saída. O transporte residual do rio Pará é positivo a jusante, variando entre 10,8 e $74,3 \times 10^3 m^3.s^{-1}$ (Prestes *et al.*, 2014). Com base nesses valores, estima-se que o volume exportado pelo rio Pará seja de $0,41 km^3.cm^{-1}$ no período seco e $2,85 km^3.cm^{-1}$ no período chuvoso, baía de Marajó.

Estimativas com base nos dados de Silva e Vinzon (2010) para o rio Amazonas apontam o transporte residual de $121,5 \times 10^3 m^3.s^{-1}$ no período seco e $285 \times 10^3 m^3.s^{-1}$ no chuvoso, resultando em exportação de $5,2 km^3.cm^{-1}$ e $12,3 km^3.cm^{-1}$, respectivamente.

Com isso, o volume anual exportado pelo rio Amazonas foi estimado em $6409,8 km^3.ano^{-1}$, com uma contribuição do rio Pará de 0,24% ($15,7 km^3.ano^{-1}$). Por outro lado, o rio Pará exporta anualmente $1.190,4 km^3.ano^{-1}$, com 5,7% ($67,9 km^3.ano^{-1}$) proveniente do rio Amazonas.

Segundo a classificação proposta por Dai e Trenberth (2002), o rio Pará figura como o terceiro rio do mundo em volume de descarga, atrás apenas do Amazonas ($5.330 km^3.ano^{-1}$) e do Congo ($1.271 km^3.ano^{-1}$), superando rios como Orinoco ($984 km^3.ano^{-1}$) e Changjiang ($910 km^3.ano^{-1}$). Prestes *et al.* (2020) também estimaram a vazão do rio Pará

em $664 \text{ km}^3.\text{ano}^{-1}$, mesmo sendo um valor inferior, ainda evidencia a relevância do sistema em termos de magnitude de volume.

Apesar de parcial, a estimativa regional aponta que os rios monitorados na zona costeira amazônica contribuem com $79,3 \text{ km}^3.\text{ano}^{-1}$, segundo dados da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). Esse valor representa apenas 35% do total estimado para 44 sistemas fluviais entre o Oiapoque e a baía de São Marcos (Tabela 7). Somente os rios Amazonas e Pará aportam juntos $7.600,2 \text{ km}^3.\text{ano}^{-1}$, volume suficiente para abastecer populações por meses ou anos, considerando um consumo por pessoa de 185 litros por dia.

4.5. Transporte de MPS

O transporte de material particulado em suspensão (MPS) refletiu os padrões observados no transporte residual de volume, com inversões sazonais nas direções dos fluxos. No RJG, o transporte foi em direção ao rio Amazonas durante o período seco, e em direção ao rio Pará durante o período chuvoso, totalizando $6,53 \times 10^6$ toneladas. No entanto, apenas um terço desse total foi contabilizado na seção do RP, indicando que dois terços do MPS tenham sido retidos na zona de convergência da maré, uma região de deposição intensa. Há um domínio do fluxo do rio Amazonas, com um fluxo 11 vezes maior que o rio Pará.

O rio Tocantins (RT) também apresentou inversão: importação no período seco e exportação no chuvoso. Essa dinâmica pode ser explicada tanto pela sazonalidade quanto pela influência do barramento de Tucuruí, que reduz significativamente a vazão no período seco (ONS, 2024; $4.500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e favorece a retenção de sedimentos (Fearnside, 2001). A maior concentração de MPS na foz do RT é externa ao sistema, não pode ser creditada à geologia da bacia que apresenta um embasamento cristalino (Souza *et al.*, 2017), ou seja, baixa carga sedimentar. Esse padrão no período seco facilita a entrada da maré e, consequentemente, a deposição de sedimentos. Assim, o tempo de residência no período chuvoso é de horas a dias, enquanto no período seco, pode ser bem maior (Dyer, 1995).

