



Universidade Federal do Amapá
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação



Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical

Mestrado e Doutorado

UNIFAP / EMBRAPA-AP / IEPA / CI-Brasil

PAULA PATRÍCIA PINHEIRO LOPES

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO E QUALIDADE DA ÁGUA
EM ZONA ESTUARINA AMAZÔNICA

MACAPÁ, AP

2019

PAULA PATRÍCIA PINHEIRO LOPES

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO E QUALIDADE DA ÁGUA EM ZONA
ESTUARINA AMAZÔNICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPGBIO) da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biodiversidade Tropical.

Orientador: Dr. Alan C. da Cunha

Co-Orientador: Dr. Admilson M. Torres

MACAPÁ, AP

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá
Elaborada por Cristina Fernandes – CRB2/1569

Lopes, Paula Patrícia Pinheiro.

Transporte de sólidos em suspensão e qualidade da água em zona estuarina amazônica. / Paula Patrícia Pinheiro Lopes ; Orientador, Alan C. da Cunha ; Co-orientador, Admilson M. Torres. – Macapá, 2019.

61 f.

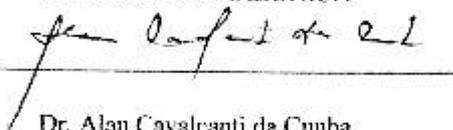
Dissertação (Mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical.

1. Dinâmica costeira. 2. Ecossistemas aquáticos. 3. Hidrodinâmica. 4. Descarga sólida. 5. Amazônia. 6. Estuários. 7. Urucurituba. I. Cunha, Alan C. da, orientador. II. Torres, Admilson M., co-orientador. III. Fundação Universidade Federal do Amapá. IV. Título.

577.6 L864t
CDD. 22 ed.

PAULA PATRÍCIA PINHEIRO LOPES

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO E QUALIDADE DA ÁGUA EM ZONA
ESTUARINA AMAZÔNICA



Dr. Alan Cavalcanti da Cunha

Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)



Dr. Admilson Morcira Torres

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA)



Dr. Marcelino Carneiro Guedes

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)



Dr. Luis Roberto Takyama

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA)

Aprovada em 30 de Abril de 2019, Macapá, AP, Brasil

À memória de minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Deus, obrigada por ter me segurado no colo em todos momentos vividos nesses últimos 2 anos.

À minha família: Meus irmãos Douglas e Kelly por sempre cuidarem de mim, mesmo morando em cidade diferentes; À meu pai, que sempre teve o poder de me acalmar com a calma de sua voz e palavras.

Aos meus amigos que se mantiveram do meu lado, mesmo diante do meu afastamento. Ao meu namorado, por ter aguentado meus ciclos de ma... ops, de humor, durante esses 2 anos.

Aos meus orientadores Alan Cunha e Admilson Torres: Gratidão! Fui privilegiada por ser orientada por dois grandes pesquisadores do Estado do Amapá e dois seres humanos incríveis.

Aos docentes do PPGGIO e colegas de turma que contribuíram com a pesquisa durante as disciplinas cursadas.

Ao Laboratório de Química, Saneamento e Modelagem Ambiental (LQ SMA – UNIFAP) pelo suporte dos equipamentos utilizados nas campanhas de campo. Ao Laboratório de Água e Sedimentos do IEPA pelo suporte de equipamentos e na análise das amostras no laboratório; e principalmente aos companheiros de campo Chicão, Dinaldo, Sérgio e Gilvan obrigada por todos os ensinamentos, paciência e pelos dias 100% alegres.

Ao governo do Estado do Amapá que, no âmbito do Projeto Terras Caídas do Bailique, proveu recursos necessários para essa pesquisa; em especial à Defesa Civil, Corpo de Bombeiros e suas equipes pelo apoio e prestatividade imprescindíveis durante as campanhas de campo.

A todas as pessoas que me ajudaram durante essa pesquisa, doando parte de seu tempo com contribuições: Daímio, pelas pacientes explicações para compilação dos dados de vazão, ao Patrick pelas contribuições na fase inicial do trabalho; ao meu amigo Felipe por sempre me socorrer com os mapinhas rs; ao meu ex-orientador de graduação Eldo que me despertou o interesse científico por essa região e, mesmo em outro continente, sempre se dispôs a me ajudar com minhas dúvidas; aos moradores do Arquipélago do Bailique e Baixo Araguari por receberem a nossa equipe de campo bem e nos “abrigar” em suas casas quando necessário.

Na natureza nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma.

(Antoine Lavoisier)

RESUMO

Lopes, Paula Patrícia Pinheiro. Transporte de Sólidos em Suspensão e Qualidade da Água em Zona Estuarina Amazônica. Macapá, 2019. Dissertação (Mestre em Biodiversidade Tropical) – Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - Universidade Federal do Amapá.

Os estudos sobre fluxos hidrossedimentológicos em áreas costeiras são relevantes para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, desenvolvimento, uso do solo e recursos hídricos. Na costa do estado do Amapá, extremo norte do Brasil, um intenso processo erosivo têm causado significativas alterações hidrológicas, sedimentares e na qualidade da água no Baixo Rio Araguari. A principal hipótese causadora dessas alterações é a captura fluvial da bacia hidrográfica do rio Araguari pelo delta do Rio Amazonas, através de canais naturais e artificiais que se expandiram em ambas as direções, com destaque aos canais Igarapé Novo - Gurijuba e Urucurituba. O objetivo da pesquisa foi avaliar a hidrodinâmica, descarga sólida (Q_{ss}) e a qualidade da água desses canais que conectam as duas bacias, considerando aspectos da sazonalidade e os ciclos semidiurnos das marés. Os dados foram coletados em dois períodos sazonais, em marés de sizígia, e em seis seções transversais (Araguari, Igarapé Novo - Gurijuba e Urucurituba). Os métodos de quantificação dos parâmetros foram os seguintes: a) medição de vazão com perfiladores acústicos de corrente Doppler (ADCP); b) coleta de amostras de água *in situ* para análise físico-química e sólidos suspensos - SS e c) cálculo de transporte de sólidos (Q_{ss}). Os resultados indicaram uma notável variabilidade sazonal e durante os ciclos de marés para a maioria dos parâmetros de qualidade da água ($p < 0,05$). No período chuvoso, o Canal Igarapé Novo - Gurijuba desviou 28% do fluxo do rio Araguari para o rio Amazonas enquanto o Urucurituba desviou 72%. No período chuvoso, as vazões aumentaram expressivamente, e conseqüentemente, elevaram a Q_{ss} , com maior expressão no Canal Urucurituba ($Q_{ss} = 107.982$ ton/dia). A análise de regressão múltipla identificou que, entre outros parâmetros, as distâncias das seções medidas ao rio Araguari e rio Amazonas são gradientes físicos significativamente influentes da variação da Q_{ss} . Deste modo, confirmou-se a hipótese de que o Canal Urucurituba representa o maior aporte de água e sedimentos no Rio Araguari em relação ao canal adjacente (Igarapé Novo-Gurijuba). Concluímos que este processo favorece espaço-sazonalmente a intensificação de eventos erosivos, e alterações nas concentrações de SS e na qualidade da água ($p < 0,05$). Além disso, o período chuvoso associado ao efeito de maré enchente intensificam significativamente a Q_{ss} do rio Amazonas para o interior do estuário do rio Araguari. As interações entre as duas bacias tendem a continuar alterando significativamente o equilíbrio do ecossistema no Baixo rio Araguari.

Palavras-chave: dinâmica costeira; ecossistemas aquáticos; hidrodinâmica; descarga sólida; Amazônia; estuários; Urucurituba.

ABSTRACT

Lopes, Paula Patrícia Pinheiro. Transporte de Sólidos em Suspensão e Qualidade da Água em Zona Estuarina Amazônica. Macapá, 2019. Dissertação (Mestre em Biodiversidade Tropical) – Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - Universidade Federal do Amapá.

The studies on hydrosedimentological flows in coastal areas are relevant for the maintenance of ecosystem services, development, land use and water resources. An intense erosive process has caused significant hydrological, sedimentometric and water quality changes in the Lower Araguari River and along a stretch of the coast of Amapá, extreme north of Brazil. The main hypothesis of these changes is channel capture of the Araguari river basin by the Amazon River delta, through natural and artificial channels expanding in both directions, with emphasis on the Igarapé Novo - Gurijuba and Urucurituba Channels. The objective of this research was to evaluate the hydrodynamics, solid discharge (QSS) and water quality of channels that connect these two basins, considering aspects of seasonality and semidiurnal tides. Data were collected in two seasonal periods and six sections (Araguari, Igarapé Novo - Gurijuba and Urucurituba). The quantification methods of the parameters were: a) flow measurement with acoustic Doppler profilers (ADCP); b) water sampling *in situ* for physico-chemical analysis and sediment (suspended solids - SS) and c) solids transport calculation (Qss). The results indicated a remarkable seasonal variability and during tidal cycles for most of the water quality parameters ($p < 0.05$). In the dry period, the Igarapé Novo - Gurijuba Channel contributed with a small flow to the Araguari river. In the wet period, this channel diverted 28% of the flow of the Araguari river to the Amazon river, while Urucurituba Channel diverted 72%. In the wet period, the flows increased significantly, and consequently, increased Qss, with the highest expression in the Urucurituba Channel (Qss = 107,982 tons / day). The multiple regression analysis identified that, among other parameters, the distances of the sections measured to the river Araguari and Amazon river are physical gradients significantly influential of the variation of the Qss. Thus, the hypothesis that the Urucurituba channel represents the largest contribution of water and sediments in the Araguari River in relation to the adjacent channel (Igarapé Novo-Gurijuba) was confirmed. We conclude that this process favors space-seasonal intensification of erosive events, SS and water quality ($p < 0.05$), and the rainy season associated with the flood tide effect significantly intensify the Qss of the Amazon River through the interior of the estuary river Araguari. The interactions between the two basins tend to continue to significantly alter water quality, intensifying erosive and depositional processes, affecting the equilibrium ecosystem in the Lower Araguari river.

Keywords: coastal dynamics; aquatic ecosystems; hydrodynamics; solid discharge; Amazon; estuaries; Urucurituba.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. HIPÓTESES	13
3. OBJETIVOS	14
3. 1. GERAL	14
3. 2. ESPECÍFICOS	14
4. REFERÊNCIAS	15
ARTIGO CIENTÍFICO.....	17
1. Introdução.....	18
2. Material e Métodos.....	21
2.1 Área de estudo	21
2.2 Medições da Descarga Líquida	23
2.3 Determinação da concentração de sólidos em suspensão (SS) e outros parâmetros da qualidade da água	27
2.3.1 Sólidos em suspensão	27
2.3.2 Demais parâmetros da qualidade da água	27
2.4 Cálculo da Descarga sólida em Suspensão (Q_{ss}).....	28
2.5 Análises estatísticas.....	28
3. Teoria e cálculo sobre descarga sólida	29
3.1. Distribuição de sedimentos no curso d'água, na vertical e na seção transversal... 29	
4. Resultados	30
4.1 Descarga líquida (Q_{liq}).....	30
4.2 Concentração de Sólidos Suspensos (SS) e Descarga Sólida em Suspensão (Q_{SS}) .. 35	
4.3 Variação espaço-sazonal dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água.. 37	
4.4 Variação dos parâmetros físico-químicos durante o ciclo de maré	41
4.5 Avaliação de variáveis explicativas de Q_{SS}total, Q_{SS}inst e SS.....	42
5. Discussão	44
5.1 Descarga líquida.....	44
5.2 Sólidos Suspensos e (SS) e Descarga sólida em suspensão (Q_{SS}): cenário e implicações.....	47
5.3 Influência espaço-sazonal dos processos hidrossedimentares na qualidade da água 	49
5.4 Influência das fases do ciclo de maré semidiurna na qualidade da água	51
6. Conclusões	53
AGRADECIMENTOS	53
REFERÊNCIAS	54
5. CONCLUSÕES.....	60

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os processos de erosão e deposição de sedimentos são processos sedimentares naturais que fazem parte de um ciclo global de escala geológica (Carvalho et al. 2000). Muitos esforços científicos têm se voltado para o estudo do desequilíbrio sedimentar em zonas costeiras (Li et al. 2017), que vem se intensificando a partir da combinação de fatores como as mudanças climáticas, associadas à elevação do nível do mar (Cunha e Stenberg 2018), e atividades econômicas, a exemplo da retenção de sedimentos ocasionada por usinas hidrelétricas, em escala global (Syvitski et al. 2005, Latrubesse et al. 2017). Os estudos sobre fluxos hidrossedimentológicos em áreas costeiras são relevantes para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, o desenvolvimento, uso do solo e recursos hídricos desses ambientes, visando seu melhor entendimento acerca de seus interativos mecanismos de transporte (Carvalho et al. 2000, Rosseti 2008).

Nesse cenário, merece destaque as intensas mudanças geomorfológicas que vêm ocorrendo na zona costeira do Estado do Amapá. Sob influência direta da interação entre as marés oceânicas e o Canal Norte do Rio Amazonas, esta costa possui 65% de sua extensão sobre processos erosivos, a maior proporção relativa entre os estados da costa brasileira (Torres et al. 2018). Por um lado, o rio Amazonas é o maior rio do mundo em termos de extensão, área e descarga, com um aporte médio de vazão líquida de 172.000 m³/s (Gallo e Vinzon 2015), o que representa aproximadamente 16% a 20% de toda a água de origem continental recebida pelos oceanos (Ward et al. 2013, 2015, Latrubesse et al. 2017) e uma descarga sólida na ordem de 600 a 800 x 10⁶ ton.ano⁻¹ (Filizola e Guyot 2009).

Ligeiramente ao norte da foz do rio Amazonas (Canal Norte), localiza-se a foz do rio Araguari, cuja bacia hidrográfica é a maior do estado do Amapá. Com aproximadamente 42.700 km² de área, mais de 600 km de extensão e vazão média anual superior a 1.000 m³/s, o rio Araguari desaguava no Oceano Atlântico (Cunha 2013). A sua bacia hidrográfica possui apenas cerca de 70.000 habitantes (Santos et al. 2018). Contudo, comporta atualmente três usinas hidrelétricas em seu médio curso (Cachoeira Caldeirão - UHECC, Ferreira Gomes - UHEFG e Coaracy Nunes - UHECN) (Silva et al. 2017), e abriga áreas protegidas desde a localização de sua nascente no Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque (o maior parque de floresta tropical do mundo), até o seu baixo curso nas adjacências da Reserva Biológica do Lago Piratuba (Dias et al. 2016, Cunha e Stenberg 2018).

Em 2011, o rio Amazonas, através do Canal Urucurituba, drenou significativa fração do fluxo da bacia hidrográfica do Baixo Rio Araguari, ocasionando o completo assoreamento de sua foz (Figura 1 – área hachurada ao norte do ponto D3). Com mais de 600 km de extensão e vazão média anual superior a 1.000 m³/s, o rio Araguari desaguava no Oceano Atlântico (ao norte da foz do rio Amazonas). O Canal Urucurituba se desenvolveu desde 2006 a partir de intensos processos erosivos de um canal de maré da margem esquerda do rio Amazonas. Essa erosão recortou a planície de inundação até se conectar a um afluente da margem direita do rio Araguari em 2011, a 80 km da foz. A conexão resultou no desvio progressivo do curso do rio Araguari, ocasionando rápida redução da vazão do rio a jusante do Canal Urucurituba, inversões da direção do fluxo natural, um significativo assoreamento da foz do rio, alterações na qualidade da água (Lopes 2015, Santos et al. 2018, Torres et al. 2018), alterações significativas das características do pulso hidrológico e conexões entre rios e lagos daqueles ecossistemas (Cunha e Sternberg 2018) e a extinção da pororoca (Chagas et al. 2015).

A pororoca ou *tidal bore* (em inglês) é um fenômeno que ocorre em várias partes do mundo, como no rio Qiantang na China (Chanson 2012). Entretanto, a sua maior expressão no Brasil ocorria na foz do rio Araguari, no estuário amazônico. A entrada das ondas no estuário poderia atingir até 3 metros de altura em períodos de marés de sizígia, adentrando 45 km no continente a uma velocidade de 10 a 18 km/h (Santos 2006) (Figura 1, área destacada). A pororoca representava um dos principais atores dos processos sedimentares, com efeitos na remobilização de sedimentos e na ecologia desse estuário (Santos 2006, 2012).

Na região, supõe-se que o desenvolvimento de outros canais já vinham reduzindo progressivamente a vazão do rio Araguari que, entretanto, somente colapsou com a conexão e expansão significativa do Canal Urucurituba (Santos et al. 2018). Pode-se citar o Canal Igarapé Novo – Gurijuba, formado pela ligação da foz do rio Gurijuba (afluente do rio Amazonas) e pelo Igarapé Novo, um pequeno canal da margem direita do rio Araguari, localizado a montante do Canal Urucurituba (ver detalhes nas legendas da Figura 1).

Algumas das possíveis causas que contribuíram para a evolução do Canal Urucurituba passam pela influência da hidrodinâmica entre o estuário do rio Amazonas e suas interações com a zona fluviomarina do rio Araguari; instalação de usinas hidrelétricas no alto rio Araguari e; a criação extensiva de búfalos, responsáveis pela criação de pequenos canais que se convertem em grandes canais na região (Santos et al. 2018). Além disso, esses processos podem estar associados às mudanças do clima e padrões hidrológicos, influenciando o pulso de inundação (sazonal e de marés) e mudanças no padrão de conectividade entre os diferentes

corpos d'água da região (Cunha e Sternberg, 2018). Por outro lado, os fenômenos climáticos estão aparentemente causando uma sensível elevação do nível do mar. Tais efeitos têm sido corroborados em estudos de isótopos estáveis ^2H e ^{18}O em relação à evaporação e salinização de lagos ao longo da zona estuarina do Estado do Amapá (Cunha e Sternberg, 2018).

Após a captura fluvial do rio Araguari pelo rio Amazonas, além dos impactos causados pelo assoreamento e colmatação da foz (Santos et al. 2018, Torres et al. 2018), regiões adjacentes têm sofrido com efeitos similares, a exemplo do arquipélago do Bailique (Figura, adjacência do ponto D2). Trata-se de um conjunto de ilhas de influência flúvio-estuarina localizado no canal norte do rio Amazonas (Figura 1) que, assim como outras ilhas da costa, sofre processos dinâmicos de erosão e acreção (Silva et al. 2011). Recentemente, a região tem sofrido com o agravamento das *terras caídas*, um tipo de erosão que se difere por ser um fenômeno típico de rios da região Amazônica (Sioli 1984, Bandeira et al. 2018). Há suspeitas de que um dos fatores agravantes esteja relacionado às alterações recentes da foz do rio Araguari que modificaram a hidrodinâmica da região (Torres et al. 2018).

