



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA**

**VÍCTOR MARTINS GUEDES**

**DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO DISSOLVIDOS NA REGIÃO DO  
BAIXO RIO AMAZONAS**

**SANTARÉM  
2020**

**VÍCTOR MARTINS GUEDES**

**DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO DISSOLVIDOS NA REGIÃO DO  
BAIXO RIO AMAZONAS**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Amazônia (PPGRNA) para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais; Universidade Federal do Oeste do Pará.  
Orientador: Dr. Jose Mauro Sousa de Moura.  
Co-Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Vania Neu.

**SANTARÉM  
2020**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA**

---

G924d Guedes, Víctor Martins  
Dinâmica do carbono e nitrogênio dissolvidos na região do Baixo Rio Amazonas. /  
Víctor Martins Guedes. – Santarém, 2020.  
61 p. : il.  
Inclui bibliografias.

Orientador: José Mauro Sousa de Moura Coorientadora:  
Vania Neu

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Tecnológica, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia.

1. Fluxos de carbonos e nitrogênio. 2. Efeitos de maré. 3. Balanço de massa. I. Moura, José Mauro Sousa de, *orient.* II. Neu, Vania, *coorient.* III Título.

CDD: 23 ed. 551.48

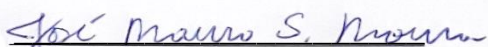
**VÍCTOR MARTINS GUEDES**

**DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO DISSOLVIDOS NA REGIÃO DO  
BAIXO RIO AMAZONAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais da Amazônia (PPGRNA) para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais; Universidade Federal do Oeste do Pará.  
Área de concentração: Estudos e Manejo de Ecossistemas Amazônicos

Conceito: Aprovado

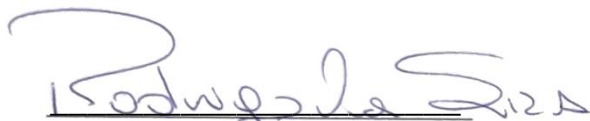
Data de Aprovação: 19/02/2020



Prof. Dr. Jose Mauro Sousa de Moura - Orientador  
Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA)



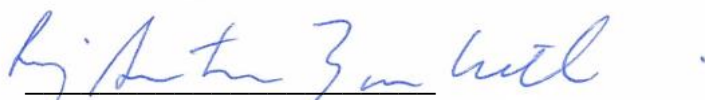
Prof. Dra. Vania Neu (UFRA) - Co-orientadora  
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)



Prof. Dr. Rodrigo, da Silva  
Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA)



Prof. Dra. Diani Fernanda da Silva Less  
Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA)



Prof. Dr. Luiz Antonio Martinelli  
Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP)

Dedico a todas as pessoas que direta ou indiretamente torceram por mim para que eu pudesse chegar ao final desta jornada.

Dedico a Waldenise Guedes (*in memoriam*), responsável pela motivação para recomeçar.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Waldenise Martins. Obrigado por ter proporcionado absolutamente tudo. Toda essa história não existiria sem você, que deixou tudo, sua família, seu Estado, seus sonhos para que eu pudesse estar aqui. Nada que eu escreva vai descrever o que você representa para mim. Ao meu pai, Grimaldo Guedes, por todos os seus ensinamentos.

A todos os meus amigos de infância e universidade (Rita de Cássia, Leonardo Bruno, Maria Gabriella, Diego Lopes, João Marcos, Lucas Souza, André Pamplona, Izabella Penha, Victor Gemaque, Lorena Sandin, Higor Pegado e Luana Aires) pelo apoio nos momentos difíceis e pelos momentos bons. Em especial, a Maria Gabriella por sua participação direta e indireta neste trabalho, por todo apoio durante a escrita, revisão e tantos outros detalhes.

Em ordem cronológica, à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), que foi por muito tempo, minha segunda casa. A minha orientadora Vania Neu, pelas orientações e enorme paciência desde a graduação. Obrigado por abrir diversas portas e ajudar seus alunos dentro e fora da universidade.

À toda equipe do laboratório de hidrobiogeoquímica da UFRA.

Agradeço ao projeto TROCAS (Trocas líquidas do ecossistema baixo Rio Amazonas: da terra para o oceano e atmosfera) e seus pesquisadores principais, Jeffrey Edward Richey, Alex Vladimir Krusche, Maria Victoria Ramos Ballester. Muito obrigado a toda equipe do barco MIRAGEM.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP<sup>SPEC</sup>), à National Science Foundation (NSF), agências de fomento do projeto TROCAS. Assim como suas instituições parceiras, Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP), Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Universidade de Washington (UW) e Pacific Northwest National Laboratory (PNNL).

Agradeço a Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) e ao município de Santarém-PA, por ter me recebido. Ao programa de pós-graduação em recursos naturais da Amazônia (PPGRNA) e seu corpo docente. Ao coordenador do programa e orientador, José Mauro, pelos incentivos e esforços a frente do programa. A secretária do programa, Rose Gleisy, por sempre estar disposta a ajudar os alunos e todos que pedirem ajuda.

Aos amigos que conheci no município de Santarém-PA ao longo do mestrado. Darlisson Bento, Emanuelle Bento, Rayanna Godin, Gabriella Godin, Erick Coelho, Rafael Zilio, Ísis do Mar e

Danna Morais. Em especial, ao Darlisson Bento e Emanuelle Bento e suas respectivas famílias.  
Muito obrigado por ter me acolhido, sempre lembrarei disso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O rio Amazonas tem papel importante no transporte e processamento de nutrientes, contudo, existe uma lacuna no entendimento deste rio como uma via de ligação entre o ambiente terrestre e marinho devido aos poucos estudos na região do baixo Amazonas, influenciada pelo ciclo de maré semidiurno. Aqui, foi registrado a variabilidade espaço-sazonal das concentrações e fluxos de carbono e nitrogênio dissolvidos de Óbidos até a foz do rio Amazonas, além de avaliar a influência desta região no balanço regional das formas de C e N dissolvidos, durante o período de 2014 a 2017. Concentrações de COD, CID e NTD foram determinadas por meio de absorção infravermelha, no equipamento Shimadzu, modelo TOC-VCPH, gerada após combustão a 690°C. O NID é resultado da soma das frações nitrito, nitrato e amônio, determinadas, por sua vez, por calorimetria em sistema por injeção em fluxo automatizado. As concentrações de NOD foram obtidas pela diferença entre a fração NTD e as concentrações de NID. Concentrações de COD e NOD, no canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras, são influenciadas principalmente pela entrada de material alóctone durante os períodos hidrológicos de enchente e maior vazão. Com relação a variação longitudinal no canal principal, durante o período de maior vazão e vazante, houve diluição das concentrações médias de COD entre Óbidos e Almeirim. Da mesma forma, ocorreram diluições nas concentrações de CID e NOD, contudo, apenas no período de menor vazão. Neste trecho, diluições são associadas a entrada de tributários de águas claras e maior taxa de degradação da matéria orgânica, devido ao aporte de substratos de origem algal, ocasionando balanços de massa negativos. Próximo à foz, diluições nas concentrações de COD e aumentos nas concentrações de CID foram observados no período de menor vazão, eventos associados também a ocorrência de efeito *priming*, contudo, relacionado, possivelmente, à substratos de baixo peso molecular e açúcares. No que se refere ao nitrogênio dissolvido, houve aumento nas concentrações de NID próximo à foz, possivelmente associado a maior saturação de O<sub>2</sub>. Estimou-se um fluxo médio de carbono e nitrogênio dissolvidos, em direção ao oceano, de 59 Tg C ano<sup>-1</sup> e 2 Tg N ano<sup>-1</sup>, com significativa influência do baixo rio Amazonas sobre o balanço regional, principalmente quanto a exportação de nitrogênio dissolvido.

**Palavras-Chave:** Fluxos de Carbono e Nitrogênio. Efeitos de Maré. Balanço de Massa.



## ABSTRACT

The Amazon River play an important role in transporting and processing of nutrients towards the ocean. However, there is a gap in the understanding of this river as a link between the terrestrial and marine environment, due to few studies in this region, tidally influenced. Here, we document the spatial-seasonal variability of dissolved carbon and nitrogen concentrations and fluxes from Óbidos to the mouth of the Amazon River, in addition to assessing the influence of this region on the regional budget, of C and N dissolves forms, during the period of 2014 and 2017. DOC, DIC and TDN concentrations were determined by infrared absorption, on the equipment Shimadzu, model TOC-VCPH, generated after combustion at 690°. DIN was result of the sum of nitrite, nitrate and ammonium fractions, which were determined by automated flow injection system calorimetry. DON concentrations were obtained by the difference between the TDN fraction and the DIN fractions. DOC and DON concentrations in the Amazon river mainstem and its clearwater tributaries are mainly influenced by the input of allochthonous material, during rising and high water. During the period of high water and falling water, there was a dilution of the DOC concentrations between Óbidos and Almeirim. Likewise, dilutions occurred in the concentrations of DIC and DON, however, only in the period of low water. In this stretch, dilutions were associated with the entry of clear water tributaries and a higher rate of degradation of organic matter, due to the contribution of substrates of algal origin, causing negative mass balances. Near the mouth, dilutions in DOC concentrations and increases in DIC concentrations were observed in the period of low water, events also associated with the occurrence of priming effect, however, possibly related to low molecular weight substrates and sugars. With regard to dissolved nitrogen, there was an increase in NID concentrations near the mouth, possibly associated with higher O<sub>2</sub> saturation. The average export of dissolved carbon and nitrogen was 59 Tg C yr<sup>-1</sup> and 2 Tg N yr<sup>-1</sup>, respectively, with significant influence from the lower Amazon on the regional budget, mainly regarding the export of dissolved nitrogen.