No rio Pará (RP), o transporte de MPS manteve sempre em direção à baía de Marajó em ambos os períodos, mas com redução de 50% no volume exportado durante o período chuvoso. Esse comportamento pode estar relacionado à maré de sizígia, que intensifica a ressuspensão e a retenção de sedimentos no sistema (Figura 7).

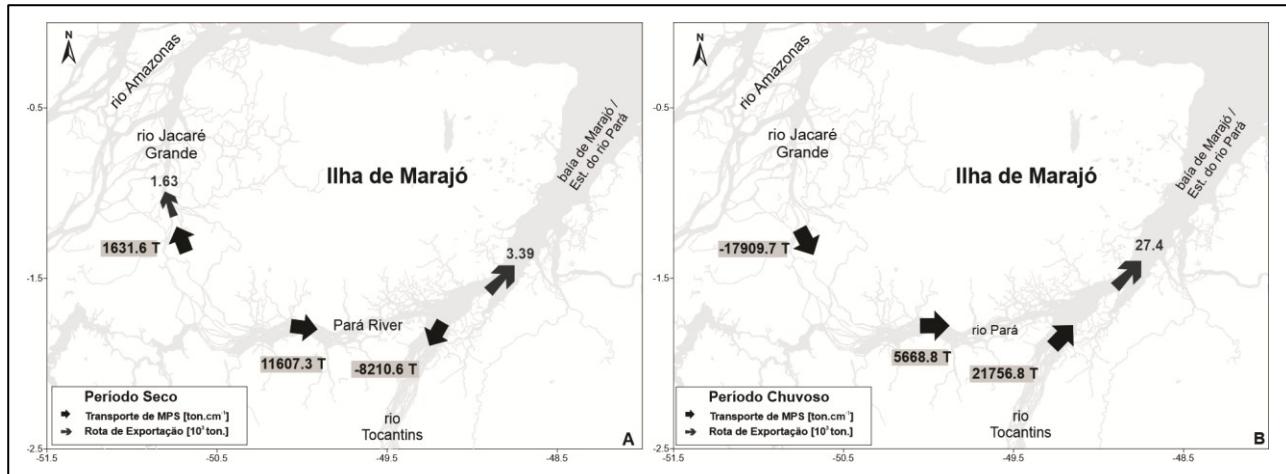


Figura 7 - Transporte de MPS no período seco (A) e chuvoso (B) na ZCAB, negativo (importação) e positivo (exportação). **Fonte:** Dados da pesquisa.

De forma geral, o fluxo total de MPS para a baía de Marajó foi positivo. No período seco, foram exportadas $1,84 \times 10^6$ toneladas, das quais 67,55% se destinaram à baía de Marajó e 32,45% ao rio Amazonas. No período chuvoso, a exportação para a baía de Marajó aumentou significativamente, atingindo $10,01 \times 10^6$ toneladas.

A primeira estimativa de carga anual de MPS do rio Pará, proposta por Lima *et al.*, (2004), era de $3,2 \times 10^6$ toneladas, considerando apenas a contribuição a montante do rio Tocantins. Com os dados mais abrangentes deste estudo, a exportação anual foi estimada em $11,85 \times 10^6$ toneladas, sendo $11,25 \times 10^6$ destinadas à baía de Marajó e $0,6 \times 10^6$ ao rio Amazonas. Isso representa que a baía de Marajó recebe 95% do volume total, valor que pode ser ainda maior quando forem incorporadas as contribuições de outros sistemas.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou inversões sazonais no domínio das correntes nos rios RJG e RT, enquanto o RP apresentou comportamento predominantemente de vazante. A turbidez e o MPS mostraram-se associados às máximas velocidades de correntes, com valores decrescentes do RJG para o RT. A presença da zona de micromaré e da zona de convergência barotrópica de maré contribui para a deposição de sedimentos.

O rio Pará demonstrou papel regulador do sistema, equilibrando as importações dos RJG e RT. No período chuvoso, o RT destacou-se como o principal contribuinte do RP. O balanço anual dos fluxos foi positivo: direcionado ao rio Amazonas e à baía de Marajó no período seco, e exclusivamente à baía de Marajó no período chuvoso. A sazonalidade

também influenciou o transporte de sedimentos, com o maior aporte para a baía no período chuvoso.