Dada a complexa interação entre essas duas importantes bacias hidrográficas, ainda assim, os estudos científicos após as mudanças relatadas são praticamente inexistentes, o que torna essa nova dinâmica desconhecida. Portanto, há necessidade de se construir uma base eficiente de dados hidrológicos, transporte de sólidos e de qualidade da água que são muito relevantes à compreensão desses processos como subsídio aos estudos ecossistêmicos costeiros e à gestão de recursos hídricos.

O presente estudo apresenta uma contribuição única na formação de uma base de dados inicial para estas três dimensões, enfatizando o transporte de sólidos suspensos e, especialmente, suas interações com a hidrodinâmica e a qualidade da água, considerando os aspectos da sazonalidade e a dinâmica de maré semidiurna que rege o ambiente de estudo.

2. HIPÓTESES

- O Canal Urucurituba apresenta o maior aporte líquido e sólido em relação ao canal Igarapé Novo - Gurijuba, favorecendo maiores eventos erosivos e alterações da concentração de sólidos suspensos (SS) e da qualidade da água;
- O período sazonal chuvoso e o efeito de marés enchente intensificam significativamente as variações da qualidade da água e as descarga líquida (Q) e sólida (Q_{ss}) do rio Amazonas para o interior do estuário do rio Araguari;
- Os parâmetros físico-químicos de qualidade da água se apresentam espacialmente similares entre os canais estudados, porém dependem significativamente da variação entre os diferentes períodos sazonais (seco e chuvoso) e/ou fases específicas das marés (enchente e vazante).

3. OBJETIVOS

3. 1. GERAL

Avaliar a dinâmica de sólidos suspensos e a qualidade da água entre os canais que conectaram as bacias do rio Araguari e rio Amazonas, identificando como os fatores físicos influenciam a descarga líquida, sólida e a concentração de sólidos suspensos.

3. 2. ESPECÍFICOS

- Identificar o aporte de descarga hídrica (Q) e sólida (Q_{ss}) do Canal Urucurituba e Canal Igarapé Novo - Gurijuba, que une as duas bacias hidrográficas;
- Avaliar o efeito da sazonalidade sobre as descargas hídricas e sólidas entre os diferentes os diferentes canais e o rio Araguari;
- Avaliar a influência da fase do ciclo de maré e períodos sazonais (chuvoso e seco) sobre a variação da concentração de sólidos suspensos (SS) e parâmetros de qualidade da água.

4. REFERÊNCIAS

- Bandeira, I. C. N., A. Adamy, E. R. Andretta, R. A. da Conceição, and M. M. N. de Andrade. 2018. Terras caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon? *Environmental Earth Sciences* **77**:222.
- Carvalho, N. de O., N. P. Filizola Júnior, P. M. C. dos Santos, and J. Lima. 2000. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília: Aneel.
- Chagas, M. A., E. S. dos Santos, and A. C. da Cunha. 2015. Alguém viu a pororoca por aí? XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos:8.
- Chanson, H. 2012. *Tidal Bores, Aegir, Eagre, Mascaret, Pororoca: Theory and Observations*. Word Scientific, Singapore.
- Cunha, A. C. da. 2013. Revisão descritiva sobre qualidade da água, parâmetros e modelagem de ecossistemas aquáticos tropicais. *Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)* **3**:124–143.
- Cunha, A. C. da, and L. da S. L. Sternberg. 2018. Using stable isotopes ^{18}O and ^2H of lake water and biogeochemical analysis to identify factors affecting water quality in four estuarine Amazonian shallow lakes. *Hydrological Processes* **32**:1188–1201.
- Dias, T. C. A. de C., A. C. da Cunha, and J. M. C. da Silva. 2016. Return on investment of the ecological infrastructure in a new forest frontier in Brazilian Amazonia. *Biological conservation* **194**:184–193.
- Filizola, N., and J. L. Guyot. 2009. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrological Processes* **23**:3207–3215.
- Gallo, M. N., and S. B. Vinzon. 2015. Estudo numérico do escoamento em planícies de marés do canal Norte (estuário do rio Amazonas). *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua* **2**:38–50.
- Latrubesse, E. M., E. Y. Arima, T. Dunne, E. Park, V. R. Baker, F. M. d’Horta, C. Wight, F. Wittmann, J. Zuanon, P. A. Baker, C. C. Ribas, R. B. Norgaard, N. Filizola, A. Ansar, B. Flyvbjerg, and J. C. Stevaux. 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature* **546**:363–369.
- Li, X., J. P. Liu, Y. Saito, and V. L. Nguyen. 2017. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams. *Earth-Science Reviews* **175**:1–17.
- Lopes, P. P. P. 2015. Análise temporal de alterações morfológicas fluviais e seus impactos socioambientais no Baixo rio Araguari, Amapá. Universidade Federal do Amapá.
- Rosseti, D. de F. 2008. Ambientes costeiros. Page 318 *in* T. G. Florenzano, editor. *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Santos, E. S. dos. 2012. *Modelagem Hidrodinâmica e Qualidade da Água em Região de Pororoca na Foz do Rio Araguari-AP*. Universidade Federal do Amapá, Macapá.
- Santos, E. S. dos, P. P. P. Lopes, H. H. da Silva Pereira, O. de Oliveira Nascimento, C. D. Rennie, L. da S. L. O’Reilly, and A. C. da Cunha. 2018. The impact of channel capture

- on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of The Total Environment* **624**:887–899.
- Santos, V. F. dos. 2006. Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense: Tese de doutorado.
- Silva, C. N. da, R. Â. P. de Lima, and J. M. P. da Silva. 2017. Uso do Território e Impactos das construções de Hidroelétricas na Bacia do Rio Araguari (Amapá-Brasil). *PRACS: Revista Eletrônica de Humanidades do Curso de Ciências Sociais da UNIFAP* 9:123.
- Silva, M. V, V. F. Santos, and O. F. M. da Silveira. 2011. Análise multitemporal de mudanças nas ilhas costeiras do estado do Amapá aplicando dados de sensores remotos. *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba* **30**:8614–8622.
- Sioli, H. 1984. The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types. Pages 127–165 *The Amazon*. Springer.
- Syvitski, J. P. M., C. J. Vorösmarty, A. J. Kettner, and P. Green. 2005. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science* **308**:376–380.
- Torres, A. M., M. El-Robrini, and W. J. P. Costa. 2018. Panorama da erosão costeira - Amapá. Page 761 *in* D. Muehe, editor. *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Second edition. Ministério do Meio Ambiente.
- Ward, N. D., R. G. Keil, P. M. Medeiros, D. C. Brito, A. C. Cunha, T. Dittmar, P. L. Yager, A. V. Krusche, and J. E. Richey. 2013. Degradation of terrestrially derived macromolecules in the Amazon River. *Nature Geoscience (Print)* **6**:530–533.
- Ward, N. D., H. O. Krusche, Alex V. Sawakuchi, D. C. Brito, A. C. Cunha, R. Moura, José Mauro Sousa Da Silva, P. L. Yager, R. G. Keil, and J. E. Richey. 2015. The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River-Óbidos to the ocean. *Marine Chemistry (Print)* **177**:244–256.

ARTIGO CIENTÍFICO

**Transporte de Sólidos em Suspensão e Qualidade da Água em Zona Estuarina
Amazônica**

Artigo submetido ao periódico Landscape Research

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO E QUALIDADE DA ÁGUA EM ZONA ESTUARINA AMAZÔNICA

Paula Patrícia Pinheiro Lopes ^a, Admilson Moreira Torres ^b, Alan Cavalcanti da Cunha ^c

^a Programa de Pós Graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá – UNIFAP, Macapá, AP – Brasil. ppatricial@hotmail.com

^b Laboratório de Análises de Sedimentos - Núcleo de Pesquisas Aquáticas - Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA, Campus Fazendinha, Macapá - AP, Brasil. admilson.m.torres@gmail.com

^c Laboratório de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais - Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento – DMAD, Universidade Federal do Amapá – UNIFAP, Macapá – AP, Brasil. E-mail: alancunha12@gmail.com

RESUMO

Na costa do estado do Amapá, extremo norte do Brasil, um intenso processo erosivo têm desenvolvido canais que causam significativas alterações hidrológicas, sedimentares e na qualidade da água no Baixo Rio Araguari. O objetivo da pesquisa foi avaliar a hidrodinâmica, descarga sólida (Q_{ss}) e a qualidade da água dos canais (Urucurituba e Igarapé Novo – Gurijuba) que conectaram as duas bacias, considerando a sazonalidade (período seco e chuvoso) e as marés semidiurnas (marés enchente e vazante - 12,5h). Foram realizadas medições de vazão com ADCP, análise físico-química e de sólidos suspensos (SS) da água e cálculo de transporte sólido (Q_{ss}). No período chuvoso, o canal Igarapé Novo - Gurijuba desviou 28% do fluxo do rio Araguari para o rio Amazonas e o Urucurituba desviou 72%. O Canal Urucurituba apresentou a maior Q_{ss} (107.982 ton/dia). A maioria dos parâmetros de qualidade da água foi significativamente diferente entre os sítios, fases da maré e sazonalmente. O Canal Urucurituba é responsável pelo maior aporte hídrico e sólido para o Rio Araguari e a interação entre as duas bacias vêm intensificando eventos erosivos, alterações na qualidade da água e desequilibrando este ecossistema estuarino.

Palavras-chave: dinâmica costeira, ecossistemas aquáticos, hidrodinâmica, descarga sólida, Amazônia, estuários; Urucurituba.

1. Introdução

Os estudos sobre fluxos hidrossedimentológicos em áreas costeiras são relevantes para a conservação, desenvolvimento, uso do solo e recursos hídricos nos ecossistemas aquáticos, principalmente visando um melhor entendimento acerca de seus interativos mecanismos de transporte (Carvalho et al. 2000, Rosseti 2008). Muitos esforços científicos têm se voltado para o estudo do desequilíbrio sedimentar em zonas costeiras (Li et al. 2017), que vem se intensificando a partir da combinação de fatores como as mudanças climáticas, associadas à elevação do nível do mar (Cunha e Sternberg 2018) e atividades econômicas, a exemplo da

retenção de sedimentos ocasionada por usinas hidrelétricas, em escala global (Syvitski et al. 2005, Latrubesse et al. 2017).

Em grandes sistemas fluviais que possuem significativo aporte sedimentar, como o rio Amazonas, um desequilíbrio físico pode ocasionar diversos impactos ambientais, destacando-se o assoreamento das margens e leitos de rios, que prejudicam a navegabilidade (Bernini et al. 2016) e a manutenção dos serviços ecossistêmicos (Latrubesse et al. 2017). Neste contexto, merece destaque as mudanças geomorfológicas da zona costeira amazônica, especialmente a pouco estudada costa do estado do Amapá (Figura 1). Nesta costa, que recebe influência fluviomarina das correntes de marés oceânicas e do Canal Norte do rio Amazonas, 65% de sua extensão está sob processos erosivos (Torres et al. 2018).

Por um lado, o rio Amazonas é o maior rio do mundo em termos de extensão, área e descarga, com um aporte médio de vazão líquida de 172.000 m³/s (Gallo e Vinzon 2015) o que representa aproximadamente 16% a 20% de toda a água de origem continental recebida pelos oceanos (Latrubesse et al. 2017). Além disso, recebe elevada e proporcional quantidade de nutrientes, carbono orgânico dissolvido e particulado que se dispersam na Pluma do Rio Amazonas (PRA) (Ward et al. 2013, 2015, 2018, Valerio et al. 2018), juntamente a uma descarga sólida da ordem de 600 a 800 x 10⁶ ton.ano⁻¹ (Filizola e Guyot 2009).

Por outro lado, localizado no extremo norte do Brasil, o rio Araguari é a maior bacia hidrográfica exclusivamente do estado do Amapá, com uma área de aproximadamente 42.700 km², cuja importância social, ecológica e econômica é ímpar para o Estado (Cunha 2013). A sua bacia hidrográfica, abrange 10 dos 16 municípios do Estado e possui ≈70.000 habitantes (Santos et al. 2018). Contudo, comporta atualmente três usinas hidrelétricas em seu médio curso (UHECC, UHEFG e UHECN) (Silva et al. 2017), abrigando áreas protegidas desde a localização de sua nascente no Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque (o maior parque de floresta tropical do mundo), até o seu baixo curso nas adjacências da Reserva Biológica do Lago Piratuba (Dias et al. 2016, Cunha e Sternberg 2018).

A partir de eventos erosivos acelerados na costa, um canal de 34 km de extensão, conhecido como Canal Urucurituba, conectou o rio Amazonas ao rio Araguari (baixo curso). Essa conexão, que durou aproximadamente 5 anos (entre 2006 e 2011), ocasionou a captura fluvial do rio Araguari e decorrentes impactos como a inversão da direção do fluxo do rio a jusante do canal, o completo assoreamento da foz (Lopes 2015, Santos et al. 2018), alterações na qualidade da água, no pulso hidrológico e nas conexões entre rios e lagos daqueles ecossistemas (Cunha e Sternberg 2018) e a extinção da pororoca (Chagas et al. 2015).

Na região, supõe-se que o desenvolvimento de outros canais já vinham reduzindo progressivamente a vazão do rio Araguari que, entretanto, somente colapsou com a conexão e expansão significativa do Canal Urucurituba (Santos et al. 2018). Pode-se citar o Canal Igarapé Novo – Gurijuba, formado pela ligação da foz do rio Gurijuba (afluente do rio Amazonas) e pelo Igarapé Novo, um pequeno canal da margem direita do rio Araguari, localizado a montante do Canal Urucurituba (ver detalhes nas legendas da Figura 1).

A interação entre essas duas importantes bacias hidrográficas a partir desses canais ocasionou mudanças significativas nos cursos de água, tanto a montante quanto a jusante da intersecção com o canal Urucurituba e Gurijuba (Figura 1), alterando as velocidades médias de escoamento, a dinâmica de erosão e deposição de sedimentos e formação de bancos lamosos com interferências imediatas na navegação. Essas modificações nos padrões de escoamento tendem a alterar também o fluxo de nutrientes, temperatura e qualidade da água, afetando o ciclo de vida da fauna e flora (Cunha 2013), gerando impactos socioambientais e prejuízos à socioeconomia local (Lopes 2015).

Os estudos científicos após as mudanças geomorfológicas relatadas na região são praticamente inexistentes. Portanto, essa nova dinâmica ainda não é completamente conhecida, especialmente as variações espaço-sazonais da qualidade da água e as alterações geométricas e físicas desses canais, tais como talude, descarga líquida e sólida. Então, a pesquisa se propôs a responder à principal questão: quais são os fatores ambientais que influenciam a vazão líquida (Q), descarga sólida (Q_{SS}) e Sólidos Suspensos (SS) nos diferentes sítios amostrais e períodos sazonais?

As hipóteses que nortearam estes questionamentos foram as seguintes: **a)** o Canal Urucurituba apresenta o maior aporte líquido e sólido em relação ao canal Igarapé Novo-Gurijuba, favorecendo maiores eventos erosivos e alterações da concentração de sólidos suspensos (SS) e da qualidade da água; **b)** o período sazonal chuvoso e o efeito de marés enchente intensificam significativamente e em maior grau a descarga líquida (Q) e sólida (Q_{SS}) do rio Amazonas para o interior do estuário do rio Araguari **c)** apesar da dinâmica flúvio-estuarina presente em ambas as bacias hidrográficas, a maioria dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água apresentam-se espacialmente similar. Porém, são significativamente influenciados pela variação hidroclimática sazonal (seco e chuvoso) e/ou pelas fases das marés (enchente e vazante).

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

Os canais e rios estudados estão localizados entre a margem direita do Baixo Rio Araguari e a margem esquerda do Baixo Rio Amazonas (Figura 1). Esta região está localizada na zona costeira estuarina do estado do Amapá, caracterizada por uma costa plana, muito baixa, instável e retilínea, com influência de processos fluviais (Canal Norte do rio Amazonas) e costeiros (marés semidiurnas), que propiciam processos de erosão (55%) e acumulação (45%) (Torres et al. 2018).