**Keywords:** Carbon and nitrogen fluxes. Tidally-influenced. Mass balance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> — Estações de amostragem ao longo do baixo Amazonas.....	19
<b>Figura 2</b> — Região hidrográfica amazônica.....	20
<b>Figura 3</b> — Mapa de solos da bacia amazônica. ....	23
<b>Figura 4</b> — (A) Tipos climáticos predominantes na bacia amazônica, segundo critério utilizado por Koppen – Geiger. (B) Precipitação média anual e temperatura média anual para região amazônica. ....	24
<b>Figura 5</b> — Rio Amazonas nas proximidades do município de Monte Alegre-PA, nos períodos de maior vazão (maio, 2018) (A) e menor vazão (novembro, 2018) (B). ....	25
<b>Figura 6</b> — Região do baixo rio Amazonas dividida em três seções. ....	27
<b>Figura 7</b> — (A) frascos de boro-silicato; (B) membrana de fibra de vidro, do tipo Whatmann, GF/F, porosidade 0,7 µm; (C) frascos de polietileno de alta densidade; e (D) filtros de acetato de celulose. ....	28
<b>Figura 8</b> — Medidores portáteis de oxigênio dissolvido, pH, temperatura e condutividade elétrica da água. ....	28
<b>Figura 9</b> — Medidor Acústico de Efeito Doppler (ADCP), acoplado ao barco.....	29
<b>Figura 10</b> — Vazões registradas ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários (Tapajós e Xingu) durante o período de 2014 a 2016. ....	33
<b>Figura 11</b> — Concentrações de COD (mg L <sup>-1</sup> ) ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.....	37
<b>Figura 12</b> — Concentrações de CID (mg L <sup>-1</sup> ) ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.....	37
<b>Figura 13</b> — Concentrações de COD (A) e CID (B) (mg L <sup>-1</sup> ), nas estações de amostragem do rio Amazonas, na seção 3. ....	41
<b>Figura 14</b> — <i>Biplot</i> da análise de componentes principais a partir da matriz de correlação (COD, CID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).....	42
<b>Figura 15</b> — Concentrações de NOD (mg N L <sup>-1</sup> ) ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.....	46
<b>Figura 16</b> — Concentrações de NID ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.....	46
<b>Figura 17</b> — Concentrações de NOD (A) e NID (B) (mg N L <sup>-1</sup> ) nas estações de amostragem do rio Amazonas na seção 3. ....	51
<b>Figura 18</b> — <i>Biplot</i> da análise de componentes principais a partir da matriz de correlação (NTD, NOD, NID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Vazão ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.....	33
<b>Tabela 2</b> - Valores médios $\pm$ desvio padrão da condutividade elétrica da água ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ), pH e temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), no canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras (rios Tapajós e Xingu), durante os períodos .....	35
<b>Tabela 3</b> – Concentrações médias $\pm$ desvio padrão de concentrações ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e fluxos ( $\text{kg s}^{-1}$ ) de COD e CID nas estações de amostragem, conforme a sazonalidade.....	38
<b>Tabela 4</b> - Componentes principais, autovalores (variâncias), porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes, a partir da matriz de correlação (COD, CID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).....	43
<b>Tabela 5</b> - Concentrações médias $\pm$ desvio padrão ( $\text{mg N L}^{-1}$ ) de NTD, NOD, NID, nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) nos pontos amostrais, conforme a sazonalidade. ....	49
<b>Tabela 6</b> - Fluxos médios $\pm$ desvio padrão ( $\text{kg N s}^{-1}$ ) de NTD, NOD, NID, nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) nos pontos amostrais, conforme a sazonalidade. ....	50
<b>Tabela 7</b> - Componentes principais, autovalores (variâncias), porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes, a partir da matriz de correlação (NTD, NOD, NID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).....	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de Estudo</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Características Fisiográficas</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Características Pedológicas</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Características Climáticas e Hidrológicas</b> .....	<b>23</b>
<b>3.5</b>	<b>Desenho Experimental</b> .....	<b>26</b>
<b>3.6</b>	<b>Métodos Amostrais e Analíticos</b> .....	<b>27</b>
<b>3.7</b>	<b>Análise Estatística e Cálculo de Balanço de Massa</b> .....	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Vazão</b> .....	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Análises Físico-Químicas</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Concentrações e Fluxos de Carbono e Nitrogênio Dissolvido</b> .....	<b>35</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Carbono Dissolvido</b> .....	<b>35</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Nitrogênio Dissolvido</b> .....	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Cobrindo, aproximadamente, 6,3 milhões de km<sup>2</sup>, a bacia hidrográfica do rio Amazonas compreende cerca de 40% do continente sul americano. Sua importância também é entendida pelos vários papéis essenciais que esta região desempenha, dentre elas a contribuição de aproximadamente 20% do total global de água fluvial que chega aos oceanos, com vazão média de  $200 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (BUSTAMANTE et al., 2015; MEDEIROS et al., 2015; PATEL et al., 1999; SAWAKUCHI et al., 2017; SEIDEL et al., 2015).

A magnitude da bacia hidrográfica amazônica promove intensos fluxos de substratos minerais e orgânicos em direção ao oceano. Os fluxos efetivos destes compostos químicos resultam da soma das contribuições geológicas e biológicas de toda bacia de drenagem, assim como, eventos de inundação, processamento do substrato ao longo da bacia, fatores climáticos, mudança de uso e cobertura do solo, dentre outros (ERTEL et al., 1986; MEYBECK, 1982; QUAY et al., 1992; RICHEY et al., 1980; RICHEY, 1981a, 1982).

Grandes rios, como o Amazonas, são caracterizados por sua dinâmica e complexidade, constituindo uma via de ligação entre dois grandes reservatórios de nutrientes, os ambientes terrestres e os oceanos. Quantificar o que está sendo processado e exportado até o oceano é de grande interesse (RICHEY, 1981b), haja vista que, rios atuam não apenas como condutores passivos, mas como elementos importantes no processamento de nutrientes (SAWAKUCHI et al., 2017), integrando as características químicas de toda bacia (DICKINSON; RICHEY; RIBEIRO, 1987; RICHEY et al., 1990; SEDELL; RICHEY; SWANSON, 1989; WARD et al., 2017).

Processos biogeoquímicos atuantes em determinada porção de um rio podem ser entendidos por meio da concentração de material dissolvido, o qual pode ser utilizado como fonte de energia por microrganismos heterotróficos. As formas dissolvidas de carbono e nitrogênio são as principais formas de transporte destes elementos ao oceano pela bacia hidrográfica amazônica, sendo caracterizada como a maior bacia hidrográfica condutora de elementos dissolvidos (MARTINELLI et al., 1989; RICHEY, 1982).

O carbono está intimamente ligado a reações de produção e consumo de energia, entre elas a fotossíntese oxigênica, anoxigênica, quimiossíntese, respiração oxíca e respiração anaeróbica. Por sua utilização intensa por organismos fotossintetizantes, é fundamental no ciclo biogeoquímico de águas naturais. Além disso, o carbono atua como um importante complexador de metais aos sedimentos no corpo hídrico. O nitrogênio, por sua vez, atua principalmente na síntese de proteínas e aminoácidos, considerado um importante limitante da

produção primária (ESTEVES, 1988; TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2014).

A matéria orgânica dissolvida contribui com aproximadamente 50% da matéria orgânica total transportada pelo canal principal do rio Amazonas e seus principais tributários; do total de carbono dissolvido transportado pelo canal principal do rio Amazonas (até Óbidos-PA), 30% é transportado na forma de carbono orgânico dissolvido (COD), enquanto que 50% é transportado como carbono inorgânico dissolvido (CID). No que se refere ao nitrogênio, 50% do total transportado ao oceano fluem na forma de nitrogênio orgânico dissolvido (NOD) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (MOREIRA-TURCQ et al., 2003; QUAY et al., 1992; RICHEY et al., 1990; RICHEY; VICTORIA, 1993, 1996; SANTOS et al., 2008; SMOAK; KREST; SWARZENSKI, 2005).

Neste estudo, concentrações e fluxos das frações de carbono e nitrogênio dissolvidos foram analisadas com o objetivo de descrever os padrões temporais e espaciais, assim como avaliar os fatores que regulam a dinâmica de tais frações na região do baixo Amazonas, entre Óbidos até a foz, sujeita aos efeitos de maré semidiurna, responsável por aumentar o tempo de residência da água e intensificar a conexão entre florestas alagáveis e o canal principal do rio Amazonas (GAGNE-MAYNARD et al., 2017).

Apesar da bacia hidrográfica do rio Amazonas ainda ser caracterizada por baixos impactos antrópicos, não interferindo em seus ciclos biogeoquímicos de maneira efetiva, na região do baixo rio Amazonas são observadas as maiores taxas de desmatamento, recentemente impulsionadas pelo enfraquecimento das políticas ambientais, estimulando o avanço da agricultura e pecuária, além dos recentes aumentos nas taxas de queimadas na região (BOUCHER; CHI, 2018; BUSTAMANTE et al., 2015; CARVALHO et al., 2019; ESCOBAR, 2019; FEITOSA et al., 2019; GOMES et al., 2019). Portanto, o entendimento da dinâmica de nutrientes como carbono e nitrogênio torna-se crucial para a quantificação dos impactos antrópicos na bacia hidrográfica do rio Amazonas, influenciando a biogeoquímica de ambientes aquáticos em escala regional e global, uma vez que, o rio Amazonas é o maior transportador de matéria orgânica com origem em ambientes terrestres e maior transportador de nutrientes dissolvidos (COPPOLA et al., 2019; MARTINELLI et al., 1989).

A fim de compreender a dinâmica do carbono e nitrogênio orgânico e inorgânico, foram realizadas seis expedições no âmbito do projeto TROCAS (Trocas líquidas do ecossistema baixo Rio Amazonas: da terra para o oceano e atmosfera), sob as hipóteses de que: a) a jusante de Óbidos, há uma tendência de redução das concentrações no canal principal devido às características naturais da região, com menor número de tributários e menor extensão de áreas

alagáveis laterais, que são fontes de substratos para o canal principal do rio Amazonas; b) apesar da diminuição das concentrações em direção à foz, fluxos médios anuais de carbono e nitrogênio dissolvidos são maiores que aqueles estimados por estudos que negligenciavam esta parte final da bacia.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A importância do carbono deve-se, principalmente, à sua a sua abrangência e complexidade, sendo o segundo elemento mais importante em termos de massa, atrás apenas do oxigênio. Além de ser o elemento mais utilizado pelos organismos fotossintetizantes, portanto, fundamental no ciclo biogeoquímico de águas naturais, na atmosfera é de fundamental importância sobre o efeito estufa, devido aos gases dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ), compostos de carbono (ESTEVEES, 1988; TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2015).

O carbono possui relação direta com reações de produção e consumo de energia na biologia, destacando-se as reações de fotossíntese, quimiossíntese e respiração. Com relação a fotossíntese (oxigênica), o  $\text{CO}_2$  é transformado em composto orgânicos, produzindo, concomitantemente,  $\text{O}_2$ , utilizando a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) como doador de elétrons (hidrogênio) e a luz como fonte de energia. Na quimiossíntese, o  $\text{CO}_2$  é transformado em matéria orgânica utilizando-se compostos químicos reduzidos como fonte de energia. O processo de respiração (óxica), por sua vez, caracteriza-se como o principal processo de geração de energia para organismos aeróbicos, oxidando biologicamente a matéria orgânica, utilizando o  $\text{O}_2$  como agente oxidante (ESTEVEES, 1988; TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2015).