A análise quantitativa revelou que a contribuição do rio Amazonas para o RP é significativamente maior, com volume de água e MPS de 4 a 12,5 vezes superiores. A vazão anual do rio Pará foi estimada em $1.190,4 \text{ km}^3.\text{ano}^{-1}$, posicionando-o como o terceiro rio do mundo em volume de descarga. A carga anual de MPS foi estimada em 11.85×10^6 toneladas, sendo 95% exportadas para a baía de Marajó.

O volume total exportado para a ZCAB foi de aproximadamente $7.600 \text{ km}^3.\text{ano}^{-1}$, dos quais 82,6% são provenientes do rio Amazonas e 17,4% do rio Pará. Esses fluxos representam uma disponibilidade expressiva de água doce, suficiente para abastecer populações inteiras por meses ou anos, e reforçam a importância estratégica da região frente a cenários de escassez hídrica global.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao projeto CT - HIDRO 01/2010 - FINEP: “Monitoramento Integrado da Zona Costeira Amazônica”. Dedicamos este trabalho à Professora Odete Silveira, que foi responsável por avanços científicos na região costeira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. HidroWeb – Estação de Óbidos (17050001). 2025. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 6 jun. 2025.

ASP, N. E.; FREITAS, P. T. A.; GOMES, V. J. C.; GOMES, J. D. Hydrodynamic overview and seasonal variation among the estuarine diversity at the eastern sector of the Amazonian coast. *J. Coast Res.*, v. 65, p. 1092-1097, 2013.

ASP, N. E.; GOMES, V. J. C.; OGSTON, A.; BORGES, J. C. C.; NITTROUER, C. A. Sediment source, turbidity maximum, and implications for mud exchange between channel and mangroves in an Amazonian estuary. *Ocean Dyn.*, v. 66, p. 136-148. 2016.

ASP, N. E.; GOMES, V. J. C.; SCHETTINI, C. A. F.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SIEGLE, E.; OGSTON, A. S.; NITTROUER, C. A.; SILVA, J. N. S.; NASCIMENTO JR., W. R.; SOUZA, S. R.; PEREIRA, L. C. C.; QUEIROZ, M. C. Sediment dynamics of a tropical tide-dominated estuary: Turbidity maximum, mangroves and the role of the Amazon River sediment load. *Estuar Coast Shelf Sci.*, v. 214, p. 10-24, 2018.

ASP, N. E.; SCHETTINI, C. A. F.; EDUARDO SIEGLE, E.; SILVA, M. S.; BRITO, R. N. R. The Dynamics of a Frictionally - Dominated Amazonian Estuary. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 60, n. 3, p. 391-403, 2012.

ASP, N. E.; SCHETTINI, C. A. F.; EDUARDO SIEGLE, E.; SILVA, M. S.; BRITO, R. N. R. The Dynamics of a Frictionally - Dominated Amazonian Estuary. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 60, n. 3, p. 391-403, 2012.

BEARDSLEY, R. C.; CANDELA, J.; LIMEBURNER, R.; GEYER, W. R.; LENTZ S. J.; BELMIRO, M. C.; CACCHIONE D.; CARNEIRO N. The M2 tide on the Amazon shelf. **J Geophys Res.** v. 100, n. 2, p. 2283-2319, 1995.

BLANTON, J.; ALBER, M.; SHELDON, J. Salinity Response of the Satilla River Estuary to Seasonal Changes in Freshwater Discharge. **Proceedings of the 2001 Georgia Water Resources Conference**, March 26-27. 2001.

BORBA, T. A. C.; ROLLNIC, M. Runoff quantification on Amazonian Estuary based on hydrodynamic model. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, n. 75, p. 43-47, 2016.

BOYD, R.; DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A. 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, 2006. p. 171-235. 2006.