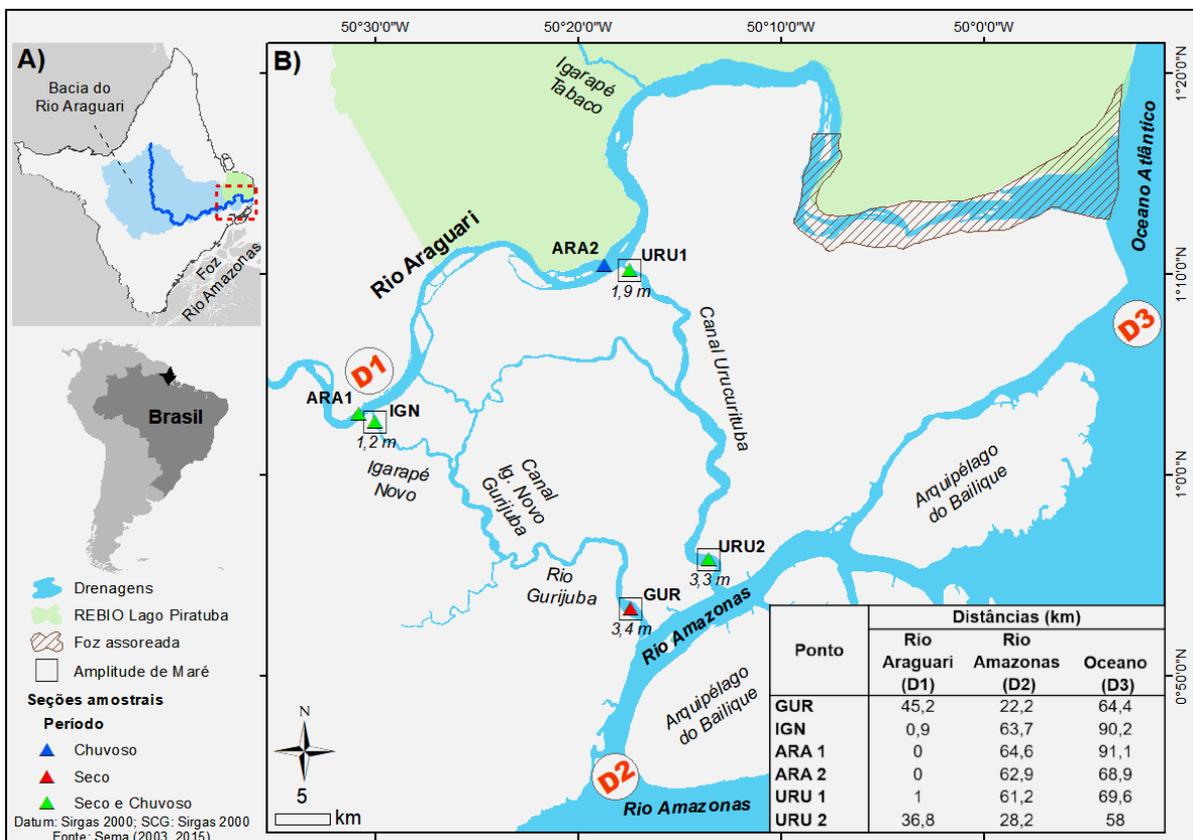


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo. A) Estado do Amapá e a bacia hidrográfica do rio Araguari. B) Os triângulos indicam as seções de amostragem no baixo rio Araguari e nos canais que o conectaram ao rio Amazonas: Canal Igarapé Novo – Gurijuba formado pela conexão da foz do rio Gurijuba (GUR) ao Igarapé Novo (IGN), rio Araguari (ARA1) e (ARA2) e Canal Urucurituba (URU1) e (URU2). Na seção GUR, no período chuvoso, foi medida somente a vazão durante a maré vazante e sem coleta de água. O ponto ARA2, no período chuvoso, foi medida somente a vazão da maré enchente, mas com análise da

qualidade da água no ciclo de maré completo. O quadro no canto inferior direito mostra as distâncias de cada seção até os pontos destacados no mapa: D1 (rio Araguari), D2 (Rio Amazonas) e D3 (oceano).

Os solos são do tipo gleissolo háplico, do grupo hidromórficos, associados à formação geológica recente do Período Quaternário (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2004). Tais características geológicas, geomorfológicas e pedológicas condicionam essa área a uma vulnerabilidade natural à erosão (Rabelo 2006). Os domínios florísticos são de natureza inundável, abrangendo a floresta de várzea densa nas margens dos rios Araguari e Gurijuba, campos inundáveis do tipo graminóides e arbustivos na maior extensão do Canal Urucurituba e Igarapé Novo, além de uma estreita faixa de manguezal nas adjacências da foz do Urucurituba (Rabelo 2006).

O Canal Urucurituba possui aproximadamente 31 km de extensão e área de superfície hídrica de 27 km² (Lopes 2015). A profundidade média é de 13 m, podendo chegar até 34 m (Santos et al. 2018). O rio Gurijuba abrange a microbacia dos rios Gurijuba e Piririm que drena os municípios de Macapá, Itauba e Cutias em uma área de aproximadamente 177 km². Seu padrão de drenagem é predominantemente dentrítico, mas com muitas ocorrências de anomalias ocasionadas pela abertura de valas para a bubalinocultura (Santana and Silveira 2005).

O clima da área é regido pela Zona de Convergência Intertropical – ZCIT que influencia diretamente a pluviosidade, nebulosidade e a descarga fluvial (Santos 2006). O período chuvoso compreende os meses de Fevereiro a Maio e o período seco de Agosto a Novembro. Na área de influência do Baixo Rio Araguari, a temperatura média anual do ar varia entre 27° C a 27,5° C e precipitação pluviométrica entre 2.400 a 2.600 mm anuais (Oliveira et al. 2010).

O rio Araguari, com sua nascente localizada nos limites do Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque, é uma bacia hidrográfica localizada integralmente dentro do limite do estado (Cunha 2013). O trecho considerado do rio Araguari na pesquisa corresponde ao baixo curso de sua bacia hidrográfica (Figura 1). As atividades econômicas dessa bacia perpassam pela geração de energia elétrica - UHECC, UHEFG e UHECN (Brito 2008, Bárbara et al. 2010, Cunha et al. 2011), além de atividades de mineração no seu alto curso, como ouro, manganês, ferro e seixo (Matta et al. 2008) e a bubalinocultura, predominante nas áreas de campos inundáveis, próximas da região focal de estudo. O Amapá é o segundo maior produtor de búfalos do Brasil, estimado em 302.834 cabeças em 2017 (Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística 2017), sendo que sua maior densidade está localizada na planície entre o curso do Baixo Rio Araguari e o Baixo Rio Amazonas, especialmente nas fazendas localizadas ao longo dos canais em estudo (Funi et al. 2014). Neste caso, os búfalos são criados de forma extensiva, praticamente sem manejo, sendo reconhecidos como agentes modificadores da paisagem, responsáveis por criar inúmeros canais que se confundem com o sistema natural de drenagem do interior da planície (Santos 2006).

Na estação fluviométrica de Porto Platon, localizada no rio Araguari a 270 km da foz, as maiores vazões ocorrem entre os meses de abril a junho e as menores entre os meses de outubro a dezembro. Entre os anos de 2013 e 2015, foi registrada máxima de 3415,8 m³/s, em maio de 2014, e mínima de 155,5 m³/s, em dezembro de 2013 (Santos 2012, Santos et al. 2018).

2.2 Medições da Descarga Líquida

As medições das descargas líquidas foram realizadas por meio do método acústico Doppler, com uso de dois equipamentos ADCP (Acoustic Doppler Current Profile), sendo um o modelo Rio Grande 600 kHz da RD Instruments e o outro modelo River Surveyor M9 da SonTek (Tabela 1). Esse método baseado no princípio de Doppler consiste na emissão de ondas sonoras a uma frequência conhecida que, ao entrar em contato com as partículas de sedimentos e outros materiais suspensos na água, retornam o sinal acústico para o aparelho com outra frequência. Como se considera que esses sedimentos são deslocados na velocidade do fluxo, a diferença da frequência das ondas sonoras emitidas e refletidas é proporcional à velocidade relativa entre o barco e as partículas (Mueller e Wagner 2009). A seção transversal percorrida é dividida pelo ADCP em verticais, onde a partir da largura e profundidade, ocorre a integração das velocidades medidas à área calculada, resultando no cálculo da descarga líquida para a seção (Figura 2).

Os equipamentos foram instalados na lateral da embarcação com os transdutores imersos a 0,50 m da superfície da água, conectados a um computador portátil, a partir do qual se controla e realiza um processo de calibração da bússola do GPS na seção de análise. Depois de calibrada a bússola e de informados dados como a declinação magnética e a profundidade dos transdutores, iniciaram-se as medições efetivas, as quais, em média, têm duração de 12,5 h (tempo de um ciclo de maré semidiurna). Para a determinação da vazão líquida na seção transversal (total de água que sai menos o total de água que entra), foi realizada a integração numérica da vazão medida no ciclo completo (obtenção do volume pelo

produto da vazão pelo tempo em cada travessia). A partir do cálculo do volume de água total ao longo de um ciclo de maré, este volume foi dividido para as 12,5 h, e assim a vazão líquida foi determinada (Santos et al. 2018).

As seis seções transversais (Figura 2) foram medidas em dois períodos hidrológicos, sendo um no período seco (outubro/2017) e outro no período chuvoso (maio/2018). Como critério de controle das características hidrológicas, ambos os experimentos ocorreram em dias de marés de sizígia (Figura 1 e Tabela 1).

Duas seções transversais não foram medidas, devido a limitações técnicas e logísticas que resultaram em curvas de vazão incompletas. O ponto ARA2 não foi medido no período seco e, no período chuvoso, obteve tempo de medição inferior ao ciclo de maré; o ponto GUR também resultou em tempo de medição inferior ao ciclo de maré no período chuvoso. Dessa forma, foram obtidas no total 9 ciclos de medidas de descargas líquidas, sendo 5 no período seco e 4 no chuvoso.

Tabela 1 – Descrição das seções transversais utilizadas durante duas campanhas hidrodinâmicas e coleta de amostras de parâmetros da qualidade de água, ambas durante o período de maré de sizígia.

Rio/Canal	Ponto	Período		Equipamento ADCP	Latitude	Longitude	Distância ao rio Araguari (km)	Distância ao rio Amazonas (km)	Distância retilínea à Costa Oceânica (km)
		Seco	Chuvoso						
Canal Gurijuba (foz)	GUR	17/10/2017	04/05/2018	Rio Grande - RD	0°53'10.46"N	50°17'24.33"W	45,2	22,2	64,4
Canal Igarapé Novo (confluência com rio Araguari)	IGN	20/10/2017	03/05/2018	River Surveyor M9/ Rio Grande - RD	1° 2'45.16"N	50°30'8.07"W	0,9	63,7	90,2
Rio Araguari (à montante do Igarapé Novo)	ARA 1	19/10/2017	03/05/2018	River Surveyor M9	1° 3' 5.94"N	50°30'33.72"W	0,0	64,6	91,1
Rio Araguari (à montante do Canal Urucurituba)	ARA 2	-	02/05/2018	River Surveyor M9	1°10' 23.82"N	50°18'23.06"W	0,0	62,9	68,9
Canal Urucurituba (confluência com rio Araguari)	URU 1	19/10/2017	02/05/2018	Rio Grande – RD	1°10'13.99"N	50°17'31.26"W	1,0	61,2	69,6
Canal Urucurituba (foz)	URU 2	16/10/2017	01/05/2018	Rio Grande – RD	0°55'46.70"N	50°13'36.70"W	36,8	28,2	58,0

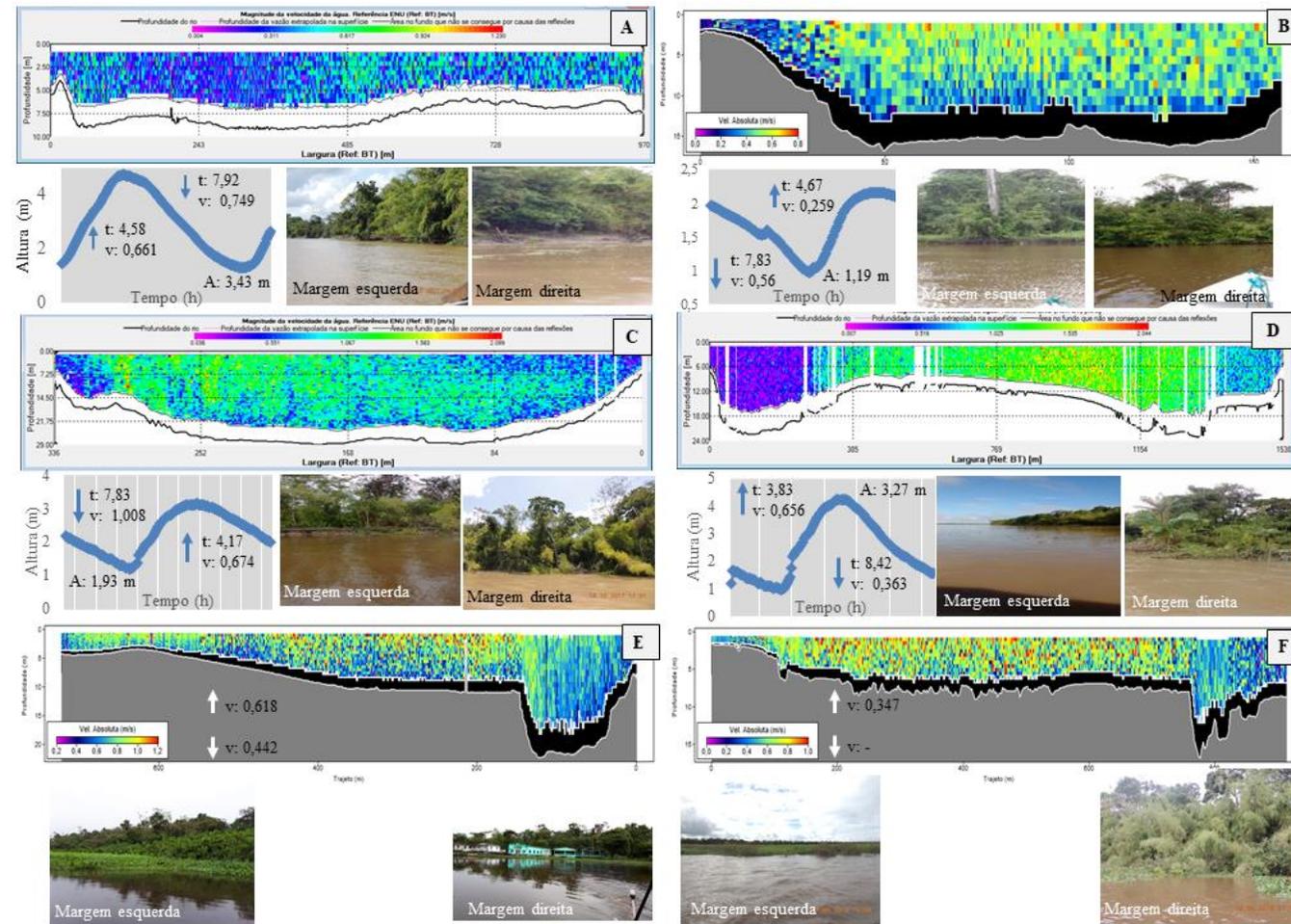


Figura 2 - Perfis de medição de descarga líquida, curvas de vazão e fotos das margens esquerda e direita das seis seções de amostragem. A) GUR; B) IGN, C) URU1; D) URU2; E) ARA1; F) ARA2. Os pontos GUR (A) e ARA1 (E) correspondem ao período seco e os demais ao período chuvoso. As setas para cima (↑) indicam o tempo (t) e velocidade média (v) da maré enchente e setas para baixo (↓) indicam o t e v da maré vazante. A amplitude da maré é dada por “A”.

2.3 Determinação da concentração de sólidos em suspensão (SS) e outros parâmetros da qualidade da água

2.3.1 Sólidos em suspensão

Os pontos de coleta de água foram os mesmos referentes aos perfis transversais de medição de vazão (Figura 1). Os dados de água referentes ao ponto GUR, no período seco, não foram considerados nas análises. Isso porque ocorreu somente na maré vazante. Já os dados de qualidade da água do ponto ARA2, no período chuvoso, foram considerados, pois foram coletados durante todo o ciclo de maré (Figura 1).

A coleta de amostras de água para análise de sólidos suspensos buscou abranger a variação do ciclo de maré semidiurna. Foi coletado 1 L de mistura de água-sedimento, em períodos de cada 1 hora, até a finalização do ciclo da maré (12,5 h). Nesta metodologia, as amostras foram coletadas na superfície do canal (0,50 cm), totalizando durante as duas campanhas 132 amostras.

A análise de SS foi realizada em laboratório por meio do método de filtração com uma bomba a vácuo. Amostras de 250 mL foram filtradas em membranas de fibra de vidro (0,45 µm de poro e 47 mm de diâmetro). As membranas foram secas e pesadas em balança analítica antes e depois da filtração. A determinação da concentração é a diferença entre o peso seco da membrana (P1) e o segundo peso contendo os sólidos retidos (P2), relacionando-o ao volume da amostra (V) em L (Carvalho et al. 2000).

$$C_{SS} = \frac{(P2-P1) \times 1000}{V} \quad (1)$$

O SS foi utilizado como parâmetro dependente ou relacionado com a descarga sólida (Q_{ss}), também dependente. O objetivo foi correlacioná-las com outras variáveis independentes (hidrodinâmicos, qualidade da água, localização, período sazonal, fase da maré, etc).

2.3.2 Demais parâmetros da qualidade da água

A análise dos demais parâmetros físico-químicos de água (T_w , T_{ar} , EC, Sal, Turb, Secchi, STD, OD e pH) também foi realizada com frequência horária, durante todo o ciclo de maré semidiurna ($\approx 12,5h$), e em cada período sazonal. O procedimento de coleta ocorreu sempre no centro das seções transversais medidas pelas descargas líquidas com o ADCP.

Os parâmetros T_w , CE, Sal e STD foram medidos *in loco* com uma sonda YSI multiparâmetros 556 MPS (YSI 2002). A transparência (Secchi) também foi medida *in loco* através do disco de Secchi. A turbidez foi analisada pelo método nefelométrico com o turbidímetro AP 2000 IP (Policontrol Instrumentos Analíticos). Para a determinação do oxigênio dissolvido e pH foram utilizados, respectivamente, um oxímetro Instrutherm MO 900 e uma sonda multiparâmetro OAKTON PCSTeste 35 (Leite 2010).

2.4 Cálculo da Descarga sólida em Suspensão (Q_{ss})

A Q_{ss} foi estimada considerando somente a carga de sólidos suspensos, a qual representa de 80 a 90% da descarga sólida total (Carvalho et al. 2000). O cálculo foi realizado com base no método simplificado descrito em Carvalho et al. (2000) representado pela seguinte equação:

$$Q_{SS} = 0,0864 * Q * C_{ss} \quad (2)$$

Onde: Q_{ss} representa a descarga sólida em suspensão (tonelada por dia), Q é a descarga líquida ou vazão (m^3/s) e C_{ss} a concentração média de sedimentos em suspensão (mg/L). O fator 0,0864 é a constante de conversão para tonelada por dia.

2.5 Análises estatísticas

Os dados sedimentares (SS e Q_{SS}), qualidade da água e hidrodinâmicos foram inicialmente submetidos a uma análise estatística descritiva e posterior análise univariada e multivariada utilizando o programa R (R Development Core Team 2018). Foram utilizadas a análise de correlação de Spearman para testar as relações entre cada uma das variáveis hidrodinâmicas, hidrossedimentológicas e de qualidade da água (T_w , Tar, EC, Sal, Turb, Secchi, STD, OD e pH). Também foram testados os efeitos da sazonalidade para avaliar significativas variações dos parâmetros de qualidade da água, bem como os fluxos mássicos (Q_{ss}) usando testes não-paramétricos de Wilcoxon. Este é um teste alternativo ao teste t-Student quando os erros são considerados não normais (Crawley 2007). Posteriormente foram testados os efeitos espaciais da concentração de sólidos suspensos (SS) e de todos os demais parâmetros da qualidade da água usando o teste não-paramétrico de Kruskal–Wallis. O teste de Kruskal–Wallis é análogo ao teste F usado na ANOVA (MacKinnon et al. 2016). Enquanto

a ANOVA depende de hipóteses que todas as amostras em consideração são independentes e normalmente distribuídas, o teste de Kruskal–Wallis não define qualquer restrição para as devidas comparações (Crawley 2007, R Development Core Team 2018). De modo similar foi realizada uma série de regressões múltiplas. O objetivo foi avaliar possíveis modelos para estimativas de SS e Q_{SS} em função de variáveis ou gradientes hidrodinâmicos, distâncias, demais parâmetros da qualidade da água, etc, em diferentes sítios amostrais (rios e canais), períodos sazonais ou até mesmo diferentes fases de marés. Por exemplo, sítios e períodos amostrais e suas diferentes distâncias em relação ao Baixo Rio Araguari, Baixo Rio Amazonas ou a uma distância específica do Oceano Atlântico (Figura 1).