Em ecossistemas aquáticos, o carbono orgânico pode ser agrupado em duas categorias: carbono orgânico detrital e carbono orgânico particulado. O carbono orgânico detrital subdivide-se em: carbono orgânico dissolvido (COD) e carbono orgânico particulado-detrital (COP-detrital). Com relação ao COD, fração aqui estudada, esta é formada principalmente de proteínas, carboidratos, lipídios e compostos húmicos. O COD é utilizado como fonte de energia para bactérias e algas cianofíceas e precipitador de nutrientes importantes para produção primária, além de interferir no processo de fotossíntese por alterar a radiação na coluna d'água de maneira qualitativa e quantitativa (ESTEVEES, 1988; TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2015).

Com relação ao carbono inorgânico dissolvido (CID), este é, geralmente, a forma mais abundante de carbono água, devido ao equilíbrio  $\text{CO}_2$  na água, responsável por produzir  $\text{CO}_2$  solúvel, formando ainda o ácido carbônico ( $\text{HCO}_3^-$ ) e íons carbonato ( $\text{CO}_3^-$ ), utilizados como fonte de energia para plantas aquáticas. Apesar do carbono não ser considerado como um fator limitante para os organismos fotossintetizantes, a elevação do pH, resultado do aumento da fotossíntese, desloca o equilíbrio  $\text{CO}_2$  para o sistema carbonato, diminuindo as concentrações



de CO<sub>2</sub> solúvel, principal fonte de CID para o ambiente aquático (ESTEVEES, 1988; TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2015).

De maneira diferente, o nitrogênio caracteriza-se por ser um fator limitante para produção primária. O ciclo do nitrogênio é um dos mais complexos ciclos de nutrientes por sua grande reserva na atmosfera, cerca de 70%, e por seus processos de transferência entre diversos compartimentos. Utilizado, principalmente, na produção de proteínas e aminoácidos, as formas principais de nitrogênio são: nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e compostos nitrogenados dissolvidos (uréia, aminoácidos livres e peptídeos). Destaca-se aqui, a intensa ação antrópica sobre o ciclo do nitrogênio, responsável por aumentar a quantidade de nitrogênio reativo, ocasionando desequilíbrios nutricionais, levando a mudanças na comunidade vegetal (TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2015).

Dentre os diversos ciclos biogeoquímicos, o nitrogênio é o único elemento que não se faz presente em rochas que comumente são encontradas na crosta terrestre, sendo sua utilização dependente da conversão de N<sub>2</sub> em formas solúveis. Dentre as entradas naturais de nitrogênio, destaca-se a fixação biológica, responsável pela conversão de N<sub>2</sub> em amônia (NH<sub>3</sub>) ou outras formas de nitrogênio reativo (NO<sub>y</sub>). Outra forma de entrada de nitrogênio reativo nos ecossistemas é a transformação de N contido na matéria orgânica para forma inorgânica (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), também denominado como processo de amonificação (ESTEVEES, 1988; TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2015).

Transformações dentro do estoque de nitrogênio solúvel inorgânico são denominados como nitrificação, processo biológico responsável pela conversão de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, seguida pela conversão deste em NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Em ambientes aquáticos, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> são as principais fontes de nitrogênio para os produtores primários. O processo de remoção dos principais produtos do ciclo biológico do nitrogênio é denominado de desnitrificação, responsável pela conversão de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para N<sub>2</sub>, na ausência de oxigênio (ESTEVEES, 1988; TUNDISI; TUNDISI, 2008; WEATHERS; STRAYER; LIKENS, 2015).

Estudos com o objetivo de entender a distribuição temporal e espacial dos principais elementos biogeoquímicos (C, N, O e P) no canal principal do rio Amazonas, em escala regional, tem se estabelecido principalmente a montante de Óbidos. Devido às dificuldades operacionais, quanto à geometria do canal principal do rio Amazonas e efeitos estuarinos, entre Óbidos e a pluma amazônica, poucas são as informações quanto a biogeoquímica desta região (MARTINELLI et al., 1989; SAWAKUCHI et al., 2017). Dentre os estudos à montante de Óbidos, destaca-se o projeto “*Carbon in the Amazon River Experiment*” (CAMREX). Projeto

este que buscou compreender os processos que controlam a biogeoquímica da bacia amazônica, realizado entre os anos de 1977 a 1991, de Iquitos no Peru, até Óbidos no Brasil.

O projeto CAMREX foi pioneiro nas análises espaciais e temporais de COD e CID, observando concentrações e taxas de oxidação de carbono constantes ao longo do canal principal e taxas de respiração maiores no período de enchente (RICHEY et al., 1980). O rio Amazonas não apenas exporta significativas frações de carbono orgânico, mas também possui elevadas taxas de mineralização dentro do rio, influenciando na quantidade de CID exportado (RICHEY, 1981a), o qual tende a diminuir ao longo do canal principal (RICHEY; SALATI; DOS SANTOS, 1985). De maneira contrária, aumentos sucessivos nas concentrações de  $\text{NO}_3^-$  foram identificados pelos mesmos autores, apontando a existência de aportes laterais das áreas de várzea.

O padrão de entradas laterais, comentado acima, foi pela primeira vez descrito para a bacia amazônica por (RICHEY, 1982), por meio de um modelo biogeoquímico conceitual, considerando variações espaciais e temporais, no qual a bacia de drenagem consiste em uma rede de rios em ordem crescente, sendo dividida em setores, entre eles as áreas sazonalmente alagáveis, além de setores de terra firme, tributários e canal principal, avaliados de acordo com o estágio da hidrógrafa.

Ambientes sazonalmente alagáveis são importantes componentes da biogeoquímica, ecologia e hidrologia em regiões tropicais, caracterizados como altamente produtivos. Áreas alagáveis amazônicas recebem água e nutrientes de duas fontes diferentes, sua respectiva bacia de drenagem local e o rio pelo qual é caracterizada, os quais promovem flutuações na composição química nas águas de várzea, também influenciando na composição de nutrientes no canal principal (DEVOL et al., 1984; MELACK; FORSBURG, 2001). De acordo com Junk et al. (2011), áreas alagáveis amazônicas são divididas em: a) áreas alagáveis de alta fertilidade (de rio de águas brancas-várzeas); b) fertilidade intermediária (de rios de águas claras); c) fertilidade intermediária tipo B (de rios de águas pretas com níveis intermediários de sólidos suspensos dissolvidos, com origem andina) e d) baixa fertilidade (de rios de águas pretas).

Reduções nas concentrações de CID e NID em ambientes de várzea na bacia amazônica, em comparação ao canal principal, foram registrados por Forsberg et al. (1988), indicando redução de nutrientes biologicamente disponíveis durante o período de estocagem de nutrientes, assim como a absorção de nitrato por algas, estimuladas pelo aumento da transparência após a sedimentação de partículas.

Avaliações espaciais e temporais de carbono e nitrogênio dissolvidos, ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus principais tributários, a montante de Óbidos, também foram realizadas por Devol et al. (1995), Dickinson, Richey e Ribeiro (1987), além de Richey e Victoria (1993, 1996), baseados ainda nos resultados do projeto CAMREX. Nestes estudos, variações espaciais foram semelhantes aos estudos de Richey et al. (1991) e Richey (1981a), citados acima, nos quais concentrações maiores de COD e CID foram registradas nos tributários, em comparação ao canal principal do rio Amazonas, ao passo que, maiores concentrações de  $\text{NO}_3^-$  foram registradas no canal principal do rio Amazonas. Quanto a variações longitudinais no canal principal do rio Amazonas, não houve variações significativas à jusante para as concentrações de COD e NOD, de maneira contrária as frações inorgânicas, CID e  $\text{NO}_3^-$ , diluídas pelos tributários. Por meio do balanço de massa anual, evidenciou-se sumidouros de COD (-37%), possivelmente devido a respiração, e fontes não contabilizadas de  $\text{NO}_3^-$  (+33%), assim como padrão conservativo para o CID (+1%).

Também por meio do balanço de massa, Patel et al. (1999) registraram perdas de, aproximadamente, 20% de carbono total no canal principal do rio Amazonas, entre Óbidos e Taperinha-PA (próximo a Santarém-PA), atribuindo tal resultado à flocculação da matéria orgânica, degradação ou adsorção nas partículas finas, uma vez que, o processo de diluição pelo rio Tapajós é descartado tendo em vista sua pequena contribuição na vazão do canal principal. O estudo acima é interligado ao projeto “Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica” (HIBAM), que, por sua vez, foi apoiado pelo projeto “*Environmental intertropical Geosphere program*”, o qual avaliou a dinâmica sazonal e espacial do rio Amazonas e seus principais tributários, com campanhas entre novembro de 1995 e julho de 1996 (LE POUPON; BENAÏM, 2004).

No que se refere às variações temporais, resultados distintos foram observados nos estudos citados anteriormente. Variações sazonais não significativas quanto ao COD no canal principal do rio Amazonas a partir de medições realizadas até Óbidos, foram observadas por Richey et al. (1980) e Richey e Victoria (1993), ao passo que as maiores concentrações médias no período de enchente foram observadas por Richey et al. (1991). Concentrações de CID são correlacionadas positivamente com a vazão, como descrito por Richey, Salati e Dos Santos (1985), semelhante às concentrações de nitrato, descrito por Devol et al. (1995). Quanto às concentrações de NOD, semelhante ao observado para a fração de COD no rio Amazonas, Richey et al. (1991) registraram concentrações constantes, padrão diferente do observado por Richey e Victoria (1993), com maiores concentrações de NOD, ao final do período de enchente.

A vulnerabilidade da bacia amazônica e mudanças na dinâmica de seus nutrientes foi abordada por Richey et al. (1997), os quais presumiram um aumento do fluxo de materiais à medida que mudanças antrópicas se intensificam. Contudo, Guyot e Wasson (1994) apontam a importância da regionalização das predições em grandes bacias, propondo a avaliação de tais mudanças nos fluxos de acordo com a origem do substrato. Lewis et al. (1999), em estudo de bacias hidrográficas com poucos distúrbios antrópicos, registraram correlação positiva de nitrogênio com a área de escoamento superficial da bacia hidrográfica em questão, com decréscimos de NOD em rios de ordem maiores. Padrão inverso para as concentrações de COD foi observado por Hedges et al. (2000), em seus estudos nos tributários bolivianos do rio Amazonas, em comparação ao canal principal.