CALLÈDE, J.; COCHONNEAU, G.; RONCHAIL, J.; VIEIRA ALVES, F.; GUYOT, J. L.; SANTOS GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E. Les apports en eau de l'Amazone à l'océan Atlantique. **Revue des Sciences de l'Eau**, v. 23, p. 247-273, 2010.

CARNEIRO, A. G.; PRESTES, Y. O.; ROLLNIC, M. Estimates of suspended solid transport in the Pará River Estuary. **Ocean and Coastal Research**, v. 68, 2020.

COSTA, M. S.; ROLLNIC, M.; PRESTES, Y. O.; ROSÁRIO, R. P.; BORBA, T. A. C. Runoff and Sediment Transport of Portel-Melgaço Water System in an Amazonian Estuarine System. **J. Coast Res.**, v. 75, p. 18-22, 2016.

D'AQUINO C. A; FILHO, J. P.; SCHETTINI C. A. F. Fluvial Modulation of Hydrodynamics and Salt Transport in a Highly Stratified Estuary. **Brazil J. Oceanogr.**, v. 58, n. 2, p. 165-175, 2010.

DAI, A.; TRENBERTH, K. E. Estimates of Freshwater Discharge from Continents: Latitudinal and Seasonal Variations. **J Hydrometeorol.**, v.3, p. 660-687, 2002.

DEFANT, A. **Physical Oceanography**. Oxford, Pergamon, v. 2, p. 598, 1960.

DYER, K. R. **Estuaries: A physical introduction**. New York: John Wiley and Sons, 1997. 195p.

DYER, K. R. Sediment transport process in estuaries. In: PERILLO, G. M. E. **Geomorphology and sedimentology of Estuaries**. Ed. Development in Sedimentology, 1995. p. 423-449.

FEARNSIDE, P. Environmental Impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned Lessons for Hydroelectric Development in Amazonia. **Environmental Management**, v. 24, p. 377-396, 2001.

FILIZOLA N.; GUYOT J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Rev Bras Geociências**, v. 41, n. 4,

GABIOUX, M.; VINZON, S.; PAIVA, A. M. Tidal propagation over fluid mud layers on Amazon shelf. **Cont Shelf Res**, v. 25, p. 113–125, 2005.

GALLO, M. N.; VINZON, S. B. Generation of over tides and compound tides in Amazon estuary. **Ocean Dyn**. v. 55, n. 5, p. 441–448, 2005.

GEYER, W. R.; MACCREADY, P. The estuarine circulation. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 46, n. 1, p. 175–197. 2014.

GORDON, R. L. Acoustic Measurement of River Discharge. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 7, p. 925-936, 1989.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Banco de Dados Meteorológicos do INMET**. 2023. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 12 nov. 2023.

KENNISH, M. J. Management Strategies to Mitigate Anthropogenic Impacts in Estuarine and Coastal Marine Environments: A Review. **Open Journal of Ecology**, v. 12, p. 667-688, 2022.

KENNISH, M. J. Restoration of Estuaries. **Nature Education**, v. 3, p. 1-5, 2012.

KINEKE, G. C.; STERNBERG, R. W. Distribution of fluid mud on the Amazon continental shelf. **Mar Geol**. v. 125, n. 3, p. 193-233, 1995.

KJERFVE, B. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: DAY Jr.; HALL, C. H. A. S.; KEMP, W. M.; YÁNEZ-ARANCIBA, A. (Eds.). **Estuarine Ecology**. New York, Wiley, 1987. p. 47-78.

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

LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CARVALHO, N. O.; SILVA, E. M. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins**. Planaltina: Embrapa Cerrados: ANEEL/ANA, 2004. 116p.

MACCREADY, P.; GEYER, W. R. Advances in estuarine physics. **Annual Review of Marine Science**, v. 2, n. 1, p. 35–58, 2010.

MASCARENHAS, A. C. C.; CORREA, A. W. R.; CARNEIRO, A. C.; COSTA, M. S.; ROLLNIC, M.; MEDEIROS, C. Seasonal Exchanges of Salt and Suspended Particulates between the Sol Bay and the Pará River, Amazonian Coast. **J Coast Res**, v. 85, p. 111-115, 2018.