3. Teoria e cálculo sobre descarga sólida

Estudos de transporte de sedimentos em suspensão têm sido considerados como partículas que se movem individualmente, como não-coesivas, de forma geral. Entretanto, o transporte de partículas finas tem sido observado como “flocos”, que altera significativamente o cálculo ou estimativa do fluxo de sedimentos para jusante, especialmente devido ao efeito cumulativo de mudança da granulometria efetiva, densidade, porosidade e forma em relação à partícula primária (“não floculada”) (Carvalho et al. 2000).

3.1. Distribuição de sedimentos no curso d’água, na vertical e na seção transversal

É relevante e, há de se considerar, que a distribuição de sedimentos numa vertical transversal varia espacial e temporalmente. Isto é, ao longo do curso d’água, e em relação aos períodos hidrológicos. Então, não é prudente separar o sedimento dos aspectos de escoamento ou movimento da água (hidrodinâmica). Assim, do ponto de vista teórico, e de acordo com a equação de Bruck (1985), a resposta do curso d’água ao equilíbrio pode ser prevista pela seguinte equação (3):

$$Q_{ml}.D = Q.I \quad (3)$$

Onde Q_{ml} é a descarga do material do leito, D é o diâmetro médio das partículas do leito, Q é a descarga líquida (ADCP) e I é a declividade do leito.

Essa equação representa um balanço ou um equilíbrio definindo que uma mesma partícula pode estar ora em suspensão, ora se movimentando no leito para o meio líquido ou

mesmo deslizando ou rolando no leito, cujas condições são eminentemente dependentes da velocidade da corrente e de outros fatores físicos como a inclinação do leito e peso da partícula (Carvalho et al. 2000). Por exemplo, as partículas mais grossas do sedimento em suspensão (frequentemente a areia), apresentam variação crescente da superfície para o leito. As partículas finas, como silte e argila, apresentam distribuição aproximadamente uniforme na vertical (silte grosso, médio, fino e muito fino, e argila). Quando o percentual destes últimos é superior a 80% as equações (2) e (3) podem ser utilizadas para estimar a concentração média de SS, com um erro igual ou inferior a 5% na estimativa de transporte de material em suspensão ou da descarga de sólidos (Q_{ss}).

Com base na hipótese de que a presente região de estudo registra uma granulometria aproximada de silte e argila entre 85 a 95 % (Gibbs 1967, Allison et al. 2000), em nossa análise, considerou-se que a distribuição do material em suspensão é, então, homogênea na vertical e na lateral, independentemente da condição hidrológica e hidrodinâmica (com escoamento de perfil logaritmo de velocidade), especialmente em função das condições turbulentas do escoamento que tende a manter a coluna d'água bem misturada (Santos et al. 2018).

4. Resultados

4.1 Descarga líquida (Q_{liq})

Observou-se significativa variação espacial das vazões líquidas (Q_{liq}) quando comparadas entre os rios e canais ($p < 0,05$) e entre os períodos seco e chuvoso ($p < 0,05$) (Figura 3). No período seco, as Q_{liq} mais elevadas ocorreram no Canal Urucurituba, sendo a maior na seção URU1 (768 m³/s) e a segunda maior na foz do canal, correspondente à seção URU2 (547 m³/s). Na sequência, a foz do rio Gurijuba apresentou a terceira maior Q_{liq} (408 m³/s). Por outro lado, o rio Araguari (ARA1) e o Igarapé Novo (IGN) registraram os menores valores, respectivamente, com $Q_{liqARA1} = 157$ m³/s e $Q_{liqIGN} = -48$ m³/s). A vazão negativa indica que a corrente está no sentido inverso, de jusante para montante do canal. Ou seja, entrou mais volume de água no rio Araguari por este canal (IGN) do que saiu, no período seco.

As seções no Canal Urucurituba também apresentaram os maiores picos de vazão durante as marés enchente e vazante, tanto no período seco quanto no chuvoso (Figura 3). No período seco, por exemplo, a seção URU2 (foz) atingiu no pico da maré enchente -18.496

m^3/s contra $-11.000 \text{ m}^3/\text{s}$ no ponto URU1. Já durante a maré vazante, o ponto URU2 alcançou vazão máxima de $13.387 \text{ m}^3/\text{s}$ contra $9.777 \text{ m}^3/\text{s}$ no ponto URU1. No período chuvoso, URU2 alcançou $20.140 \text{ m}^3/\text{s}$ no pico da maré vazante e URU1 atingiu $10.967 \text{ m}^3/\text{s}$. Na maré enchente, ambos os picos foram ligeiramente inferiores ao período seco, alcançando $-17.402 \text{ m}^3/\text{s}$ em URU2 e $-8.239 \text{ m}^3/\text{s}$ em URU1.

Ainda que tenham ocorridos problemas técnicos e logísticos nas medições de vazão dos pontos GUR (medição apenas da fase da maré vazante) e ARA2 (medição apenas da fase da maré enchente), no período chuvoso, foi possível perceber o mesmo padrão espacial obtido no período seco. Em termos de grandeza, o IGN apresentou no período chuvoso uma elevação considerável da sua vazão líquida (Q_{liq}), a qual foi 18,9 vezes superior em relação à Q_{liq} do período seco, resultando em $890 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste caso, ressalta-se a Q_{liq} positiva obtida, indicando que, no período chuvoso, o Canal IGN atuou como saída do volume de água oriundo do rio Araguari, inversamente ao que ocorreu no período seco. O ponto ARA1 registrou Q_{liq} de $3.136 \text{ m}^3/\text{s}$ e manteve valores positivos de vazão durante todo o ciclo, mesmo sob a influência da maré. Essa Q_{liq} de ARA1 foi 20 vezes superior à encontrada no período seco. Já o URU2 registrou, no período chuvoso, a maior Q_{liq} de $3.687 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto o URU1 atingiu a mesma ordem de $3.164 \text{ m}^3/\text{s}$. Comparando ao período seco, a Q_{liq} de URU2 e URU1 foram, respectivamente, 6,7 e 4,1 vezes maiores no período chuvoso.

Os resultados mostraram um aumento progressivo da vazão. No Canal Urucurituba, o período seco mostrou uma variação notável da vazão líquida (Q_{liq}) em relação ao período chuvoso ($767 \text{ m}^3/\text{s}$ para $3.164 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figura 3). Entretanto, essa variação é ainda maior se comparada ao trabalho anterior de Santos et al. (2018). A Q_{liq} encontrada por esses autores, na mesma seção correspondente ao ponto URU1, foi de $897 \text{ m}^3/\text{s}$ em março/2015 (Figura 4). Dessa forma, a Q_{liq} obtida neste trabalho, em maio/2018, foi 253% superior à Q_{liq} de 3 anos atrás. Embora em escala menor, também houve um considerável aumento de 61% entre os dois períodos secos medidos (Figura 4).

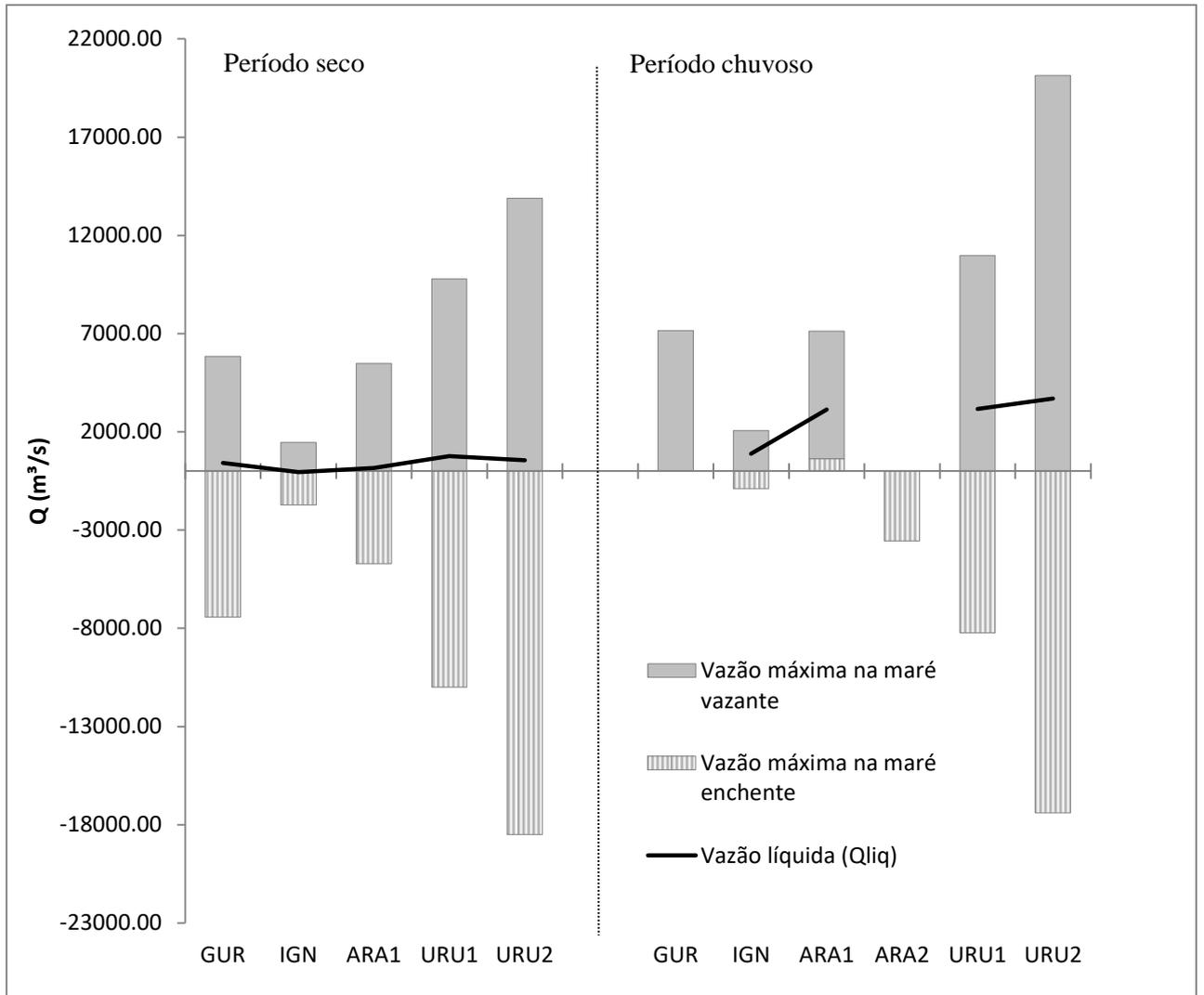


Figura 3 – Variações espaciais da vazão instantânea máxima na maré vazante (barras superiores), vazão instantânea máxima na maré enchente (barras inferiores) e vazão líquida (linhas), durante os períodos seco e chuvoso.

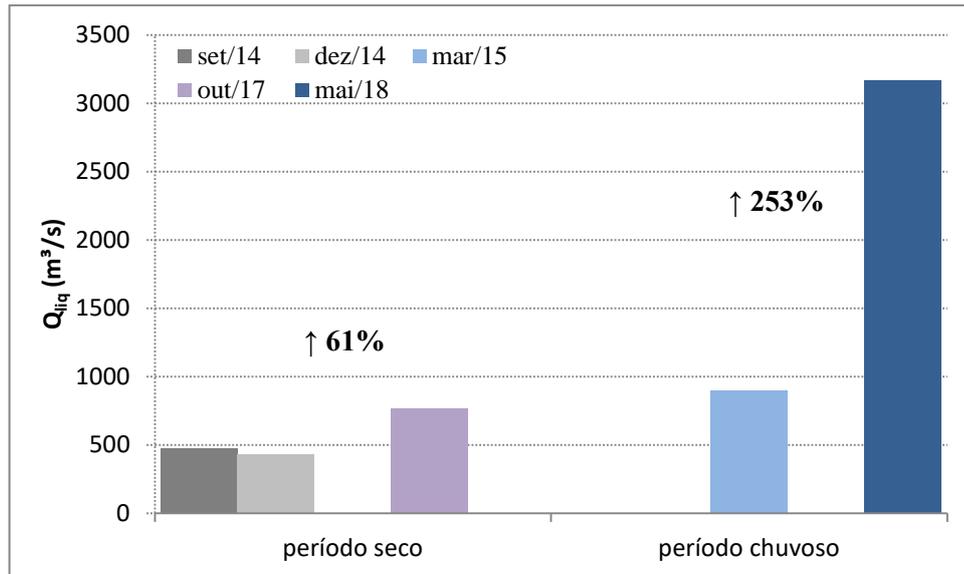


Figura 4 - Variação sazonal da vazão líquida (Q_{liq}) no Canal Urucurituba (URU 1) em diferentes anos. As vazões referentes aos períodos Set/2014, Dez/2014 e Mar/2015 foram medições realizadas por Santos et al. (2018). As vazões dos períodos Out/2017 e Mai/2018 foram medições deste trabalho.

Em termos de balanço de massa (Figura 5), foi identificado que, pela diferença de vazão entre os pontos URU1 e URU2, parte dessa vazão foi desviada para os demais canais existentes ao longo do Canal Urucurituba (ramificações). Um desses canais, em especial o da margem direita do Urucurituba, é conectado ao IGN (Figura 1), que pode ter recebido mais esse aporte líquido por meio dessa conexão. Isso pode explicar a Q_{liq} negativa identificada na seção IGN neste período. Já no período chuvoso, a seção IGN atuou como saída do volume hídrico do rio Araguari, desviando 28% do seu fluxo para o rio Amazonas. Portanto, pode-se dizer que o Canal Urucurituba capturou 100% do fluxo do rio Araguari no período seco e 72% do seu fluxo no período chuvoso (Figura 5). Contudo, devido ao bloqueio da foz do rio Araguari (ao norte do ponto D3), esse volume tende a se espalhar para as regiões lacustres e a um afluente (Igarapé Tabaco) em direção ao norte, no Lago Piratuba, gerando mudanças drásticas da qualidade da água (Cunha e Sternberg 2018).

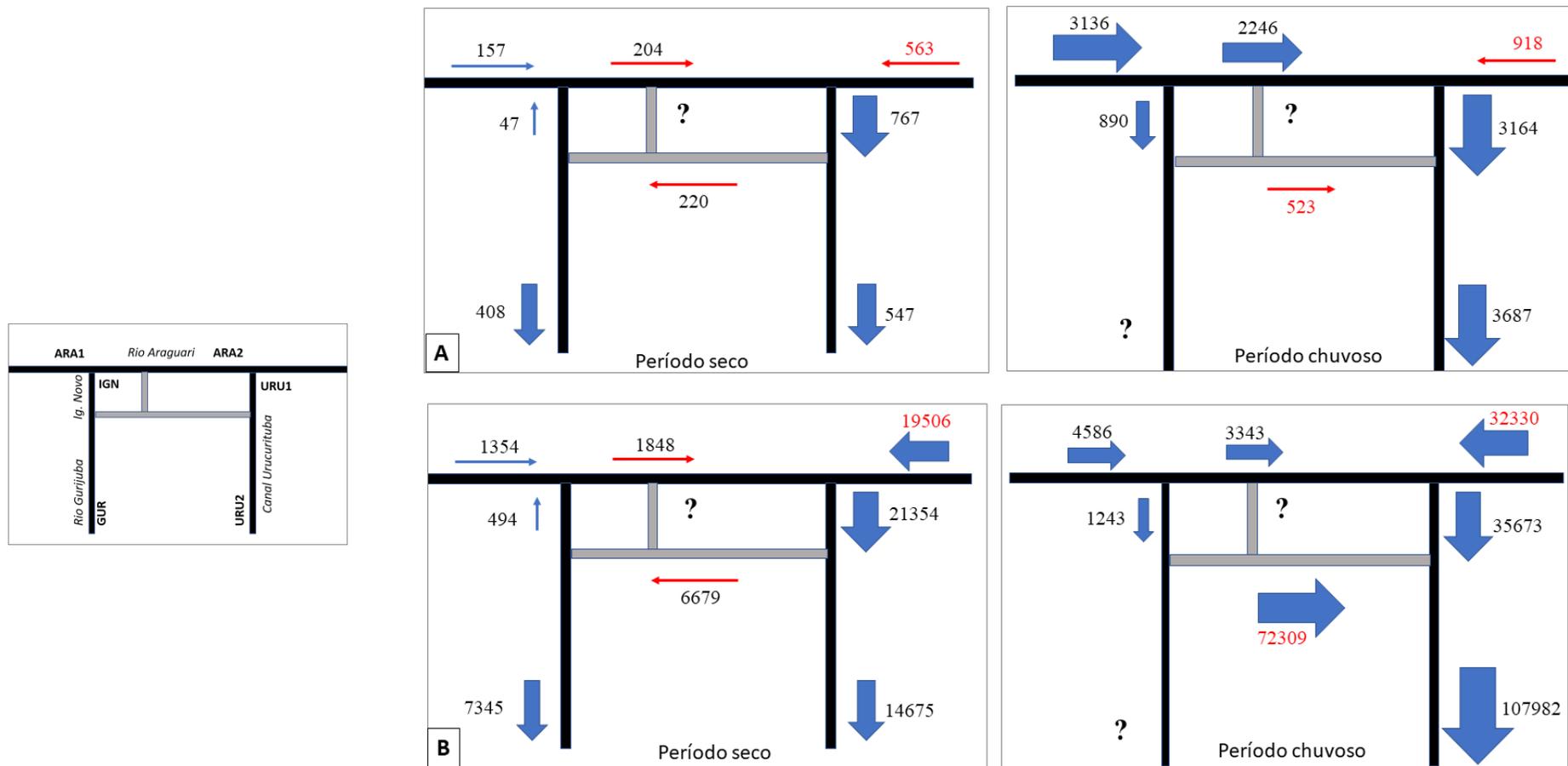


Figura 5 - Balanço de massa líquido (A) e sólido (B) entre os rios Araguari e Amazonas. Os valores indicados por setas vermelhas foram estimados (não medidos) com base no balanço de massa realizado com as demais Q_{liq} e Q_{SS} medidas. As setas indicam o sentido do fluxo: jusante (\rightarrow, \downarrow) e montante (\leftarrow, \uparrow). Valores de Q_{liq} em m^3/s e Q_{SS} em ton/dia.