Devido à necessidade do entendimento do rio como uma via de interligação dos processos terrestres com o oceano, considerando o gradiente dos fatores físicos formados por sua rede de drenagem no entendimento de sua dinâmica (teoria do contínuo fluvial), como proposto por Vannote et al. (1980), estudos biogeoquímicos na porção final da bacia amazônica foram desenvolvidos como resultado do projeto denominado “*River Ocean Continuum of the Amazon*” (ROCA), abrangendo a região de Óbidos até a pluma amazônica, de 2010 a 2014.

A partir do ano de 2014, o projeto “*Net Ecosystem Exchange of the Lower Amazon River: From Land to the Ocean and Atmosphere*” (TROCAS) promove a continuidade de seu antecessor, ROCA, no entendimento holístico da dinâmica biogeoquímica na região do baixo rio Amazonas, buscando entender como os efeitos de marés semidiurno afetam a distribuição e transformação de nutrientes próximo a foz da bacia amazônica (GAGNE-MAYNARD et al., 2017; MEDEIROS et al., 2015; SAWAKUCHI et al., 2017; SEIDEL et al., 2015; VALERIO et al., 2018; WARD et al., 2013, 2015, 2016, 2018).

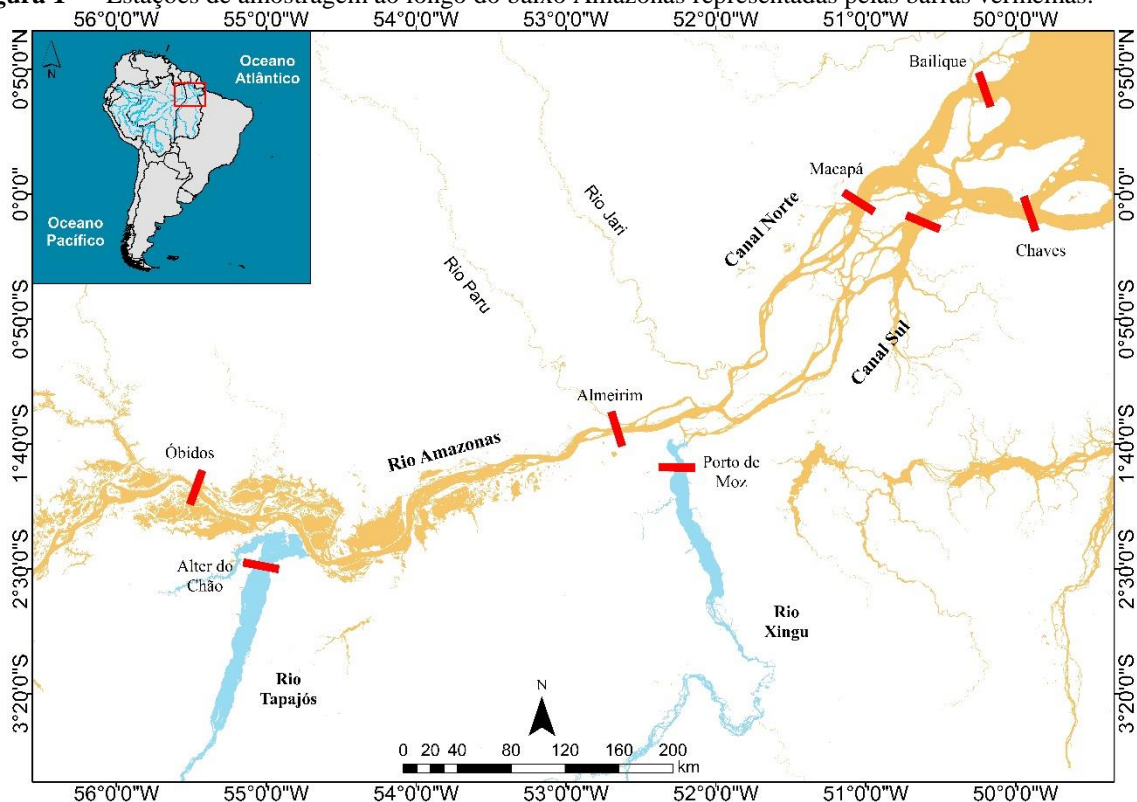
A partir deste projeto, Ward et al. (2015) registraram aumentos a jusante nas concentrações de COD entre Óbidos e a foz da bacia amazônica, padrão semelhante aos estudos de Seidel et al. (2015), realizado entre a foz da bacia amazônica e o oceano atlântico. De maneira contrária, Ward et al. (2016), durante os períodos de maior e menor vazão, registraram variação não significativas de COD entre Óbidos e a foz da bacia amazônica. Valerio et al. (2018), por sua vez registraram decréscimos nas concentrações de COD, ao longo dos 4 períodos hidrológicos (maior e menor vazão, enchente e vazante).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

Os locais de amostragem encontram-se distribuídos ao longo do canal principal do rio Amazonas. O limite a montante deste estudo foi a estação de medição histórica, Óbidos-PA (S 01°56'22", O 055°30'14.7"). O limite a jusante foram as estações próximas a cidade de Chaves-PA (S 00° 09' 17.2", O 49°59'12.65") e ao arquipélago de Bailique-AP (S 00° 44'560", O 50°13'12.72"), próximo a foz. Além destas, no canal principal do rio Amazonas, foram incluídas estações de amostragens próximas a cidade de Almeirim-PA (S 01°34'607", O 052°40'104") e Macapá-AP, nos dois últimos canais bem definidos próximo a foz do rio Amazonas, canal norte (S 00°03'689", O 051°01'800") e sul (S 00° 09'694", O 050° 37'389"). Ademais, nos tributários de águas claras, estações de amostragem estão localizadas em frente às localidades de Alter do Chão-PA (S 02°29'00.4", O 055°01'08.3"), no rio Tapajós, e Porto de Moz-PA (S 01°46' 535", O 52°14'711"), no rio Xingu (Figura 1).

**Figura 1** — Estações de amostragem ao longo do baixo Amazonas representadas pelas barras vermelhas.

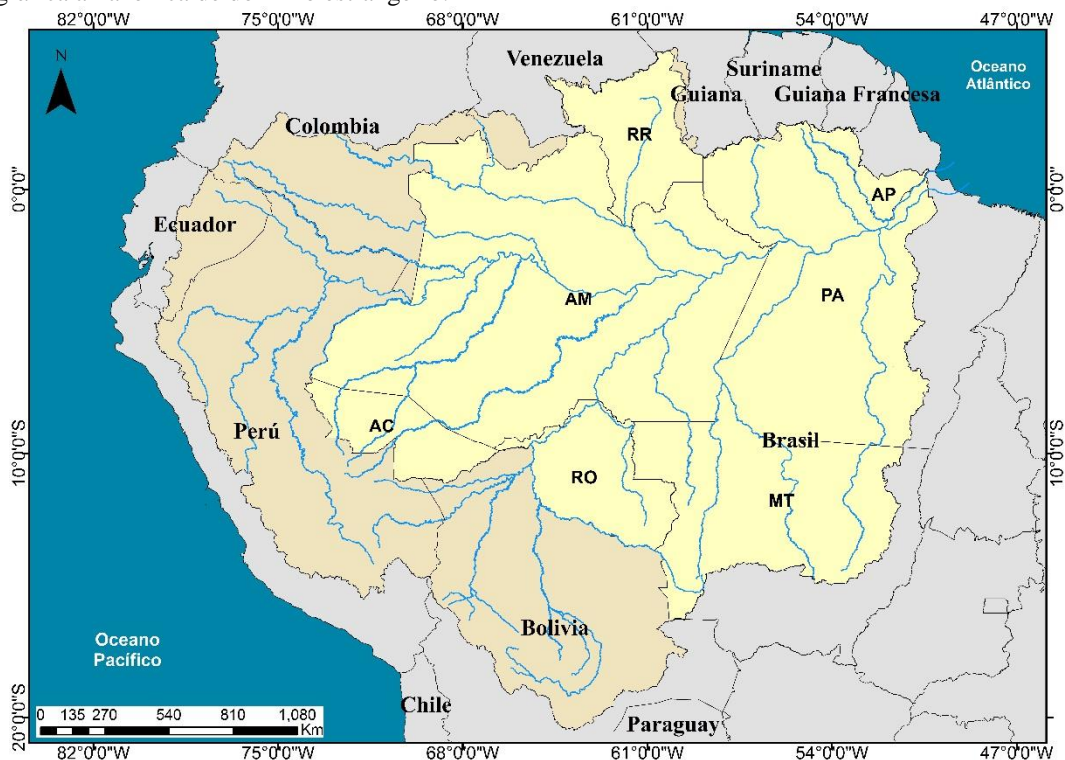


Fonte: O autor.

As referidas estações de amostragem abrangem a porção final da bacia hidrográfica do rio Amazonas, denominada como região do Baixo Amazonas. Esta bacia hidrográfica configura-se como a maior bacia hidrográfica do planeta. Sua área de drenagem possui,

aproximadamente,  $6,7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ , tendo seu canal principal fluindo no sentido oeste-leste. A vazão média é de, aproximadamente,  $200 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , representando cerca de 20% da descarga mundial em direção ao mar (COE et al., 2002; RICHEY; NOBRE; DESER, 1989). Cerca de 63% da sua área de drenagem está no território brasileiro, distribuídos entre sete estados, Pará, Amazonas, Acre, Rondônia, Roraima, Mato Grosso e Amapá. Contudo, sua extensão vai além do território nacional, abrangendo países como Colômbia, Venezuela, Peru, Bolívia, Equador e Guiana (Figura 2) (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2006).

**Figura 2** — Região hidrográfica amazônica. A área em amarelo representa a extensão territorial da bacia hidrográfica amazônica pertencente ao Estado brasileiro, enquanto que a área em marrom representa a bacia hidrográfica amazônica de domínio estrangeiro.



Fonte: O autor.

A porção final da bacia hidrográfica do rio Amazonas compreende a região de Óbidos até sua foz, com aproximadamente  $76 \cdot 10^4 \text{ km}^2$ , representando 13% de toda bacia hidrográfica (WARD et al., 2018). Esta região é composta por sub-regiões hidrográficas, tais como a do Tapajós, que inclui as bacias dos rios Teles Pires e Juruema, seus principais formadores; as bacias hidrográficas dos rios Iriri e Xingu, formando a sub-região hidrográfica do Xingu; sub-regiões hidrográficas Paru, Jari e, por fim, a Amapá Litoral, a qual flui diretamente para o oceano (MMA, 2006).