MASCARENHAS, A. C. C.; GOMES, G. S.; LIMA, A. P. Y.; SILVA, H. K. N.; SANTANA, L. S.; ROSÁRIO, R. P.; ROLLNIC, M. Seasonal Variations of the Amazon River Plume with Focus on the Eastern Sector. **J Coast Res**, v. 75. P. 532-536, 2016.

MEADE, R. H.; DUNNE, T.; RICHEY, J. E.; SANTOS, U. M.; SALATI, E. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. **Science**, v. 228, p. 488-490, 1985.

MIKHAILOV, V. N. Water and Sediment Runoff at the Amazon River Mouth. **Water Resour**, v. 37, n. 2, p. 145–159. 2010.

MIRANDA, L. B.; ANDUTTA, F. P.; KJERFVE, B.; CASTRO, B. M. **Fundamentals of Estuarine Physical Oceanography**. Ocean Engineering & Oceanography. Springer Nature, 2017. 506p.

MONTEIRO, S. M.; EL-ROBRINI, M.; ALVES, I. C. C. Dinâmica sazonal de nutrientes em estuário Amazônico. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 1, p. 151-162. 2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Dados hidrológicos / vazões – Rio Tocantins: Tucuruí**. 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao> Acesso em: 2 jun. 2025.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical Tidal Harmonic Analysis including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. **Comput & Geosci**, v. 28, p. 929-937. 2002.

PEREIRA, L. C. C.; MENDES, C. M.; MONTEIRO, M. C.; ASP, N. E. Morphological and sedimentological changes in a macrotidal sand beach in the Amazon littoral (Vila dos Pescadores, Pará, Brazil). **J Coast Res**, v. 56, p. 113-117. 2009.

PRESTES, Y. O.; BORBA, T. A. C.; DA SILVA, A. C.; ROLLNIC, M. A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, p. 100668. 2020.

PRESTES, Y. O.; SILVA, A. C.; ROLLNIC, M.; ROSÁRIO, R. P. The M2 and M4 tides in the Pará river estuary. **Tropical Oceanogr**, Recife, v. 45, n. 1, p. 26-37. 2017.

PRITCHARD, D. W. Estuarine circulation patterns. **Proc Am Soc Civil Eng**, v. 81, n. 717, p. 1-11. 1955.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and mean sea-level**. Swindon: Jhon Wiley & Sons, 1987. 471p.

ROSÁRIO, R. P.; BORBA, T. A. C.; SANTOS, A. S.; AND ROLLNIC, M. Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. **J Coast Res**, v. 75, p. 128-132, 2016.

SIMPSON, M. R.; OLTMANN, R. N. **An Acoustic Doppler Discharge Measurement System**. Proceedings of the 1990 National Conference on Hydraulic Engineering, v. 2, p. 903-908. 1990.

SIOLI, H. Hidrogeochemistry and geology in the Brazilian Amazon region. **Amazoniana**. v. 1, p. 267-277, 1968.

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

SOUZA, K. S.; SÁ, E. F. J.; SILVA, F. C. A. Análise estrutural do sistema de grabens do Rio Tocantins, borda oeste da Bacia do Parnaíba (estados do Tocantins, Pará e Maranhão - Brasil). **Série Científica**, v. 17, n. 1, p. 129-141. 2017.

STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. **A practical handbook of seawater analysis**. Bull Fish Research Board Can, 1972. 310p.

VALLE-LEVINSON, A. **Contemporary issues in estuarine physics**. Cambridge University Press. 2010. 326p.

WELLS, J. T. Tide-dominated estuaries and tidal rivers. In: PERILLO, G. M. E. (Ed.), **Geomorphology and Sedimentology of Estuaries (Developments in Sedimentology)**, Elsevier, New York; Elsevier. 1995. p. 179-205.

WOLANSKI, E. **Estuarine Ecohydrology**. Amsterdam: Elsevier. 2007. 322.

Recebido: 24/04/2025

Aceito: 06/06/2025