4.2 Concentração de Sólidos Suspensos (SS) e Descarga Sólida em Suspensão (Q_{SS})

No período seco, as concentrações de sólidos suspensos (SS) na superfície foram significativamente maiores do que aquelas do período chuvoso ($p < 0,05$) (Figura 6 e Tabela 2). Neste caso, ocorreram valores (medianas) extremamente altos nas seções URU1 (336 mg/L) e URU2 (284 mg/L), valores moderados em GUR (202 mg/L), porém baixos valores em IGN (120 mg/L) e ARA1 (93 mg/L).

No período chuvoso, os valores de SS permaneceram extremamente altos em URU2 (306 mg/L), moderado em URU1 (114 mg/L), baixo em ARA2 (86 mg/L) e extremamente baixos em IGN e ARA1 (ambos com 14 mg/L) (Figura 6).

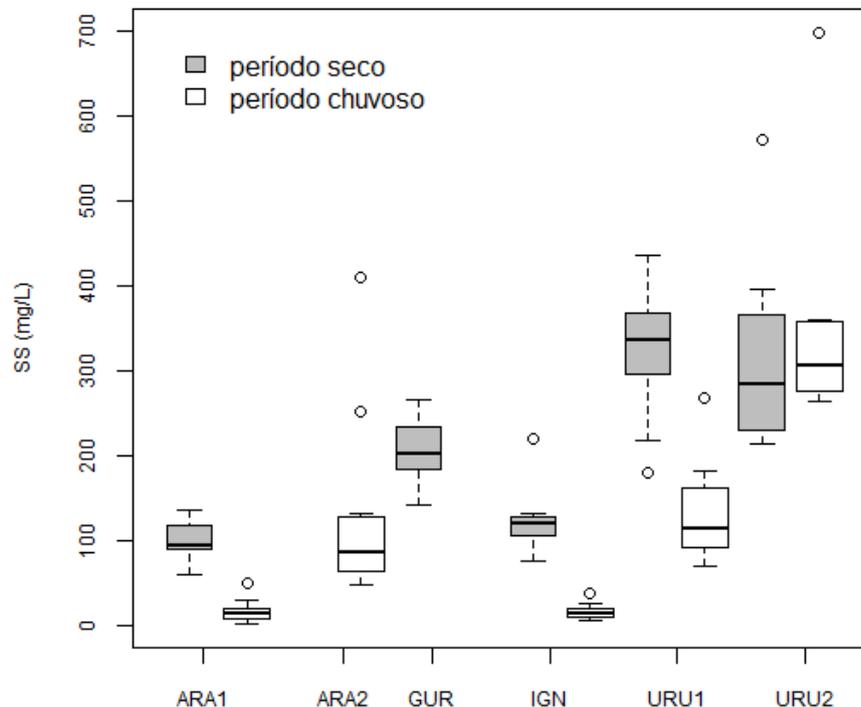


Figura 6 - Boxplot da variação espaço-sazonal de Sólidos Suspensos (SS) ($p < 0,05$). As caixas indicam o intervalo interquartil, onde 50% da amostra está concentrada. As barras superiores e inferiores mostram, respectivamente, os valores máximos e mínimos. O traço no interior das caixas aponta a mediana e os círculos vazios são os *outliers*.

A Figura 7 mostra o comportamento da Q_{SS} dos rios/canais GUR, IGN, ARA1, URU1 e URU2 nos períodos sazonais.

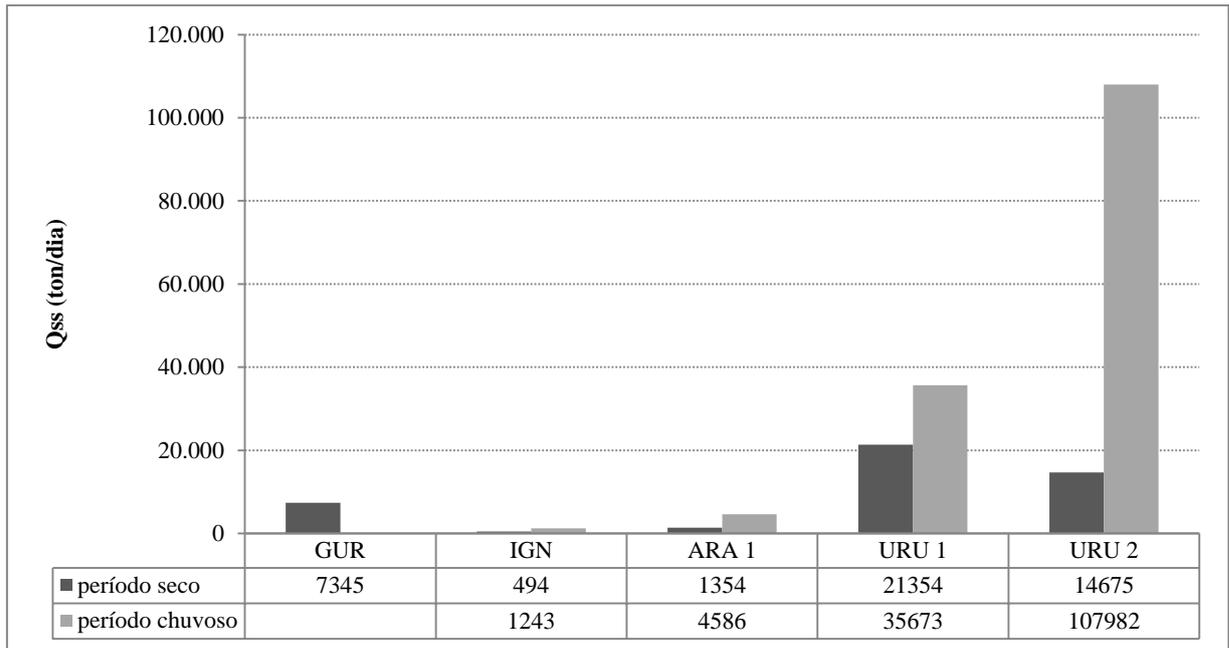


Figura 7 - Comparação da descarga sólida em suspensão (Q_{ss}) em diferentes períodos sazonais.

Já a Q_{SS} variou proporcionalmente em relação à distribuição espacial obtida na Q_{liq} para ambos os períodos sazonais. No período seco, o ponto URU1 (confluência com rio Araguari) apresentou a maior $Q_{SS} = 21.352$ ton/dia e o ponto URU2 (foz) apresentou a segunda maior, com $Q_{SS} = 14.675$ ton/dia. A foz do rio Gurijuba (GUR) registrou descarga sólida inferior ao ponto URU2 com $Q_{SS} = 7.345$ ton/dia. No ponto referente ao rio Araguari (ARA1), a vazão sólida obteve $Q_{SS} = 1.354$ ton/dia, enquanto o canal a jusante (IGN) registrou $Q_{SS} = 494$ ton/dia no sentido montante, ou seja, transportando sólidos para o rio Araguari.

No período chuvoso, a foz do Urucurituba (URU2) registrou uma altíssima descarga sólida com $Q_{SS} = 107.982$ ton/dia. Ainda que a descarga líquida do URU1 também tenha sido elevada neste período chuvoso, a proporção de sólidos suspensos foi menor, resultando em uma descarga sólida $Q_{SS} = 35.673$ ton/dia. Já no sentido a montante do rio Araguari, o ponto ARA1 registrou $Q_{SS} = 4.586$ ton/dia e o canal IGN valor de $Q_{SS} = 1.243$ ton/dia. Os pontos GUR no período seco e ARA2 não puderam ser calculados devido à incompletude da curva de vazão durante este período (Figura 3).

O balanço de massa de transporte dos sólidos suspensos calculado entre os principais pontos de entrada e saída na área de estudo (Figura 5) indicaram que o Canal Urucurituba é o principal meio de transporte de sólidos suspensos erodidos do rio Amazonas, transportando

altas cargas entre a foz do rio Araguari e a região do arquipélago do Bailique, além dos canais adjacentes como o Igarapé Novo-Gurijuba.

Como mostrado na Figura 5B, no período seco, o IGN exportou sedimentos suspensos para o rio Araguari. Além disso, o balanço de entrada e saída entre URU1 e URU2 mostrou que houve um acúmulo de sedimentos na planície de inundação de cerca de 6.679 ton/dia. Esses sedimentos podem ter sido depositados e/ou transportados para os outros canais conectados ao Urucurituba. O maior desses canais também se conecta ao Canal Igarapé Novo – Gurijuba, indicando outro percurso de transporte desses sedimentos na planície (Figura 1). Já o balanço de descarga sólida entre o rio Araguari e o Urucurituba mostrou que a contribuição de carga sólida a montante do rio (ARA1) chega a ser inexpressiva se comparada à carga que é transportada para jusante (sentido foz). A diferença entre a Q_{SS} de URU1 e a montante do rio Araguari (ARA1+ IGN) resultou em uma diferença de 19.506 ton/dia. Tendo em vista que, atualmente, as principais fontes de alimentação hídrica e sólida da foz do rio Araguari são o Urucurituba e o Igarapé Tabaco (o canal mais ao norte da Figura 1), isto significa que um valor superior a esta Q_{SS} foi transportado em direção à foz do rio, devendo uma parte ter sido depositada nos locais de menor velocidade da corrente e o restante ter retornado para o Canal Urucurituba durante os refluxos das marés. No período chuvoso, essa Q_{SS} foi 1,6 vezes maior, chegando a 32.330 ton/dia.

Embora a carga suspensa fique mais concentrada no período seco, é no período chuvoso, com o aumento da descarga fluvial, que seu transporte é intensificado (Figura 7), especialmente, na foz do Canal Urucurituba (URU2) que manteve altíssimas cargas suspensas mesmo neste período (Figura 6). De forma inversa ao período seco, o balanço mostrou que, entre os pontos URU1 e URU2, houve maior incremento no transporte de sólidos suspensos no período chuvoso neste trecho na ordem 72.309 ton/dia (Figura 5). Esse incremento pode ter ocorrido em função de processos erosivos ao longo dos canais e do canal principal, maior remobilização de sedimentos e carreamento de sólidos estocados nos campos inundáveis.

4.3 Variação espaço–sazonal dos parâmetros físico–químicos de qualidade da água

O teste não-paramétrico de Wilcoxon detectou diferenças significativas entre os períodos sazonais para todos os 11 parâmetros físico-químicos analisados (Tabelas 2 e 3). Estes resultados indicam forte variação sazonal desses parâmetros e a importância da hidrodinâmica nos processos erosivos na região e seus impactos na qualidade da água.

As Tabelas 2 e 3 mostram que as diferenças espaço-sazonais foram significativas e indicadas por maiores valores para todos os parâmetros no período seco. O destaque é observado para aqueles relacionados ao incremento de sólidos nos ecossistemas aquáticos lóticos: Condutividade Elétrica, STD, Turbidez, SS e Transparência (Secchi, com menor transparência).

Entretanto, considerando o fator espacial, cabem algumas observações (Tabela 3). A condutividade elétrica e STD, por exemplo, registraram uma significativa variação entre os períodos para todos os pontos, sendo relativamente bem menor em ARA1. A turbidez também seguiu essa mesma tendência de variação. Mas no ponto URU2 ocorreu uma menor variação, com elevados níveis nos dois períodos, sendo 328,3 (NTU) no período seco e 313,4 (NTU) no período chuvoso. Situação similar foi registrada para os parâmetros relacionados (SS e Transparência) no ponto URU2.

A salinidade também se apresentou maior nos pontos URU1 e URU2, com maior amplitude ou variação entre os períodos sazonais do que espacial. A maior concentração média de sal encontrada foi de 0,05 ppt em URU2 e 0,04 ppt em URU1 no período seco.

O OD e pH apresentaram concentrações muito baixas no período chuvoso (Tabela 2 e Tabela 3). Contudo, em geral, o OD se manteve em uma média acima de 5mg/L, conforme limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil 2005). Entretanto, no período chuvoso, houve alguns pontos críticos com médias inferiores a esse limite (5 mg/L) ou muito próximas a ele. O Canal Urucurituba apresentou os valores inferiores mais críticos, atingindo até OD = 3,7 mg/L na sua foz (URU 2) e OD = 4,6 mg/L próximo à confluência com o rio Araguari (URU 1) no período chuvoso. Já na foz do rio Gurijuba (GUR) o OD apresentou concentração média no limite com OD = 5,0 mg/L no período seco e o rio Araguari logo à montante do Urucurituba (ARA 2) obteve média OD = 5,1 mg/L no período chuvoso.

Tabela 2 - Testes não paramétricos de Wilcoxon para a hipótese de variação sazonal e variação durante o ciclo de maré semidiurna.

Parâmetro	Variação Sazonal		Wilcoxon test	Variação durante o Ciclo da maré		Wilcoxon test
	Outubro/2017 Período seco (Média/DP)	Mai/2018 Período chuvoso (Média/DP)	<i>p</i> -valor	Maré Enchente (Média ± DP)	Maré Vazante (Média ± DP)	<i>p</i> -valor
Temperatura do ar (°C)	29.82 ± 1.73	27.07 ± 1.60	<i>p</i> <0.05***	29.49 ± 1.75	27.82 ± 2.14	<i>p</i> < 0.05***
Temperatura da água (°C)	29.83 ± 0.47	27.16 ± 0.68	<i>p</i> <0.05***	29.12 ± 1.21	28.11 ± 1.47	<i>p</i> < 0.05***
Condutividade (µS/cm)	64.33 ± 41.67	24.30 ± 16.20	<i>p</i> <0.05***	53.58 ± 38.95	38.60 ± 35.22	<i>p</i> < 0.05*
Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	31.16 ± 19.46	12.08 ± 8.09	<i>p</i> <0.05***	26.17 ± 18.37	18.82 ± 16.65	<i>p</i> < 0.05**
Salinidade (%)	0.03 ± 0.02	0.01 ± 0.01	<i>p</i> <0.05***	0.02 ± 0.02	0.02 ± 0.02	<i>p</i> < 0.05*
Turbidez (NTU)	227.73 ± 109.44	115.66 ± 111.38	<i>p</i> <0.05***	197.30 ± 113.48	156.83 ± 127.15	<i>p</i> < 0.05*
pH	6.46 ± 0.29	5.24 ± 0.33	<i>p</i> <0.05***	6.12 ± 0.58	5.69 ± 0.69	<i>p</i> < 0.05***
OD (mg/L)	5.89 ± 0.78	5.33 ± 1.23	<i>p</i> <0.05*	5.55 ± 1.08	5.63 ± 1.07	0.4644 (NS)
OD (%)	84.08 ± 6.77	63.60 ± 16.76	<i>p</i> <0.05***	73.25 ± 18.38	69.97 ± 16.41	0.3455 (NS)
SS (mg/L)	213.91 ± 109.82	127.13 ± 136.18	<i>p</i> <0.05***	186.35 ± 103.44	160.42 ± 143.46	0.07399 (NS)
Secchi Profundidade (cm)	15.08 ± 7.21	40.19 ± 27.66	<i>p</i> <0.05***	18.88 ± 12.43	33.87 ± 27.54	<i>p</i> < 0.05*

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1, NS = Não Significativo

Tabela 3 - Variação espaço-sazonal dos parâmetros de qualidade da água nos rios e canais estudados. Os valores se referem à média e desvio padrão.

Parâmetros/Pontos	GUR		IGN		ARA 1		ARA 2		URU 1		URU 2	
	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
Temperatura do ar (°C)	29.5 ± 1.2	-	30.1 ± 2.4	26.9 ± 1.9	30.0 ± 1.6	26.3 ± 1.2	-	27.3 ± 1.3	29.8 ± 2.1	27.7 ± 2.0	29.7 ± 1.3	27.6 ± 1.1
Temperatura da água (°C)	29.7 ± 0.2	-	29.9 ± 0.8	26.8 ± 0.4	30.1 ± 0.4	26.6 ± 0.2	-	27.3 ± 0.3	29.8 ± 0.3	27.5 ± 1.0	29.7 ± 0.3	27.7 ± 0.5
Condutividade Elétrica (µS/cm)	67.7 ± 12.5	-	23.5 ± 8.8	5.8 ± 2.8	16.2 ± 2.8	16.3 ± 0.7	-	29.5 ± 6.5	87.8 ± 18.6	24.6 ± 8.2	122.8 ± 9.2	48.5 ± 13.6
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	33.6 ± 6.7	-	11.8 ± 4.3	2.9 ± 1.6	8.1 ± 1.4	7.9 ± 0.3	-	14.2 ± 3.0	44.0 ± 9.5	12.4 ± 4.0	56.5 ± 4.3	24.4 ± 6.6
Salinidade	0.03 ± 0.01	-	0.01 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.01 ± 0.0	0.01 ± 0.0	-	0.01 ± 0.0	0.04 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.05 ± 0.0	0.02 ± 0.01
Turbidez (NTU)	243.6 ± 13.6	-	120 ± 28.6	23.5 ± 6.4	90.5 ± 14.7	18.2 ± 3.5	-	105.0 ± 45.0	345.7 ± 45.5	93.2 ± 27.6	328.3 ± 43.5	313.4 ± 49.5
pH	6.4 ± 0.3	-	6.4 ± 0.1	4.9 ± 0.1	6.4 ± 0.1	4.9 ± 0.1	-	5.4 ± 0.2	6.7 ± 0.5	5.3 ± 0.2	6.4 ± 0.2	5.7 ± 0.1
OD (mg/L)	5.0 ± 0.5	-	6.0 ± 0.3	6.9 ± 0.2	6.8 ± 0.3	6.3 ± 0.5	-	5.1 ± 0.5	5.7 ± 0.4	4.6 ± 0.6	6.1 ± 0.9	3.7 ± 0.5
OD (%)	-	-	79.2 ± 4.4	85.8 ± 2.2	89.3 ± 4.6	-	-	-	58.6 ± 8.4	-	-	46.9 ± 6.2
SS (mg/L)	208.0 ± 34.3	-	121.4 ± 33.7	16.2 ± 8.7	99.3 ± 20.4	16.9 ± 12.8	-	126.7 ± 110.1	321.8 ± 72.7	130.5 ± 56.2	310.2 ± 101.2	338.9 ± 113.8
Transparência (Secchi) (cm)	10.9 ± 0.9	-	21.4 ± 3.2	72.1 ± 9.6	24.5 ± 3.5	72.7 ± 11.3	-	22.8 ± 5.1	8.0 ± 1.3	24.6 ± 3.5	9.6 ± 1.1	9.9 ± 2.2

O pH indicou água levemente ácida no período chuvoso, considerando que o intervalo aceitável para este parâmetro é $6,0 < \text{pH} < 9,0$ para rios de classe II (Brasil 2005). Todos os pontos registraram pH inferior a 6,0 nesse período, sendo o menor valor encontrado no rio Araguari (ARA1) e Igarapé Novo (IGN), ambos com média 4,9, medianamente ácida.