O baixo Amazonas apresenta canais largos, com águas de coloração ocre, concentração elevada de sólidos dissolvidos e pH de alcalino à neutro. Ao longo de seu curso, conecta-se

com lagos de várzea, florestas inundadas e grandes tributários de águas claras, estes últimos caracterizados pela baixa turbidez, baixa carga de íons dissolvidos, elevada variação de pH e altos níveis de produção primária (MOLLERI; NOVO; KAMPEL, 2010; NOBRE et al., 2009; SAWAKUCHI et al., 2017; SIOLI, 1985).

### **3.2 Características Fisiográficas**

Das nascentes até sua foz, no oceano atlântico, o rio Amazonas integra diversas regiões, com características morfológicas distintas, tais como, a região andina, caracterizada por elevada taxa de erosão e transporte de altas cargas de sedimento recente; áreas sedimentar, com diferentes fitofisionomias florestais e formações geológicas; além dos escudos das guianas e Brasil central, região de geologia mais estável, menos propício a erosão. Cada um destes ambientes, com suas características peculiares de geologia, vegetação e clima, é responsável pela formação de diferentes tipos de águas. Basicamente, os rios amazônicos distinguem-se em três tipos de água, divididas por suas cores: águas brancas, com alta carga de material inorgânico em suspensão; águas pretas, com altas cargas de substâncias húmicas; e águas claras, com baixa carga de material em suspensão (SIOLI, 1985).

Ademais, transbordamentos laterais sazonais dos rios de águas brancas e pretas permitem a formação de um novo ambiente, peculiar a esta bacia, denominados de planícies de inundação (várzeas e igapós, respectivamente). A troca lateral entre o canal principal do rio Amazonas (águas brancas) e suas áreas inundáveis adjacentes formam um quarto tipo de água, de acordo com Devol et al. (1984), denominado de “águas brancas decantadas”, formadas após o aprisionamento por lagos e posterior deposição de sólidos em suspensão advindos do canal principal.

Áreas de várzea são caracterizadas por sua alta produtividade, fonte de proteína para populações locais e alta produtividade primária algal, quando comparada aos rios de águas pretas (DEVOL et al., 1984; FORSBERG et al., 1988). Estes ambientes ocorrem em grandes extensões ao longo da bacia hidrográfica amazônica, cobrindo uma área maior que  $400.10^3 \text{ km}^2$ ; deste total, 12% está localizado em sua porção final (baixo rio Amazonas), variando significativamente quanto à forma e tamanho (MELACK, 1984; MELACK; HESS, 2010).

A inundação periódica influencia na ciclagem de nutrientes, devido aos aportes do canal principal e posterior armazenamento destes nutrientes (FORSBERG et al., 1988), determinando a quantidade e disponibilidade de nutrientes que são exportados durante o ciclo hidrológico (JUNK; WEBER, 1996). Ao longo da bacia amazônica percebe-se diferenças significativas

quanto a amplitude de inundação, a qual tem influência na pressão hidrostática, intensidade de luz e concentração de oxigênio nas camadas mais profundas, variando entre 10 a 15 m para o alto e médio rio Amazonas e de 4 a 6 m para o baixo Amazonas. Na região do baixo Amazonas ocorre ainda efeitos de maré, alcançando mais de 100 km rio acima (JUNK et al., 2011; JUNK; WEBER, 1996).

O efeito de maré, de forma geral, possui forma sinusoidal, sendo responsável pelo amortecimento do fluxo do rio Amazonas até as proximidades de Óbidos e inversão do fluxo durante o pico de maré crescente, próximo à foz do rio Amazonas. Ciclos de maré semidiurno ocorrem no período de 12 horas e 25 minutos, aproximadamente, sendo o principal componente das alterações cíclicas no nível d'água nos estuários do rio Amazonas, com influência nos processos de deposição e exportação de nutrientes, ocasionando alta variabilidade do material em suspensão (KOSUTH et al., 2009; WARD et al., 2015, 2018).

Quanto à vegetação, a bacia hidrográfica do rio Amazonas está inserida no bioma amazônico, com alta diversidade florestal. Os principais tipos de formações florestais encontrados são as florestas ombrófilas densas e abertas, vegetações típicas de savanas, campinaranas, formações pioneiras e de refúgio vegetacionais (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2010). Florestas alagáveis ocupam uma significativa porção das áreas laterais sazonalmente inundáveis, variando taxonomicamente em função das características dos rios que as caracterizam. Florestas de várzea, devido a maior quantidade de nutrientes depositados por rios de águas brancas, são mais produtivas e menos diversas, ao passo que, florestas de igapó (rios de água preta) são mais diversas, resultado também do menor período de inundação, ocasionando menor estresse vegetal.

### **3.3 Características Pedológicas**

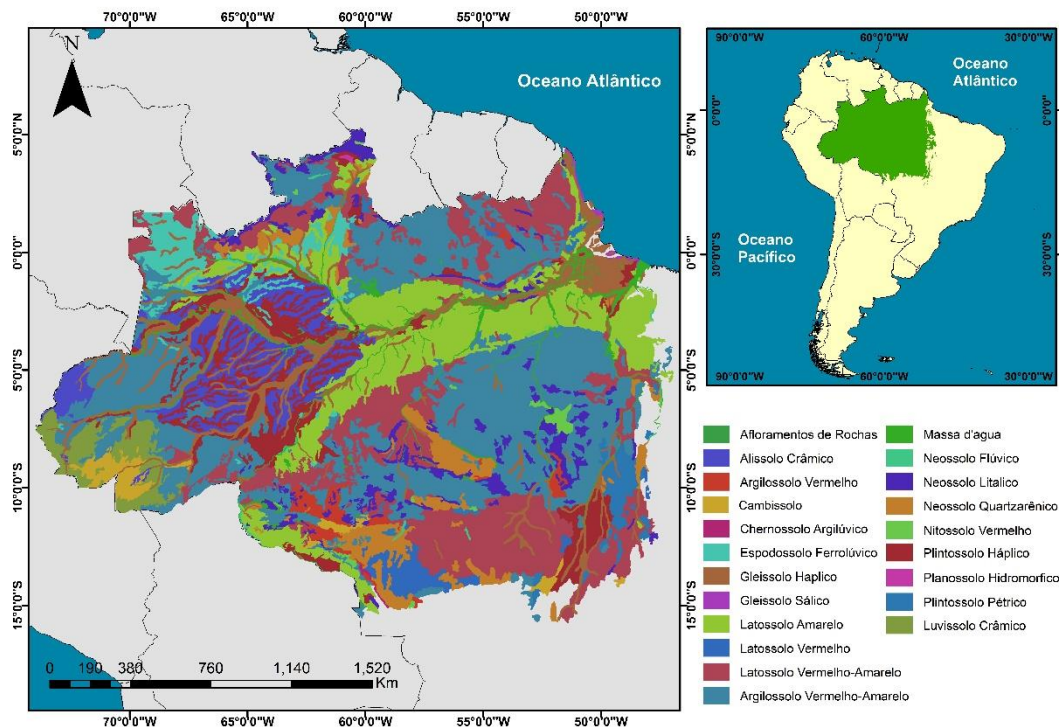
Os solos amazônicos são caracterizados por sua composição química e mineralógica diversificada (Figura 3), as quais são influenciadas pelo material de origem e condições climáticas, regionais e locais. No que se refere ao oeste amazônico, são encontrados, principalmente, (A) Espodossolos (bacia do rio Negro), os quais possuem textura arenosa ao longo do perfil, associada à elevada precipitação pluviométrica, contribuindo para o processo de arenização e empobrecimento do solo; (B) Argissolos e Plintossolos (alto rio Amazonas), o primeiro é caracterizado por abranger uma enorme gama de solos, os quais apresentam como característica em comum, o horizonte B textural, com maiores concentrações de argila, em relação aos horizontes superiores; o segundo caracterizado por sua formação sujeita a condições



de excesso de umidade, portanto, trata-se de solos mal drenados; C) Luvisolos Crômicos e Cambissolos, definidos como solos eutróficos, com alta saturação por bases e teores elevados de minerais primários e solos em estágio intermediário de intemperismo, com horizonte B incipiente, respectivamente (OLIVEIRA, 2011; SCHAEFER et al., 2017).

Ao leste, são encontrados, de maneira geral, (A) Neossolos Flúvicos ou Gleissolos (áreas de várzea, zona litorânea e Marajó), setores pedológicos recentes, com estreita relação com o material de origem, nos quais os processos pedogenéticos são limitados pelo nível elevado do lençol freático e inundações periódicas, fatores que, por sua vez mantêm relação direta entre a maior fertilidade natural deste ambiente e maior diversidade mineralógica; (B) Argissolos e Latossolos Vermelho-Amarelo (médio e baixo amazonas), setores de terras firmes, formados por sedimentos mais antigos ou rochas cristalinas, com boas condições de drenagem e intensa atuação de agentes bioclimáticos, percebido por seu intenso intemperismo químico (OLIVEIRA, 2011; SCHAEFER et al., 2017).

**Figura 3** — Mapa de solos da bacia amazônica.



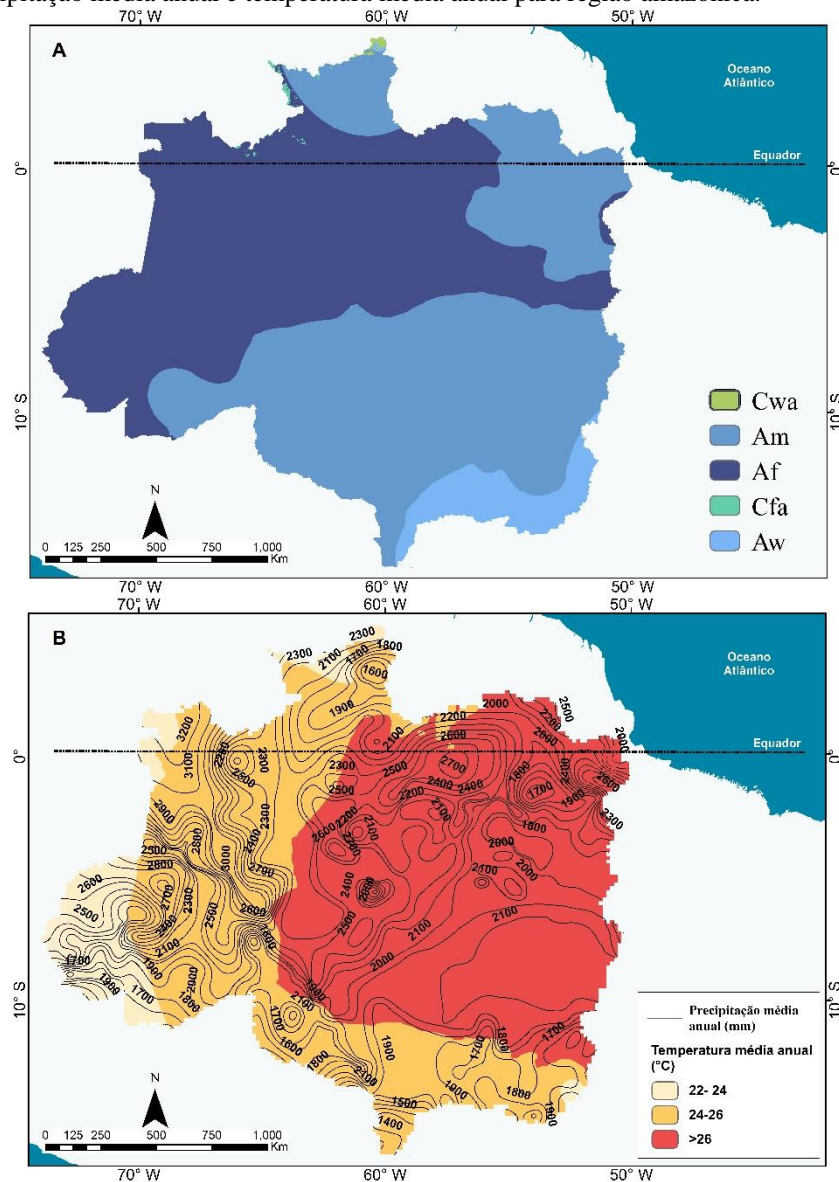
Fonte: O autor.

### 3.4 Características Climáticas e Hidrológicas

Com relação às características climáticas, de acordo com o critério definido por Koppen - Geiger, os tipos climáticos Af e Am (A= tropical; f= sem estação seca; m= monções) predominam sobre a bacia amazônica, com pequenas manchas dos tipos climáticos Cwa e Cfa

(C= subtropical úmido; f= clima oceânico; w= inverno seco; a=verão quente), resultado da interação local entre altitude e latitude (Figura 4 A). A temperatura média do ar não apresenta grandes variações (NOBRE et al., 2009), com médias superiores à 26°C para a região do baixo Amazonas (Figura 4 B) (ALVARES et al., 2013). Diferentemente do que ocorre com a temperatura, a precipitação apresenta uma heterogeneidade entre as regiões da bacia. De forma geral, a precipitação média da região do baixo Amazonas varia entre 2.200 a 3.100 mm ano<sup>-1</sup>, com o aumento progressivo dos índices pluviométricos no sentido oeste-leste e sul-norte, com índice pluviométrico mais elevado próximo a foz e ao noroeste da bacia (Figura 4 B) (ALVARES et al., 2013; SORRIBAS et al., 2016).

**Figura 4** — (A) Tipos climáticos predominantes na bacia amazônica, segundo critério utilizado por Koppen – Geiger. (B) Precipitação média anual e temperatura média anual para região amazônica.

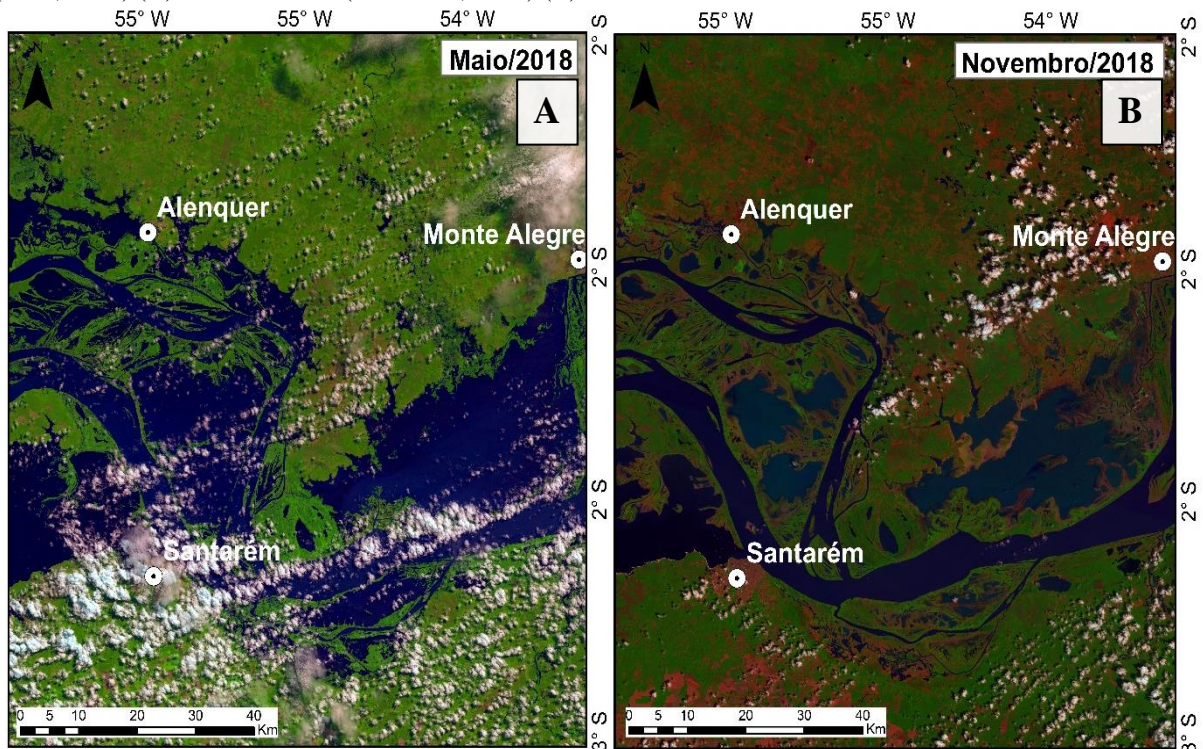


Fonte: O autor

A variação da vazão de um manancial hídrico está correlacionada ao regime pluviométrico dentro da bacia hidrográfica, portanto, evidencia-se diversos regimes de descarga na região (MOLINIER et al., 1996). No rio Amazonas verifica-se aumentos progressivos quanto à vazão, no sentido oeste-leste, de fevereiro a maio, atingindo seus valores máximos em meados de maio, aumentando a área inundada (Figura 5 A); a partir de junho, sua vazão e, por conseguinte, a área inundada decresce, com valor mínimo de vazão em novembro (Figura 5 B) (COE et al., 2002). Óbidos, limite à montante do domínio de estudo, possui vazão média de  $167.10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , ao passo que, próximo à Macapá, seus canais norte e sul, possuem vazão média de  $73.10^3$  e  $110.10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (WARD et al., 2018), um total de  $183.10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  na foz do Amazonas.

Os principais tributários de água clara do rio Amazonas a jusante de Óbidos, são os rios Tapajós e Xingu, que possuem variações sazonais intensas, com picos de descarga entre os meses de fevereiro a maio (BERTASSOLI et al., 2017). O Tapajós possui vazão média de, aproximadamente,  $8.10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , variando entre  $3.10^3$  a  $30.10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , ao passo que o Xingu possui média de  $9.10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , variando entre  $1.10^3$  a  $20.10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  respectivamente (WARD et al., 2018).

**Figura 5** — Rio Amazonas nas proximidades do município de Monte Alegre-PA, nos períodos de maior vazão (maio, 2018) (A) e menor vazão (novembro, 2018) (B).



Fonte: O autor.

### 3.5 Desenho Experimental

Primeiramente definiu-se os períodos hidrológicos estudados, os quais estão de acordo com Valerio et al. (2018). Os primeiros três meses do ano (janeiro, fevereiro e março) referem-se ao período hidrológico de enchente, seguidos dos períodos de maior vazão (abril, maio e junho), vazante (julho, agosto e setembro) e menor vazão (outubro, novembro e dezembro).

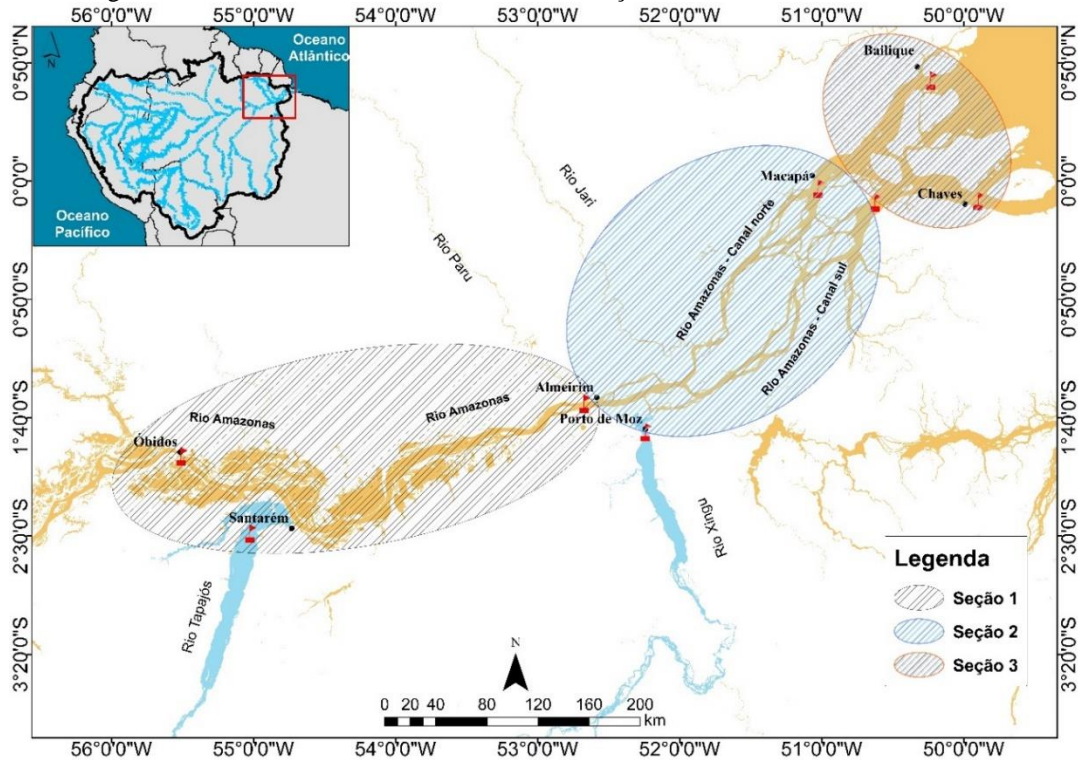
As coletas de água foram realizadas no período de maio de 2014 a maio de 2017, em um total de seis expedições. Em quatro expedições (maio/14-maior vazão, novembro/14-menor vazão, julho/2015-vazante e fevereiro/2016-enchente) as coletas foram de Óbidos, limite à montante, distante cerca de 850 km da foz, até seus limites mais à jusante, canais norte e sul, próximos a cidade de Macapá. Em duas expedições (novembro/16 e abril/17), as amostragens foram realizadas apenas nas estações localizadas no canal norte e sul, próximo a Macapá e nas estações de amostragem próximas as cidades de Chaves e o arquipélago de Bailique, pertencente ao Amapá.