A variação espacial da qualidade da água entre os diferentes sítios de coleta foi significativa (Tabela 4). Entretanto, houve exceções também para T_{water} e T_{ar} , as quais tendem a ser mais homogêneas em todos os locais (Cunha e Sternberg 2018). A homogeneidade pode ter sido causada principalmente pela relativa proximidade entre os pontos amostrais (Tabela 1), sugerindo certa homogeneidade térmica. Isto é, aparentemente, o gradiente físico distância não é capaz, isoladamente, de causar diferenças espaciais significativas.

Tabela 4 - Teste não-paramétrico de Kruskal–Wallis para comparar diferenças entre os sítios amostrais, independentemente do período sazonal.

Parâmetro	Kruskal – Wallis test (p-valor)
Temperatura da água (°C)	0.23 (NS)
Temperatura do ar (°C)	0.46 (NS)
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	< 0.01 ***
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	< 0.01 ***
Salinidade	< 0.01 ***
Turbidez (NTU)	< 0.01 ***
pH	0,003 **
OD (mg/L)	< 0.01 ***
OD (%)	< 0.01 ***
SS (mg/L)	< 0.01 ***
Transparência (Secchi) (cm)	< 0.01 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1, NS = Não Significativo

4.4 Variação dos parâmetros físico–químicos durante o ciclo de maré

A maioria dos parâmetros físico–químicos analisados apresentaram diferença significativa durante os ciclos de marés. As exceções foram o OD (mg/L) e OD (%) e SS ($p > 0,05$) (Tabela 2). Neste caso, os demais parâmetros mostraram valores mais elevados durante a fase do ciclo de maré de enchente, sendo novamente destacadas a Condutividade Elétrica, STD, Turbidez e a Transparência (Secchi).

4.5 Avaliação de variáveis explicativas de $Q_{SS_{total}}$, $Q_{SS_{inst}}$ e SS

Foram selecionadas 3 regressões lineares múltiplas para explicar as variáveis dependentes ($Q_{SS_{total}}$, $Q_{SS_{inst}}$ e SS) em função de um conjunto de variáveis independentes (X_i) que se referem a parâmetros de localização, hidrodinâmicos e de qualidade da água (Tabela 5). O primeiro modelo Y_1 $Q_{SS_{total}}$ ($R^2_{aj} \approx 1$, $p < 0,01$) resultou em variáveis significativas relacionadas a parâmetros de localização, apresentando uma relação negativa com a distância ao rio Araguari e rio Amazonas e positiva em relação à distância da costa (ver coeficientes das equações nas colunas 2,3 e 4 da Tabela 5). Os parâmetros hidrodinâmicos significativos (X_i), indicados nas respectivas colunas, foram a vazão média na maré vazante, vazão média na maré enchente, vazão máxima, vazão média, vazão mínima, vazão instantânea e a velocidade instantânea. Todos esses parâmetros, exceto a vazão média, apresentaram relação positiva com a $Q_{SS_{total}}$. A temperatura do ar também explicou a variação da $Q_{SS_{total}}$ com uma relação negativa (ver coeficientes das equações na Tabela 5).

Já a variação de Y_2 $Q_{SS_{inst}}$ ($R^2_{aj} 0,20$, $p < 0,01$), foi explicada por parâmetros de qualidade da água (X_i). Os parâmetros significativos foram a temperatura da água, pH, STD, T_{ar} e Turbidez. A T_{water} e Turbidez mostraram relação positiva, enquanto o pH, STD e T_{ar} mostraram relação negativa (ver coeficientes das equações na Tabela 5).

O modelo que explicou a variação de SS (Y_3), mostrou relação positiva com a $Q_{média}$, $Q_{instantânea}$, $Vel_{instantânea}$, T_{water} , Turbidez e uma relação negativa com o STD ($R^2_{aj} 0,88$, $p < 0,01$). Como esperado, os parâmetros hidrodinâmicos foram os que mais apresentaram influência nos modelos estatísticos (Regressões Múltiplas), explicando a variação de $Q_{SS_{Total}}$. Considerando que esta variável ocorre em função da vazão líquida (diferença do que entra e o que sai de volume de água em um ciclo de maré) e a concentração média de SS, é de se esperar que as vazões e velocidades do fluxo se mostrem de forma significativa para este parâmetro, especialmente em uma relação positiva. Já as distâncias dos principais rios (Amazonas e Araguari) (Figura 1) mostraram um efeito inverso, indicando que a influência do rio Amazonas não ocorre somente nos pontos mais próximos deste rio, mas também em ambos os extremos e próximos ao rio Araguari.

Embora $Q_{SS_{inst}}$ tenha apresentado um modelo estatístico (Tabela 5) com menor fator de explicação, algumas variáveis apresentaram coeficientes significativos, especialmente em relação a parâmetros da qualidade da água. Analisando de forma comparativa ao modelo de variação da carga suspensa (SS), em Y_3 (Tabela 5), a temperatura da água mostrou relação

Tabela 5 - ARM explica as variações de descarga sólida e SS com os parâmetros de localização, hidrodinâmicos e de qualidade da água

Variáveis Independentes (X _i)	Equações $Y_i = a_i + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$			
	Coeficiente Angular "b _{ij} " de (Y _i)*			Coeficientes Estatísticos Significativos*
	QSS _{total} Y ₁	QSS _{ints} Y ₂	SS Y ₃	
Intercepto	7.06e ⁺⁰⁶	-319222.4	-347.29	A variação de QSS_{total} (coluna de Y ₁) apresentou alta significância (p < 0,01) e 2coeficiente de determinação ajustado $R^2_{aj} = 1$ (Erro Padrão Residual = 0.0000000126, GL = 104 n = 105 observações, F-estatístico = : 8.809e+25, GL = 9 e 104, p < 0.01, em relação às variáveis independentes (coluna Xi).
Distância ao Amazonas	-1.24e ⁺⁰⁵			
Distância ao Araguari	-1.09e ⁺⁰⁵			
Distância_ costa	1.06e ⁺⁰⁴			
Qmédia_ maré_vazante	5.31e ⁺⁰¹			
Qmédia_ maré_enchente	7.68e ⁺⁰¹		-0.0291	
Qmáxima	3.33e ⁺⁰¹			
Q média	-1.60e ⁺⁰²		0.0274	A variação de QSS_{inst} (coluna de Y ₂) apresentou significância (p < 0,01) e $R^2_{aj} = 0.20$ (Erro Padrão Residual = 168900 GL = 115, n = 116 observações, F-estatístico = 6.133, GL = 6 e 115, p = <0,01, em relação às variáveis independentes destacadas (Xi).
Q mínima	1.80e ⁺⁰¹			
Qinst			0.0013	
V_instantânea		90286.0	30.8392	A variação de SS (coluna de Y ₃) apresentou alta significância (p < 0,01) e coeficiente de determinação ajustado $R^2_{aj} = 0.88$ (Erro Padrão Residual = 43.79, GL = 98, n = 99 observações, F-estatístico = 93.78, GL = 9 e 98, p = <0,01, em relação às variáveis independentes destacadas (Xi). (coluna Xi).
T water		69913.1	16.4165	
pH		-133020.0	-25.5832	
STD		-4213.6	-10.0750	
Tar	-1.486e ⁻⁰⁹	-35233.9		
Turbidez		998.2	1.1453	
EC			4.4619	

positiva com ambas as variáveis, indicando que, quanto maior a temperatura da água (clima mais seco e influência hidrológica), há um aumento na Q_{SSinst} e na concentração de SS (clima mais chuvoso mas com influência do uso do solo). De forma contrária ocorreu com a temperatura do ar, cuja relação foi positiva para ambos os modelos. As vazões médias e instantâneas também foram significativas e relacionadas positivamente com SS, igualmente à $Q_{SStotal}$.

5. Discussão

5.1 Descarga líquida

Entre os dois principais canais que fazem conexão do rio Amazonas ao rio Araguari, foi identificado que o Canal Urucurituba é o que tem maior potencial de continuar causando alterações no estuário do rio Araguari. As vazões líquidas nos dois pontos do canal (URU1 e URU2) foram as maiores registradas nos dois períodos sazonais investigados. Além disso, as velocidades da corrente neste canal também foram as maiores, especialmente em URU1, alcançando velocidade média de 1,008 m/s durante a maré vazante e 0,674 m/s na maré enchente (Figura 2). O fator velocidade e profundidade são diretamente proporcionais à maior suscetibilidade à erosão (Novo 2008). Neste caso, o canal Urucurituba, nas duas seções investigadas, apresentam tanto velocidade quanto profundidade expressivas, em torno de 28 metros em quase toda a extensão de URU1 e 24 m em URU2. Essas variáveis hidrodinâmicas, juntamente aos demais fatores antrópicos e geomorfológicos, apontam o grande potencial erosivo ao longo deste canal.

Outro fator que corrobora o potencial erosivo do canal pode ser mostrado pelo aumento da vazão líquida no ponto URU1 de 61% no período seco e 253% no período chuvoso (Figura 4). Isto pode ter ocorrido devido à variação entres os meses coletados, uma vez que o mês de maio corresponde historicamente ao mês de maiores descargas líquidas do rio Araguari registradas na estação de Porto Platon (Agência Nacional de Águas 2019). Faz-se prudente também considerar a variação interanual de fatores climáticos e seus reflexos nas mudanças geomorfológicas e hidrológicas de bacias hidrográficas (Moura et al. 2019, Xu e Li 2019). Por exemplo, o ano 2015 foi marcado pela ocorrência do evento climático El niño em intensidade fraca, enquanto 2017/ 2018 coincidiu com uma intensidade fraca/moderada de La Niña. Na região Norte do Brasil, em geral, o El niño causa redução da pluviosidade, enquanto o La Niña a eleva consideravelmente (CPTEC 2019). No alto curso da bacia do rio Araguari,

tem sido observado aumento nas ocorrências de eventos extremos de chuva-vazão, como o último registrado de 4.036 m³/s em 2011, ano de evento La niña (Cunha et al. 2014).

No baixo curso do rio Araguari são poucos os dados hidrodinâmicos disponíveis. O último dado publicado mostrou que, a 60 km da foz do rio, ligeiramente à jusante da confluência com o Igarapé Tabaco, a vazão média em junho de 2011 foi 2.540 m³/s (período chuvoso) e em dezembro de 2011 (período seco) chegou a 316 m³/s (Santos 2012). Entretanto, a partir da conexão total com o Canal Urucurituba, a vazão do rio Araguari neste trecho reduziu significativamente mudando as características naturais de direção do seu fluxo. Em Junho de 2013 (período chuvoso), a vazão reduziu para 34 m³/s e em setembro de 2013 (período seco) registrou vazão negativa de - 212 m³/s, indicando a inversão da direção do fluxo a partir da maior influência da maré a montante (Santos et al. 2018).

A principal implicação da redução da vazão do rio devido a captura pelo Canal Urucurituba foi o completo assoreamento de sua foz. Este assoreamento já vinha sendo registrado há alguns anos, ora apontado como resultado da implantação da UHE Coaracy Nunes – primeira hidrelétrica da Amazônia, em funcionamento desde 1976 -, ora pelo escoamento de sedimentos provenientes da região dos lagos que desaguam no curso inferior do rio Araguari (Santos 2006). Além da UHE Coaracy Nunes, o rio Araguari comporta mais 2 hidrelétricas em seu médio curso, a UHE Ferreira Gomes e UHE Cachoeira Caldeirão. Embora essas duas hidrelétricas não estivessem em funcionamento quando ocorreram tais mudanças geomorfológicas no baixo rio Araguari, o impacto na vazão a jusante da barragem deve ser agora atenciosamente considerado. Considerando que a flutuação natural das vazões aumenta a diversidade de habitats e mantém a biodiversidade, o controle e alterações desses padrões hidrológicos desestabilizam as comunidades biológicas (Souza-Cruz-Buenaga et al. 2019). Neste sentido, é importante a determinação da “vazão ecológica” (Cunha 2013), a qual irá assegurar a continuidade das funções ecossistêmicas aquáticas. O impacto na pesca, por exemplo, é uma das imediatas interferências percebidas que afetam as comunidades dependentes dessa atividade e que são sentidas pelos moradores do baixo rio Araguari, como a redução na disponibilidade de peixes e a intrusão de espécies salinas (Lopes 2015).

Diante da atual conjuntura morfológica entre a bacia do rio Araguari e o rio Amazonas (Santos et al. 2018), o balanço de massa líquido calculado entre os canais (Figura 5) mostrou a complexidade hidrológica e hidrossedimentar da presente região em estudo. A evolução acelerada do Canal Urucurituba não resultou somente na abertura de um canal de escoamento principal, mas também induziu, com seu alto poder erosivo, a ramificação descontrolada de outros numerosos canais que se tornaram seus afluentes. Entre esses canais, há um que se

destaca, ao fazer conexão com o canal adjacente estudado Canal Igarapé Novo – Gurijuba (GUR e IGN) com, pelo menos, mais uma conexão por outro canal ao rio Araguari (Figura 1). Todos esses canais interconectados mostram uma dinâmica complexa de fluxos de que interagem e se distribuem na planície. Esta complexidade se intensifica com o regime de marés semidiurnas (Gallo e Vinzon 2015) e aumenta, mesmo no período seco, a conectividade dos campos inundáveis ao sistema principal, determinando uma nova dinâmica ecológica na região (Gagne-Maynard et al. 2017, Cunha e Sternberg 2018).

Dessa forma, a hidrodinâmica desses canais depende de inúmeras variáveis hidrológicas, climáticas e, como mostrado, de suas variações sazonais (Figura 3). Santos et al. (2018) identificaram que, no período chuvoso, em março de 2015, o Canal Urucurituba desviava 97% do fluxo do rio Araguari. Contudo, não haviam considerado a influência do Canal Igarapé Novo - Gurijuba adjacente que, como mostrado, também drena volume considerável de água, equivalente a 28% do fluxo do rio Araguari no período chuvoso.

Mudanças geomorfológicas que resultam em desvios de cursos de rios podem ocorrer de formas naturais ou induzidas com impactos comuns associados. Pode-se citar o controle realizado no rio Mississippi com a criação de desvios para induzir maior produção e transporte de cargas de sedimentos ao seu delta, minimizando efeitos das enchentes e visando a restauração do equilíbrio sedimentar da costa (Kolker et al. 2012). Na região de estudo, a criação de canais são processos recorrentes e muitas vezes ocorrem de forma induzida. A atividade da bubalinocultura induz a criação de canais por meio das trilhas e ravinas formadas pelo pastoreio dos búfalos, além dos próprios fazendeiros que criam pequenos canais para possibilitar a entrada da água para o interior da fazenda. A partir da turbulência do fluxo, com o tempo, esses canais vão aumentando sua extensão e largura, tornando-se verdadeiras redes de drenagem (Santana e Silveira 2005, Santos 2006). Pode-se citar também o Igarapé Tabaco (Figura 1), cuja criação foi induzida para facilitar o transporte de pessoas e escoamento da produção entre a sede do município de Tartarugalzinho e as comunidades do Lago Novo. Entretanto, essa ligação trouxe diversos impactos como a redução do nível da água nos lagos e prejuízos aos pescadores da região (Matos 2009).

Em relação à formação de canais como o Urucurituba, por um lado, há indícios de que esses processos também estejam associados às mudanças do clima e padrões hidrológicos, influenciando o pulso de inundação (sazonal e de marés) e mudanças no padrão de conectividade entre os diferentes corpos d'água da região (Cunha e Sternberg 2018). Por outro lado, os fenômenos climáticos estão aparentemente causando uma sensível elevação do nível do mar. Tais efeitos têm sido corroborados em estudos de isótopos estáveis ^2H e ^{18}O em

relação à evaporação e salinização de lagos ao longo da zona estuarina do Estado do Amapá (Cunha e Sternberg 2018), onde foi demonstrado que processos de evaporação em lagos próximos ao oceano Atlântico apresentaram significativa correlação entre si durante o evento extremo recorde do El Niño de 2015/2016.

O fato é que as consequências ambientais desta nova dinâmica hidrológica são inúmeras. Isto chama a atenção para a necessidade de um monitoramento mais efetivo e controle de fatores que podem vir a agravar processos erosivos e o desenvolvimento de novos canais nessa região. Dada a fragilidade geológica natural da zona costeira estuarina (Rabelo 2006), o pisoteio dos búfalos e a retirada da vegetação de matas ciliares (Trimble 1994, Santos 2006), por exemplo, fragilizam e expõem ainda mais o solo, aumentando o potencial erosivo da região. O Canal Urucurituba, por exemplo, conectou-se ao rio Araguari onde havia uma extensa fazenda que retirava a mata ciliar para dá lugar ao pasto de gado bubalino (Santos et al. 2018).

5.2 Sólidos Suspensos e (SS) e Descarga sólida em suspensão (Q_{SS}): cenário e implicações

A interação entre as bacias hidrográficas do rios Araguari e Amazonas ocasionou mudanças permanentes na hidrologia e na qualidade da água no Baixo rio Araguari. As suas características geológicas distintas, que resultam na águas brancas do rio Amazonas e nas águas claras do rio Araguari (Sioli 1984), têm com principal diferencial físico a carga suspensa carreada por esses rios.

Por ser formado sob as rochas do embasamento cristalino, o rio Araguari não possui alta carga de sedimentos em suspensão (Allison et al. 1996, Bárbara et al. 2010, Brito 2008). Entretanto, os resultados mostraram, em ARA1, uma expressiva descarga sólida suspensa ($Q_{SS} = 1.354$ ton/dia no período seco e 4.586 t/dia no chuvoso), comparado ao estimado por Santos e Cunha (2015) de ~ 575 ton/dia (210.000 ton/ano). As descargas sólidas encontradas sugerem uma maior atuação das correntes de marés de enchente (fase específica da maré) pelos canais que interligam hoje essas bacias, especialmente, pelo Canal Urucurituba.

A maior carga e descarga sólida suspensa constatada no Canal Urucurituba não se dá somente pela alta carga de sedimentos trazidos pelo rio Amazonas, cuja principal fonte provém de processos erosivos dos Andes (Gibbs 1967, Sioli 1984, Filizola e Guyot 2009), mas também pela produção expressiva de sedimentos erodidos do substrato subconsolidado do próprio canal, transportados pelas correntes de maré.

Na seção correspondente ao ponto URU1 neste trabalho (Figura 1), Santos et al. (2018) identificaram uma taxa média de erosão de 5m/mês (60 m/ano). Em 2011, esta seção do canal apresentava somente 55 m de largura, aumentando expressivamente para 321 m em 2016 (Santos et al. 2018). Em um ponto mais próximo ainda da confluência com o rio Araguari, Lopes (2015) mediu 330 m em março de 2015, mesmo ponto que, em maio de 2018, apresentava 450 m de largura.

Considerando que o potencial erosivo aumenta proporcionalmente com a profundidade e velocidade de um rio (Novo 2008), é possível presumir que o Canal Urucurituba pode continuar acentuando seus processos erosivos em função de suas características geomorfológicas. Além de ser o canal com maior profundidade (28 m) na seção transversal medida (URU1) (Figura 2) e 34 m em outros pontos (Santos et al. 2018), esta seção também apresenta a maior velocidade média da corrente entre todos os canais, chegando a 0,889 m/s no período seco e 0,853 m/s no período chuvoso (Figura 2).

Esse contínuo e crescente incremento de sólidos suspensos pode estar contribuindo com o agravamento da sedimentação da foz do rio Araguari a jusante do Canal Urucurituba (Figura 5). Os impactos advindos do assoreamento da foz do rio Araguari são inestimáveis, os quais incluem a perda de serviços ambientais e ecossistêmicos dessa região como a regulação do regime hidrológico, qualidade da água e a manutenção da biodiversidade (Junk et al. 2014). Assegurar tais serviços garante que eles estejam disponíveis para o benefício social e econômico da população (Dias et al. 2016).

Outra perda inestimável foi a pororoca (como conhecida localmente) ou *tidal bore* (em inglês). A pororoca consistia em um fenômeno natural que atraía muitos profissionais de *surf* para a foz do rio Araguari, a qual chegou a sediar campeonatos internacionais (Chagas et al. 2015), o que consequentemente gerava renda para os moradores das comunidades desse trecho e possuía alto valor cultural para a história do Amapá (Lopes 2015). Além de tais aspectos, a pororoca atuava como poderoso remobilizador de sedimentos na região, chegando a 18 km/h em 45 km no interior do estuário, comandando a dinâmica da paisagem e as relações ecológicas estabelecidas ali (Santos 2006).

Por outro lado, também foram identificadas novas zonas de deposição, como na confluência do Canal Urucurituba com o rio Araguari. Neste trecho, estão ocorrendo a formação de barras e ilhas na margem esquerda do rio Araguari, imediatamente a montante da confluência com o Canal Urucurituba. Essas barras, que já possuem vegetação, fazem parte da morfodinâmica e sistema deposicional ao longo do rio, e podem estar se expandido como reflexo de um ajuste do transporte de sedimentos nesse trecho (Wang e Xu 2018), indicando

menores velocidades da corrente a montante do rio Araguari, associadas à alta carga de sedimentos oriundos do Canal Urucurituba.

Outra zona de deposição já bastante conhecida é a estabelecida na foz do rio Gurijuba ($Q_{SS} = 7.345$ ton/dia), a qual continua apresentando intensos processos de acreação em sua foz, especialmente o desenvolvimento de ilhas. Essas ilhas iniciam a partir da formação de bancos lamosos (siltosos a argilosos) que, com o tempo, podem evoluir para ilhas devido à rápida instalação da vegetação nessa zona (Santana e Silveira 2005, Torres et al. 2018).

As mudanças hidrodinâmicas e sedimentares que têm ocorrido nesta região podem estar associadas à intensificação dos eventos erosivos no Arquipélago do Bailique - ilha localizada ao sul do Canal Urucurituba - que está recebendo este expressivo aporte líquido e sólido que, até poucos anos atrás, não existia (Torres et al. 2018). Torres et al. (2018) encontraram, em diversos trechos do Arquipélago do Bailique, um significativo balanço sedimentar negativo (erosão).

5.3 Influência espaço-sazonal dos processos hidrossedimentares na qualidade da água

De acordo com uma das hipóteses da pesquisa, um dos principais fatores que influenciaram a dinâmica da qualidade da água nessa região estuarina foi o efeito da sazonalidade (Tabela 2). O aumento na concentração dos parâmetros relacionados aos sedimentos (SS, Turb, STD e Secchi – sendo inversamente proporcionais) e à intrusão salina (CE e sal), foi também observado por Santos et al. (2014) na região em 2011. Este aumento pode ser atribuído à redução da capacidade de diluição dos rios no período de menor vazão, mas também a fatores como erosão dos rios e canais. No caso da área de estudo ocorre uma combinação de tipologias de erosões naturais, especialmente de sedimentos advindos do rio Amazonas, e antrópicas. Uma das fontes antrópicas é constantemente associada à criação de búfalos no interior da planície, cujo pastoreio aumenta a erosão do solo (Barbara et al. 2010, Brito 2008, Santos et al. 2014, Santos 2006, Trimble 1994) . Nos canais localizados nos interiores das fazendas, a concentração de sólidos suspensos pode chegar a 1.386 mg/L (Silva et al. 2018).

A elevação na concentração de sedimentos podem trazer implicações ecológicas associadas ao aumento da turbidez e redução da concentração de oxigênio, podendo afetar a produtividade primária, os macroinvertebrados bentônicos e a ictiofauna (Wood e Armitage 1997, Brito 2008).

O aumento da salinidade no período seco pode ser atribuído a menor diluição dos rios nesse período (efeito hidrológico de maior volume de água). Os valores de salinidade no período chuvoso (0.01 ppt) (Tabela 2 e Tabela 3) se igualaram aos níveis de sal antes da influência do canal Urucurituba (Santos et al. 2018). Entre 2013 e 2014, a salinidade foi um sério problema na região. Com o contínuo desvio do curso do Araguari pelo Canal Urucurituba, a vazão desse rio reduziu drasticamente, possibilitando uma significativa intrusão salina no estuário, que chegou a ser 174 vezes maior que em 2011 (0.01 para 1.74) (Santos et al. 2018). Devido ao simultâneo assoreamento e bloqueio do escoamento na foz, os valores de salinidade reduziram drasticamente após 2013. O último valor registrado foi de 0.26 ppt em março /2015. Mas em alguns pontos, como os lagos conectados ao Araguari (Lago Piratuba), ao norte da foz, ainda foram registrados nos anos seguintes uma salinidade remanescente em torno de 0.04 a 0.08 ppt (Cunha e Sternberg 2018, Santos et al. 2018).

Em relação ao OD, o padrão sazonal encontrado sugeriu um efeito inverso em relação àquele encontrado por Barbara et al. (2010) em Cutias do Araguari, com menores concentrações na seca (mínimo de 6 mg/L) e maiores na cheia (~8 mg/L) (Tabelas 2 e 3). Entretanto, os níveis de OD se mantiveram acima de 6 mg/L. No baixo Araguari, Santos et al. (2014) encontraram valores baixos de OD no período chuvoso, a jusante da área de estudo. Após a maior influência do Canal Urucurituba, muitos desses valores também se mantiveram baixos em coletas posteriores (Santos et al. 2018). A maior saturação de oxigênio a montante do rio Araguari ocorre, entre outros fatores, devido aos maiores acidentes hidráulicos, cuja turbulência diferenciada favorece as trocas de oxigênio entre a atmosfera e a água (reaeração) (Cunha et al. 2011). No sentido jusante, o rio Araguari e os canais Gurijuba e Urucurituba se desenvolvem em uma planície de inundação, sem muitos acidentes hidráulicos, o que pode reduzir essas taxas de reaeração. Além disso, os ventos alísios incidentes sobre a região também podem afetar essa troca (Cunha et al. 2011, Santos et al. 2014). Por outro lado, com elevada frequência, o rio Amazonas apresenta naturalmente baixos valores de OD (menores que 5mg/L), principalmente devido às altas taxas de respiração provenientes da presença de altas concentrações de matéria orgânica particulada e dissolvida na água (Ward et al. 2013, 2015, 2018, Gagne-Maynard et al. 2017, Sawakuchi et al. 2017). Dessa forma, a redução da concentração de OD pode ser facilmente atribuída à maior e crescente influência do rio Amazonas sobre o rio Araguari.

Essa influência do Canal Urucurituba na qualidade geral da água é clara, por exemplo, a a partir da variação espacial de maiores valores de OD no canal IGN e ARA1 (>6 mg/L nos dois períodos) e menores concentrações nos demais canais (Tabela 3 e Tabela 4). A baixa

concentração de oxigênio também pode estar associada à alta turbidez que reduz a penetração da luz, essencial para a fotossíntese nos corpos aquáticos (Brito 2008). Mas este tipo de resposta em termos de fotossíntese para produção de OD é mais efetiva em lagos (Cunha e Sternberg 2018) do que em ambientes lóticos (Cunha et al. 2011), onde a turbulência tem maior influência nos processos de reaeração atmosférica.

Entretanto, outros fatores como a remobilização do sedimento de fundo e as próprias velocidades do fluxo e condições hidrodinâmicas interferem nas taxas de respiração podendo reduzir as concentrações de oxigênio (Ward et al. 2018). No baixo rio Amazonas, Gagne-Maynard et al. (2017) também encontraram esse padrão sazonal de maiores concentrações de OD no período seco e menores no período chuvoso, pois no período chuvoso há tendência de maior aporte de matéria orgânica da terra para a água. Por outro lado, na região similar influenciada por maré, a montante no rio Amazonas, Damasceno et al. (2015) encontraram maiores valores de concentração de OD (7,18 mg/L no período seco e 6,52 mg/L no período chuvoso), concentrações superiores ao encontrado normalmente nestes canais.

Em relação à acidez das águas, assim como ocorre com baixos valores de OD, é conhecido o fato dos rios amazônicos serem naturalmente de águas ácidas devido a elevada quantidade de matéria orgânica e sua decomposição pelos microorganismos (Sioli 1951), cuja condição é acentuada no período de maiores chuvas. A tendência de variação sazonal de acidez no rio Araguari foi registrada em seu médio curso por Barbara et al. (2010), os quais encontraram o menor pH de 4,7 já registrado neste rio, na confluência com o rio Amapari (principal afluente) e aproximadamente 5,2 na cidade de Cutias, a 54 km da área de estudo. Esse padrão sazonal também já foi encontrado em grandes rios amazônicos (rio Jari) e também em lagos conectados a esses rios (Ajuruxi), e se configura em uma característica típica das águas amazônicas (da Silva et al. 2013, Damasceno et al. 2015, Abreu e Cunha 2017, Cunha e Sternberg 2018).

5.4 Influência das fases do ciclo de maré semidiurna na qualidade da água

O efeito da maré enchente e vazante na qualidade da água é pouco estudado e ainda não tinha sido observado sistematicamente nessa região específica do estuário amazônico (Less et al. 2018). Os trabalhos aqui referenciados buscaram abranger o fator espaço-sazonal, entretanto, a região é diariamente alterada pelo ciclo de maré semidiurna (Gallo e Vinzon 2015), cuja influência nos parâmetros de qualidade da água no rio Araguari se limitava entre 60 e 80 km da sua foz, quando desaguava no Oceano Atlântico (Santos et al. 2014). Além

disso, a maré está diretamente relacionada ao poder de remobilização de sedimentos, podendo mudar rapidamente a morfologia desse estuário (Santos 2006).

A não influência das marés enchente e vazante para os parâmetros oxigênio dissolvido – OD (mg/L) e OD (%) - e SS diferem de outros estudos de qualidade da água sob influência de maré em estuários amazônicos. Moura e Nunes (2016) encontraram efeitos significativos da maré para Turbidez, pH, OD sendo o primeiro maior na maré vazante e os dois últimos na maré enchente. Alves et al. (2009) também encontraram correlação positiva do OD com as correntes de maré. Araújo (2018) encontrou, na Baía de Guajará, em Belém do Pará, relação positiva da maré enchente com a condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, salinidade e turbidez e relação negativa com a temperatura e ausência de efeitos significativos para o pH e OD.

Entretanto, a influência da maré será determinada especialmente pela influência das características dos ambientes aquáticos. Como observamos a influência bidirecional de dois principais rios na área de estudo, a diferenciação causada pelas marés sugere o efeito da interação entre estas duas tipologias de rio. Por exemplo, valores de pH entre 5 e 8 são característicos de rios amazônicos de águas claras (Junk et al. 2011). Portanto, as variações espaciais indicam uma mistura das águas brancas do rio Amazonas com as águas claras do rio Araguari que mostram um pH levemente mais ácido na maré vazante e mais neutro na maré enchente. Por outro lado, é altamente significativo o aumento da turbidez, STD, condutividade elétrica e menor transparência da água durante a maré enchente, mostrando a maior carga suspensa oriunda do rio Amazonas. Esses parâmetros são altamente relacionados aos sólidos suspensos (SS) e, embora tenha apresentado $p = 0,0750$ ($p > 0,05$), podemos considera-lo também como significativo em um nível de 90% de confiança.

As diferenças nas amplitudes de maré também afetam a resposta na qualidade da água de acordo com sua configuração espacial na região. A amplitude de maré é maior no sentido jusante do estuário (mostradas na Figura 1 e Figura 2). Em URU2 e GUR é na ordem 3 metros, enquanto em URU1 é de 1,9 m e em IGN reduz para apenas 1,2 m. Por isso, o fator espacial demonstra as influências na qualidade da água de forma mais intensa pelo canal Urucurituba que pelo Canal Igarapé Novo – Gurijuba. Além disso, o padrão morfológico de drenagem do rio Gurijuba pode dificultar o fluxo das águas do rio Amazonas de forma mais rápida para o rio Araguari, pois acarreta em uma maior distância entre as duas bacias. O Canal Urucurituba, por outro lado, apresenta um padrão de drenagem mais retilíneo (Lopes 2015), e com maiores magnitudes hidrodinâmicas relacionadas à velocidade e vazão, o que favorece as respostas na qualidade da água por esse canal.

6. Conclusões

A relativa e crescente conexão das bacias hidrográficas do rio Araguari e Amazonas tem mudado drasticamente a dinâmica desses ambientes. A notável evolução do Canal Urucurituba confirmou a hipótese de que esse canal possui os maiores aportes líquidos e sólidos, entre os canais estudados, sendo o principal ator das alterações na concentração de sólidos suspensos (SS) e na qualidade da água do estuário do rio Araguari.

A hipótese da influência da sazonalidade também foi aceita, tendo apresentado diferença significativa para todos os parâmetros físico-químicos de qualidade da água analisados. Já a hipótese do efeito de maré não foi corroborada para alguns parâmetros, como o OD e o SS. Por fim, verificou-se que os parâmetros físico – químicos de qualidade da água, exceto a Temperatura da água e do ar, são diferentes entre os sítios amostrais, refutando a hipótese de que estes seriam similares. Entretanto, os resultados sugerem que a sazonalidade e a variabilidade da maré devem ser consideradas em estudos ecológicos na região, pois tendem a alterar significativamente as estratégias de coleta de dados e a dinâmica de monitoramento sistemático desses parâmetros.

Além disso, os parâmetros de qualidade da água, hidrodinâmicos e suas relações às distâncias dos canais estudados para o rio Araguari e Amazonas explicaram o comportamento da descarga sólida encontrada na região. No sentido montante do rio Araguari, há uma tendência decrescente dessa influência, mas ainda assim as alterações foram observadas até o limite espacial dos canais estudados.

Esses resultados ampliam uma preocupação latente em relação à extensão de assoreamento da foz do rio Araguari, os impactos na qualidade da água e suas implicações ao equilíbrio ecológico aquático e para as comunidades que dependem dos recursos hídricos ofertados pelo estuário.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada como resultado do mestrado no Programa de Pós Graduação em Biodiversidade Tropical – PPGBio da Universidade Federal do Amapá – UNIFAP, sob o suporte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de mestrado. Agradecemos ao Governo do Estado do Amapá pelo apoio financeiro e logístico nas campanhas de campo; à equipe de campo e laboratório (José Roberto, Dinaldo Miranda, Sérgio Kleber e Gilvan Oliveira) dos Laboratórios de Análises de Sedimentos (LASED/IEPA) e de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas

Ambientais (LQMSA/UNIFAP), pela disponibilização dos equipamentos e infraestrutura necessária para o processamento de amostras e de dados.