De forma geral, no canal principal do rio Amazonas, as amostragens foram realizadas na margem direita, meio e margem esquerda, diferentemente dos tributários, Chaves e Bailique (canal principal) onde a coleta foi realizada apenas no meio do rio. Em todas as estações de amostragem, as obtenções das amostras ocorreram em duas profundidades para maior representatividade do ambiente estudado, próximas a superfície e à 50% de profundidade do rio, por meio de uma bomba de imersão, com malha de 297  $\mu\text{m}$ , a qual bombeou a água do rio para dentro de uma proveta graduada de 2 litros. As amostragens foram iniciadas após o volume da proveta transbordar 3 vezes. Durante a coleta, foi mantido um fluxo contínuo de água para o interior da proveta, a fim de se ter uma amostra mais representativa do ambiente em estudo.

A fim de facilitar o entendimento das análises, considera-se três seções ao longo do canal principal do rio Amazonas (Figura 6). A primeira (seção 1), que compreende a região entre Óbidos até Almeirim, na qual os ciclos de marés semidiurno têm menos influência; a segunda (seção 2), entre a estação próxima a Almeirim e as estações Macapá norte e sul, próximo à foz do rio Amazonas, na qual há maior influência dos ciclos de marés semidiurno; a terceira (seção 3), abrange a região entre as estações Macapá norte e sul até as estações de Bailique e Chaves.



**Figura 6** — Região do baixo rio Amazonas dividida em três seções.



Fonte: O autor.

### 3.6 Métodos Amostrais e Analíticos

As primeiras amostras coletadas foram destinadas à determinação das concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) (Figura 7 A), as quais foram filtradas com membrana de fibra de vidro, do tipo Whatmann GF/F, porosidade 0,7  $\mu\text{m}$ , e armazenadas em frascos de borosilicato (capacidade volumétrica de 20 ml), ambos previamente calcinados à temperatura de 500  $^{\circ}\text{C}$ , por 5 horas. As amostras foram preservadas, em campo, com 25  $\mu\text{L}$  de HCl (50%). Posteriormente foram coletadas as amostras para determinação das concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID), nitrogênio total dissolvido (NTD) e íons amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) e nitrito ( $\text{N-NO}_2^-$ ), filtradas com filtros de acetato de celulose, porosidade de 0,45  $\mu\text{m}$ , armazenadas em frascos de polietileno de alta densidade (60 ml) e preservadas com thymol (100 mg/1000 mL de solução) (Figura 7 B).

As concentrações de COD e NTD foram determinadas por meio de absorção infravermelha gerada após combustão a 690 $^{\circ}\text{C}$ , no equipamento Shimadzu, modelo TOC-VCPH. O mesmo equipamento foi empregado para a quantificação do CID, neste caso apenas com a acidificação da amostra e carreamento para o detector do  $\text{CO}_2$  resultante deste processo. As frações inorgânicas de nitrogênio foram determinados por calorimetria em sistema por injeção em fluxo automatizado marca Foss, modelo Fiastar 5000. A concentração de NOD foi

obtida pela diferença entre a fração NTD e as frações inorgânicas (nitrito, nitrato e amônio). Todas as análises foram efetuadas no Laboratório de Análises Ambientais e Ecologia Isotópica do CENA – USP.

**Figura 7** — (A) frascos de boro-silicato; (B) membrana de fibra de vidro, do tipo Whatmann, GF/F, porosidade 0,7  $\mu\text{m}$ ; (C) frascos de polietileno de alta densidade; e (D) filtros de acetato de celulose.



Fonte: O autor.

Em campo foram determinados os parâmetros físico-químicos, oxigênio dissolvido, pH, temperatura e condutividade elétrica. As concentrações de oxigênio dissolvido foram determinadas pelo medidor portátil YSI 55. Temperatura e pH, por meio de um medidor Thermo Orion 4-star e a condutividade elétrica foi medida por meio do condutivímetro portátil VWR International - modelo 2052 (Figura 8).

**Figura 8** — Medidores portáteis de oxigênio dissolvido, pH, temperatura e condutividade elétrica da água.

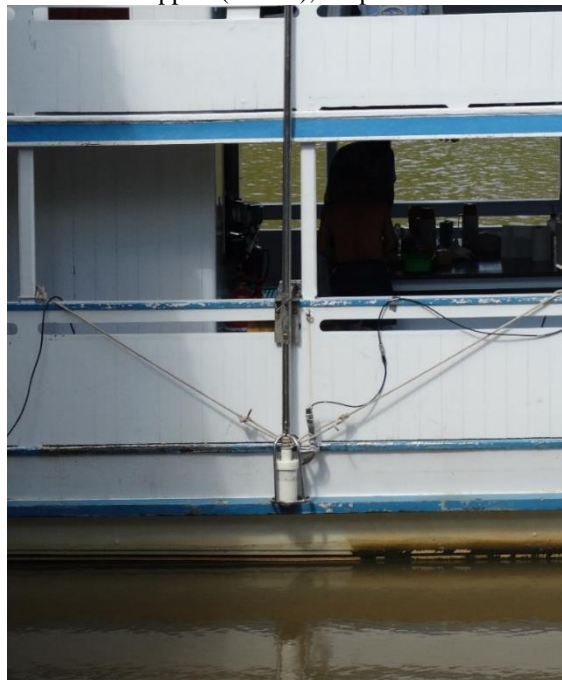


Fonte: O autor.

Em todas as expedições de campo também foram determinadas as vazões nas estações de Óbidos, Almeirim, canal norte e sul, no canal principal do rio Amazonas, por meio da utilização do Medidor Acústico de Efeito Doppler (ADCP) (Figura 9). O equipamento, utiliza-se do lançamento, em movimento, de ondas sonoras para obtenção de perfis de velocidade tridimensionais e profundidade da coluna d'água, os quais podem ser usados para descrever a estrutura de fluxo (EOM; SEO; RYU, 2017; KOSTASCHUK; VILLARD; BEST, 2004).

Para fins comparativos, os dados de vazão medidos nas expedições foram comparados com os dados de vazão das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas – ANA, mais próximas das cidades de Óbidos (canal principal do Amazonas) e Porto de Moz (rio Xingu). A vazão do rio Tapajós foi obtida do projeto SO HYBAM (Controle geodinâmico, hidrológico e biogeoquímico da erosão/alteração e transporte de material nas bacias do Amazonas, Orinoco e Congo), vinculado às redes hidrométricas da ANA. Nas estações onde não há o controle mensal de vazão (Almeirim e canais norte sul, próximos a Macapá), valores mensais foram obtidos de acordo com cálculos semelhantes aos realizados por Ward et al. (2015). Na estação de Almeirim a vazão foi determinada por meio da soma das vazões registradas em Óbidos, Tapajós e Xingu (estação de Almeirim). Para o cálculo das vazões nos canais norte e sul, somando-se as vazões verificadas em Óbidos, Tapajós e Xingu, multiplicadas pela proporção de contribuição de cada canal, em cada período hidrológico, para a vazão total no exutório da bacia hidrográfica em estudo.

**Figura 9** — Medidor Acústico de Efeito Doppler (ADCP), acoplado ao barco.



**Fonte:** O autor.

### 3.7 Análise Estatística e Cálculo de Balanço de Massa

A análise espacial consiste em comparações entre as médias obtidas no canal principal do rio Amazonas (média entre as estações de amostragem de Óbidos, Almeirim, canais norte e sul, próximos a Macapá) e tributários de águas claras (média entre as estações de amostragem nos rios Tapajós e Xingu). Para esta análise as amostragens realizadas em novembro de 2016 e maio de 2017 não foram consideradas devido a não realização de amostragens nos tributários.

Análises espaciais longitudinais ao longo do canal principal também foram realizadas a fim de comparar as estações de amostragem localizadas de Óbidos até a foz da bacia. Desta forma, comparações foram realizadas entre os períodos de maio de 2014 a fevereiro de 2016, abrangendo os 4 períodos hidrológicos. Posteriormente, comparações longitudinais ocorreram entre as estações nos últimos canais bem definidos, canal norte e sul, até as estações de amostragem de Chaves e o arquipélago de Bailique, durante os períodos de menor vazão (novembro/2016) e maior vazão (maio/2017).

Ademais, análises sazonais consistem em comparações entre os períodos hidrológicos estudados, no canal principal e tributários de águas claras, separadamente.

Diferenças entre margem esquerda, direita e meio (canal principal), além de diferenças entre superfície e profundidade (todas as estações de amostragem) foram desconsideradas após testes prévios de diferença entre médias. Testes de normalidade de “Shapiro-Wilk” foram realizados ( $\alpha < 0,05$ ), rejeitando a hipótese nula para todas as variáveis.

Comparações espaciais entre canal principal e tributários foram realizadas por meio do teste não paramétrico para duas amostras independentes, denominado “Mann-Whitney”. Comparações entre os períodos hidrológicos, no canal principal e nos tributários, foram efetuadas pela extensão do teste anterior, para três ou mais amostras independentes, denominado “Kruskal-Wallis”, seguido de testes de comparação múltipla, *post hoc*, denominado “Nemenyi”. Todos os testes foram realizados a nível de significância de 5%.

Para avaliação dos possíveis fatores simultâneos que influenciam a variabilidade dos dados, análises de componentes principais (ACP) foram realizadas. Destaca-se a não inclusão do parâmetro condutividade elétrica no modelo, tendo em vista o não registro de dados no período de maior vazão, de Óbidos até Macapá norte e sul.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* RStudio, versão 1.1.453 (<http://www.r-project.org>), por meio dos pacotes *stats*, *ggplot* e *factorextra*.