REFERÊNCIAS

- Abreu, C. H. M. de, and A. C. Cunha. 2017. Water quality and trophic index in tropical riverine ecosystem under environmental impact. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* **22**:45–56.
- Agência Nacional de Águas. 2019. Séries Históricas de estações. <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>.
- Allison, M. A., M. T. Lee, A. S. Ogston, and R. C. Aller. 2000. Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America. *Marine Geology* **163**:241–256.
- Allison, M. A., C. A. Nittrouer, L. E. C. Faria Jr, O. M. Silveira, and A. . Mendes. 1996. Sources and sinks of sediment to the Amazon margin: the Amapa coast. *Geo - Marine Letters* **16**:36–40.
- Araújo, V. E. da S. 2018. Análise de alguns parâmetros de qualidade da água na Baía de Guajurá em Belém - PA e os efeitos do regime pluviométrico e de marés. Universidade Federal do Pará.
- Bandeira, I. C. N., A. Adamy, E. R. Andretta, R. A. da Conceição, and M. M. N. de Andrade. 2018. Terras caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon? *Environmental Earth Sciences* **77**:222.
- Barbara, V. F., A. C. da Cunha, A. S. De Lima, and E. Q. de Siqueira. 2010. Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari / AP. *Revista Biociências* **16**:57–72.
- Bernini, H., J. M. Martinez, D. Oliveti, H. L. Roig, and J. A. C. Pinheiro. 2016. Descarga Sólida em Suspensão e dinâmica fluvial na bacia do rio Madeira: um perfil no período de cheia hidrológica.
- Brasil. 2005. Resolução, Nº 357, de 17 de Março de 2005 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.
- Brito, D. C. 2008. Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2KW em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Rio Araguari–AP. 2008. 144p. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical), Universidade Federal do Amapá. Macapá-Amapá.
- Carvalho, N. de O., N. P. Filizola Júnior, P. M. C. dos Santos, and J. Lima. 2000. Guia de práticas sedimentométricas. Brasília: Aneel.
- Chagas, M. A., E. S. dos Santos, and A. C. da Cunha. 2015. Alguém viu a pororoca por aí? XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos:8.
- Chanson, H. 2012. Tidal Bores, Aegir, Eagre, Mascaret, Pororoca: Theory and Observations. Word Scientific, Singapore.

- CPTEC. 2019. El niño e La niña. <http://enos.cptec.inpe.br/>.
- Crawley, M. J. 2007. The R book. Page (J. W. & S. Ltd., Ed.). Imperial College London at Silwood Park, UK.
- Cunha, A., D. Brito, H. Cunha, and H. Schulz. 2011. Dam effect on stream reaeration evaluated with the QUAL2KW model: case study of the Araguari River, Amazon Region, Amapá State/Brazil. Pages 153–177.
- Cunha, A. C. da. 2013. Revisão descritiva sobre qualidade da água, parâmetros e modelagem de ecossistemas aquáticos tropicais. *Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)* **3**:124–143.
- Cunha, A. C. da, and L. da S. L. Sternberg. 2018. Using stable isotopes ^{18}O and ^2H of lake water and biogeochemical analysis to identify factors affecting water quality in four estuarine Amazonian shallow lakes. *Hydrological Processes* **32**:1188–1201.
- Cunha, A. C. da, J. E. de S. Vilhena, E. S. dos Santos, B. Saraiva, Jaci Maria, P. A. F. Kuhn, D. C. Brito, E. B. de Souza, E. P. da Rocha, H. F. A. Cunha, A. U. Brito, A. C. P. B. Júnior, V. H. da M. Paca, and P. V. C. J. Santos. 2014. Evento extremo de Chuva-Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Araguari. *Revista Brasileira de Meteorologia* **29**:95–110.
- Damasceno, M. da C. S., H. M. C. Ribeiro, L. R. Takiyama, and M. T. de Paula. 2015. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais do Rio Amazonas na orla da cidade de Macapá, Amapá, Brasil. *Revista Ambiente & Água* **10**:598–613.
- Dias, T. C. A. de C., A. C. da Cunha, and J. M. C. da Silva. 2016. Return on investment of the ecological infrastructure in a new forest frontier in Brazilian Amazonia. *Biological conservation* **194**:184–193.
- Filizola, N., and J. L. Guyot. 2009. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrological Processes* **23**:3207–3215.
- Funi, C., M. do C. M. de B. Vidal, P. S. Farias, and R. J. V. Pereira. 2014. Caracterização dos rebanhos do Estado do Amapá. Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SEMA, Macapá.
- Gagne-Maynard, W. C., N. D. Ward, R. G. Keil, H. O. Sawakuchi, A. C. Da Cunha, V. Neu, D. C. Brito, D. F. Da Silva Less, J. E. M. Diniz, A. De Matos Valerio, M. Kampel, A. V. Krusche, and J. E. Richey. 2017. Evaluation of Primary Production in the Lower Amazon River Based on a Dissolved Oxygen Stable Isotopic Mass Balance. *Frontiers in Marine Science* **4**:26.
- Gallo, M. N., and S. B. Vinzon. 2015. Estudo numérico do escoamento em planícies de marés do canal Norte (estuário do rio Amazonas). *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua* **2**:38–50.
- Gibbs, R. J. 1967. The Geochemistry of the Amazon River System: Part I. The Factors that Control the Salinity and the Composition and Concentration of the Suspended Solids. *GSA Bulletin* **78**:1203–1232.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. Mapa exploratório de solos. Pedologia. Estado do Amapá. IBGE. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15828-pedologia-do-estado-de-ro-rr-to-ac-am-ap-ma-mt-pa-e->

rs.html?=&t=acesso-ao-produto.

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho, segundo a Unidade da Federação, suas Mesorregiões, Microrregiões e Municípios. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=resultados>.
- Junk, W. J., M. T. F. Piedade, J. Schöngart, M. Cohn-Haft, J. M. Adeney, and F. Wittmann. 2011. A Classification of Major Naturally-Occurring Amazonian Lowland Wetlands. *Wetlands*:623–640.
- Junk, W., M. T. Piedade, R. Lourival, F. Wittmann, P. Kandus, L. Lacerda, R. Bozelli, F. A. Esteves, C. Da Cunha, M. L. J. Schöngart, Y. Schaeffer-Novelli, and A. Agostinho. 2014. Brazilian wetlands: Their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection.
- Kolker, A. S., M. D. Miner, and H. D. Weathers. 2012. Depositional dynamics in a river diversion receiving basin: The case of the West Bay Mississippi River Diversion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **106**:1–12.
- Latrubesse, E. M., E. Y. Arima, T. Dunne, E. Park, V. R. Baker, F. M. d’Horta, C. Wight, F. Wittmann, J. Zuanon, P. A. Baker, C. C. Ribas, R. B. Norgaard, N. Filizola, A. Ansar, B. Flyvbjerg, and J. C. Stevaux. 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature* **546**:363–369.
- Leite, F. 2010. *Práticas de química analítica*. 4^a. Editora Átomo, São Paulo.
- Less, D. F. S., A. C. Cunha, H. Sawakuchi, V. Neu, A. M. Valério, N. D. Ward, D. C. Brito, J. E. M. Diniz, W. Gagne-Maynard, C. M. Abreu, M. Kampel, A. V. Krusche, and J. E. Richey. 2018. The role of hydrodynamic and biogeochemistry on CO₂ flux and pCO₂ at the Amazon River mouth. *Biogeosciences Discussions (On line)* **1**:1–26.
- Li, X., J. P. Liu, Y. Saito, and V. L. Nguyen. 2017. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams. *Earth-Science Reviews* **175**:1–17.
- Lopes, P. P. P. 2015. *Análise temporal de alterações morfológicas fluviais e seus impactos socioambientais no Baixo rio Araguari, Amapá*. Universidade Federal do Amapá.
- MacKinnon, B. D., J. Sagin, H. M. Baulch, K. -E. Lindenschmidt, and T. D. Jardine. 2016. Influence of hydrological connectivity on winter limnology in floodplain lakes of the Saskatchewan River Delta, Saskatchewan. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **73**:140–152.
- Matos, M. de F. A. de. 2009. *Caracterização de processos morfodinâmicos e hidrodinâmicos do cinturão lacustre meridional da Reserva Biológica do Lago Pirituba, Amapá*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Matta, M. A. da S., I. N. Cavalcante, J. F. P. Assis, C. R. Melo, J. A. C. Martins, C. G. Diniz, Y. B. Vasconcelos, M. M. Vanzin, and K. M. Carmona. 2008. Qualidade das águas tributárias do Rio Amapari nas áreas de influência das mineradoras MMX (Ferro) e MPBA (Ouro) no Estado do Amapá . XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços:1–12.
- Moura, H. T. G. de S., and Z. M. P. Nunes. 2016. *Caracterização sazonal das águas do*

- sistema estuarino do caeté (Bragança-PA). *Boletim do Instituto de Pesca* **42**:849–860.
- Moura, M. M., A. R. dos Santos, J. E. M. Pezzopane, R. S. Alexandre, S. F. da Silva, S. M. Pimentel, M. S. S. de Andrade, F. G. R. Silva, E. R. F. Branco, T. R. Moreira, R. G. da Silva, and J. R. de Carvalho. 2019. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Science of The Total Environment* **651**:1639–1651.
- Mueller, D. S., and C. R. Wagner. 2009. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Novo, E. M. L. de M. 2008. Ambientes fluviais. Page 318 *in* T. G. Florenzano, editor. *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Oliveira, L. L. de, A. C. da Cunha, E. dos S. Jesus, and N. J. da C. Barreto. 2010. Características Hidroclimáticas da Bacia do Rio Araguari (Ap). Page 216 *in* A. C. da Cunha, E. B. Souza, and H. F. A. Cunha, editors. *Tempo, clima e recursos hídricos: resultados do projeto REMETAP no estado do Amapá*. IEPA, Macapá.
- R Development Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria.
- Rabelo, B. V. 2006. Macrodiagnóstico do Estado do Amapá: primeira aproximação do ZEE. Second edition. IEPA, ZEE, Macapá.
- Rosseti, D. de F. 2008. Ambientes costeiros. Page 318 *in* T. G. Florenzano, editor. *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Santana, L. de O., and O. F. M. da Silveira. 2005. Análise da drenagem da microbacia hidrográfica dos rios Gurijuba e Pírim. Pages 673–680 *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, Goiânia, Brasil.
- Santos, E. S. dos. 2012. Modelagem Hidrodinâmica e Qualidade da Água em Região de Pororoca na Foz do Rio Araguari-AP. Universidade Federal do Amapá, Macapá.
- Santos, E. S. dos, and A. C. da Cunha. 2015. Análise de cenários hidrossedimentométricos para estimar taxas de assoreamento e vida útil do reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão no rio Araguari/AP-Brasil. 2015 5:10.
- Santos, E. S. dos, A. C. da Cunha, and E. D. de S. da Cunha. 2014. Análise espaço-sazonal da qualidade da água na zona flúvio-marinha do Rio Araguari-Amazônia Oriental-Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 19.
- Santos, E. S. dos, P. P. P. Lopes, H. H. da Silva Pereira, O. de Oliveira Nascimento, C. D. Rennie, L. da S. L. O'Reilly, and A. C. da Cunha. 2018. The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of The Total Environment* **624**:887–899.
- Santos, V. F. dos. 2006. Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense: Tese de doutorado.
- Sawakuchi, H. O., V. Neu, N. D. Ward, M. L. C. Barros, A. Matos, W. Gagne-Maynard, A. C. Cunha, D. F. S. Less, J. E. Diniz, D. C. Brito, A. V. Krusche, and J. E. Rickey. 2017.

- Carbon Dioxide Emissions along the Lower Amazon River. *Frontiers in Marine Science* **4**:1–12.
- Silva, C. N. da, R. Â. P. de Lima, and J. M. P. da Silva. 2017. Uso do Território e Impactos das construções de Hidroelétricas na Bacia do Rio Araguari (Amapá-Brasil). *PRACS: Revista Eletrônica de Humanidades do Curso de Ciências Sociais da UNIFAP* **9**:123.
- da Silva, M. T., J. de O. Pereira, L. J. S. Vieira, and A. C. Petry. 2013. Hydrological seasonality of the river affecting fish community structure of oxbow lakes: A limnological approach on the Amapá Lake, southwestern Amazon. *Limnologia* **43**:79–90.
- Silva, M. V., V. F. Santos, and O. F. M. da Silveira. 2011. Análise multitemporal de mudanças nas ilhas costeiras do estado do Amapá aplicando dados de sensores remotos. *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba* **30**:8614–8622.
- Silva, N. B. da, J. O. Lopes, J. D. de M. Brito, S. K. dos Santos, L. R. Takiyama, A. E. A. D. Montagner, and E. D. C. de Oliveira. 2018. Diagnóstico da qualidade da água em áreas utilizadas pela bubalinocultura no Baixo Araguari, Amapá, Brasil. *Biota Amazônia* **8**:22–28.
- Sioli, H. 1951. Alguns resultados e problemas da limnologia amazônica. *Embrapa Amazônia Oriental - periódico indexado Alice* **24**:3–44.
- Sioli, H. 1984. The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types. Pages 127–165 *The Amazon*. Springer.
- Souza-Cruz-Buenaga, F. V. A., S. A. Espig, T. L. C. Castro, and M. A. Santos. 2019. Environmental impacts of a reduced flow stretch on hydropower plants. *Brazilian Journal of Biology* **79**:470–487.
- Syvitski, J. P. M., C. J. Vorösmarty, A. J. Kettner, and P. Green. 2005. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science* **308**:376–380.
- Torres, A. M., M. El-Robrini, and W. J. P. Costa. 2018. Panorama da erosão costeira - Amapá. Page 761 *in* D. Muehe, editor. *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Second edition. Ministério do Meio Ambiente.
- Trimble, S. W. 1994. Erosional effects of cattle on streambanks in Tennessee, USA. *Earth surface processes and landforms* **19**:451–464.
- Valerio, A. M., M. Kampel, V. Vantrepotte, N. D. Ward, H. O. Sawakuchi, D. F. S. Less, V. Neu, A. C. Cunha, and J. E. Richey. 2018. Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and pCO in the Lower Amazon River. *OPTICS EXPRESS* **26**:A657–A677.
- Wang, B., and Y. J. Xu. 2018. Dynamics of 30 large channel bars in the Lower Mississippi River in response to river engineering from 1985 to 2015. *Geomorphology* **300**:31–44.
- Ward, N. D., R. G. Keil, P. M. Medeiros, D. C. Brito, A. C. Cunha, T. Dittmar, P. L. Yager, A. V. Krusche, and J. E. Richey. 2013. Degradation of terrestrially derived macromolecules in the Amazon River. *Nature Geoscience (Print)* **6**:530–533.
- Ward, N. D., H. O. Krusche, Alex V. Sawakuchi, D. C. Brito, A. C. Cunha, R. Moura, José

- Mauro Sousa Da Silva, P. L. Yager, R. G. Keil, and J. E. Richey. 2015. The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River-Óbidos to the ocean. *Marine Chemistry (Print)* **177**:244–256.
- Ward, N. D., H. O. Sawakuchi, V. Neu, D. F. S. Less, A. M. Valerio, A. C. Cunha, M. Kampel, T. S. Bianchi, A. V. Krusche, J. E. Richey, and R. G. Keil. 2018. Velocity-amplified microbial respiration rates in the lower Amazon River. *Limnology and Oceanography Letters* **3**:265–274.
- Wood, P. J., and P. D. Armitage. 1997. Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment. *Environmental Management* **21**:203–217.
- Xu, J., and F. Li. 2019. Response of lower Yellow River bank breachings to La Niña events since 924 CE. *CATENA* **176**:159–169.
- YSI. 2002. Operation Manual - YSI 556 MPS. Yellow Springs/OH.

5. CONCLUSÕES

A relativa e crescente conexão das bacias hidrográficas do rio Araguari e Amazonas tem mudado drasticamente a dinâmica desses ambientes. O Canal do Urucurituba vem aumentando notavelmente o seu aporte líquido em relação a estudos anteriores juntamente a uma descarga sólida muito expressiva. Esses resultados ampliam uma preocupação latente em relação à extensão de assoreamento da foz do rio Araguari e provocam questionamentos a respeito sobre o ponto de equilíbrio que este rio irá atingir. Alguns pontos observados nesse trabalho são destacados:

- 1) As magnitudes das vazões líquida e sólidas, especialmente no período chuvoso, apontam uma grande influência do Canal do Urucurituba no rio Araguari e também em direção ao arquipélago do Bailique no rio Amazonas.
- 2) O Canal Urucurituba desviou 100% do fluxo do rio Araguari no período seco. Entretanto, no período chuvoso, o canal Igarapé Novo - Gurijuba também desviou 28% do fluxo do rio Araguari.
- 3) A influência do Canal Urucurituba também foi similar para os parâmetros de qualidade da água. O teste de Kruskal-Wallis indicou que todos os parâmetros, exceto T_{air} e T_w , possuem diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os pontos de coleta
- 4) As hipóteses do efeito da sazonalidade e das fases do ciclo de maré também foram aceitas. O efeito da sazonalidade foi significativo ($p < 0,05$) para todos os parâmetros (T_w , T_{air} , CE, Turb, Sal, STD, pH, OD, SS e Secchi). Entretanto, o teste de Wilcoxon não mostrou diferença significativa entre OD e SS ($p > 0,05$) para as marés enchente e vazante.

Verificou-se em modelos de regressão que os parâmetros de qualidade da água, hidrodinâmicos e suas relações às distâncias dos canais estudados para o rio Araguari e Amazonas explicam a comportamento da descarga sólida encontrada na região. Este fator espacial mostra os efeitos da interação entre esses dois rios com características hidrodinâmicas e geológicas distintas que impactam diretamente na qualidade da água e nos processos sedimentares. A redução dos níveis de OD, por exemplo, foram observadas nos pontos próximos ao Canal Urucurituba e no Araguari (ARA2). Em um rio com características de maior oxigenação, estas interações podem ocasionar impactos ecológicos, especialmente para a ictiofauna.

Os processos sedimentares são acentuados devido à presença na área de uma planície de inundação, composta de sedimentos subconsolidados e altamente instável ambientalmente.

Esta planície quando drenada pelo Canal Urucurituba foi determinante para intensificação do aporte hídrico (tanto do rio Araguari quanto do rio Amazonas), acarretando em graves eventos erosivos e alterações na concentração de sólidos suspensos e da qualidade da água.

Dessa forma, as contribuições do trabalho mostram claramente a necessidade de uma maior atenção aos fatores envolvidos nos processos erosivos, especialmente os que culminam no desenvolvimento de canais na região, pois podem intensificar a fragilidade natural desse ambiente. Não somente esses aspectos, mas também é necessário um maior aprofundamento no entendimento dos impactos desses fatores nas relações ecológicas a nível de fauna e flora decorrentes das alterações expressivas de seu habitat e condições bióticas e abióticas.

É certo que as dificuldades logísticas e financeiras dificultam e limitam a quantidade de estudos científicos nessa região, os quais são mais concentrados no alto e médio trecho do rio Araguari. Dessa forma, deve-se ter um maior esforço por parte dos gestores políticos com políticas mais efetivas de gestão e monitoramento na área que considerem também, além dos impactos ambientais mencionados, o seu impacto direto nas populações ribeirinhas que vivem na região, que dependem do equilíbrio ambiental para sustentar suas necessidades sociais e econômicas.