No canal principal, as variações longitudinais dos fluxos estudados, entre a estação mais a montante (Óbidos) até a foz, foram analisadas por meio do balanço de massa, sendo



considerada apenas as seções 1 e 2, tendo em vista que, no período de amostragem das estações próximas a Bailiqui e Chaves não foram realizadas amostragens de Óbidos até a foz.

A partir do balanço de massa é possível determinar a magnitude dos processos externos e internos de uma determinada seção de um rio, considerando ser composto por seções conectadas (RICHEY et al., 1991).

Para cada seção o balanço do fluxo para as frações dissolvidas foi calculado de acordo com a equação 1.

$$\Delta F = (F_e + F_{tr}) - F_s \quad (1)$$

Possíveis anomalias ( $\Delta F\%$ ) no fluxo foram identificadas de acordo com a equação 2:

$$\Delta F = \left[ \frac{F_s}{F_e - F_{tr}} - 1 \right] \times 100 \quad (2)$$

Onde,

$\Delta F$ = desequilíbrio cumulativo;

$F_e$ = fluxo de entrada, a montante;

$F_{tr}$ = fluxo de entrada referente aos tributários;

$F_s$ = fluxo de saída, a jusante.

Anomalias positivas indicam a não contabilização de fontes para o modelo para a respectiva seção, enquanto que, anomalias negativas indicam a não contabilização de sumidouros para determinada seção.

Para o cálculo do fluxo médio do rio Amazonas, foram consideradas apenas as estações nos canais norte e sul, próximos a Macapá, onde as medições de vazão via ADCP são viáveis pela boa definição de seus canais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Vazão

Os resultados das mensurações de vazão via ADCP foram semelhantes aos dados da ANA e do projeto SO HYBAM (Tabela 1). De 2014 a 2016, em Óbidos, a vazão média foi  $189 \pm 77 \text{ } 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , levemente acima das médias registradas por Ward et al. (2015) durante os períodos de 2000 a 2012 e 2010 a 2012 ( $178 \pm 65$  e  $176 \pm 64 \text{ } 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente).

Apesar deste leve aumento na vazão média no período de 2014 a 2016, em relação a de 2000 a 2012, foram observados decréscimos sucessivos nos anos de 2014, 2015 e 2016. Em Óbidos, os valores médios de vazão nestes períodos foram  $206 \pm 63$ ;  $193 \pm 70$  e  $148 \pm 43 \text{ } 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, padrão também observado para as outras estações de amostragem (Figura 10).

A vazão média do rio Amazonas, próximo à foz, nos canais norte e sul foram de  $105 \pm 33$  e  $134 \pm 62 \text{ } 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, durante o período de estudo. No canal sul são verificadas as maiores médias de vazão nos períodos de enchente, maior vazão e vazante, representando entre 57 a 68% da vazão total exportada pela foz. Contudo, durante o período de menor vazão o padrão se inverte, sendo observado maior vazão média no canal norte, representando cerca de 66% do total da vazão registrada em ambos os canais próximo a Macapá. Próximo a foz da bacia hidrográfica amazônica, condições climáticas são influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e circulações locais relacionado a linhas de instabilidades, promovendo altos índices pluviométricos, principalmente na região mais ao norte da bacia (canal norte) (NOBRE et al., 2009). Maiores níveis de precipitação nesta região da bacia, podem estar correlacionados a maior taxa de descarga no canal norte no período de menor vazão.

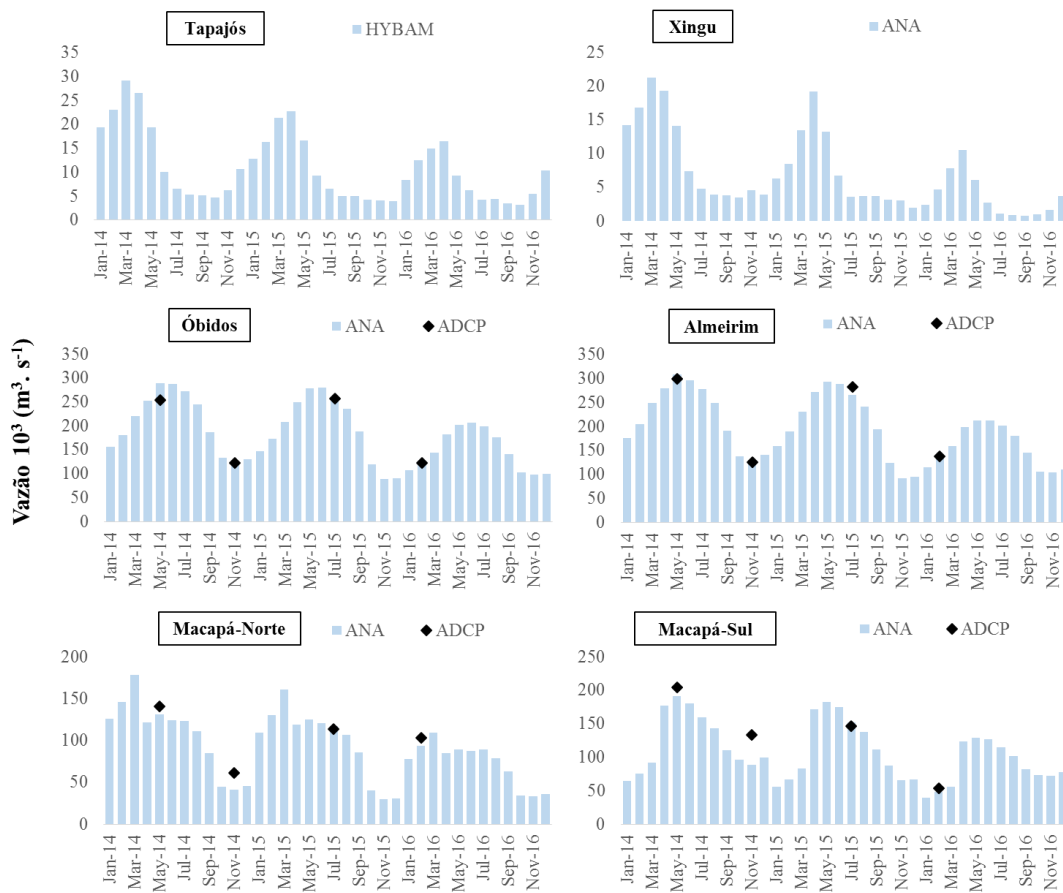
Quanto aos tributários de águas claras, rios Tapajós e Xingu, a vazão média foi de  $18 \pm 11 \text{ } 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , semelhante à média de  $17 \pm 18 \text{ } 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , registrada por Ward et al. (2015), no período de 2010 - 2012.

**Tabela 1** - Vazão ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.

Rio	Vazão ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )				
	Mai-2014	Nov-2014	Jul-2015	Fev-2016	2014-2016
Rio Tapajós <sup>1</sup>	19	6	6	13	11 ± 7
Rio Xingu <sup>2</sup>	15	5	4	5	7 ± 5
Rio Amazonas – Óbidos <sup>3</sup>	254	122	257	122	189 ± 77
Rio Amazonas – Almeirim <sup>3</sup>	299	125	283	137	211 ± 93
Rio Amazonas – Macapá Norte <sup>3</sup>	141	62	113	104	105 ± 33
Rio Amazonas – Macapá Sul <sup>3</sup>	204	133	146	53	134 ± 62

Fonte: O autor.

<sup>1</sup> Base de dados do projeto SO HYBAM; <sup>2</sup> Base de dados da ANA; <sup>3</sup> Medição via ADCP.

**Figura 10** — Vazões registradas ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários (Tapajós e Xingu) durante o período de 2014 a 2016.

Fonte: O autor.

## 4.2 Análises Físico-Químicas

A condutividade elétrica da água no canal principal do rio Amazonas variou entre 53 a 91  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , com média de  $65 \pm 10 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Tabela 2), superior ( $p < 0,05$ ) à média de  $22 \pm 2 \mu\text{S cm}^{-1}$  nos tributários de águas claras. Caracterizados pela baixa quantidade de eletrólitos, os tributários do rio Amazonas são responsáveis pela diluição deste, promovendo o decréscimo da

condutividade elétrica da água de, aproximadamente,  $100 \mu\text{S cm}^{-1}$ , próximo aos Andes, para cerca de  $40 \mu\text{S cm}^{-1}$ , em sua porção final, de acordo com Junk et al. (2011). Diferenças sazonais foram registradas somente no canal principal do rio Amazonas, devido o maior aporte de material alóctone, o maior valor médio foi registrado durante o período de enchente ( $78 \pm 8 \mu\text{S cm}^{-1}$ ).

O pH no canal principal do rio Amazonas variou de 5,8 a 7,3, com valor médio de  $6,8 \pm 0,4$ , próximo a neutralidade, característico de rios de águas brancas (Tabela 2). Nos tributários de águas claras, os quais possuem pequenas quantidades de sedimentos e sólidos dissolvidos, o pH médio foi de  $6,4 \pm 0,6$ , variando de 7,3 a 5,5, um pouco mais ácido em relação ao canal principal do rio Amazonas. Segundo Junk et al. (2011), espera-se pH mais ácido (5 a 6) nos tributários de águas claras, contudo, neste estudo isto é mais evidente apenas nos períodos de maior vazão e enchente.

No canal principal do rio Amazonas, durante o período de vazante, menores valores de pH são observados, resultado também da oxidação de substratos lábeis provenientes das áreas adjacentes ao rio (MOREIRA-TURCQ et al., 2003). Os substratos advindos de planícies de inundação são caracterizados por sua maior biodisponibilidade, gerando maiores taxas de oxidação da matéria orgânica, com a formação de ácido carbônico e íons de hidrogênio, por conseguinte, menores valores de pH (BENNER et al., 1995; DEVOL; HEDGES, 2001; ESTEVES, 1988).

Durante o período de menor vazão, o pH foi básico, resultado das altas taxas respiratórias e maior atividade fotossintética. Durante o processo de fotossíntese, o  $\text{CO}_2$  e  $\text{HCO}_3^-$  são assimilados pelos produtores primários, com isto há um acréscimo nos valores de pH devido a capacidade de fixação de carbono ser maior que a dissolução do  $\text{CO}_2$  atmosférico na interface ar-água (TUNDISI; TUNDISI, 2008).

No canal principal do rio Amazonas, a concentração média de oxigênio dissolvido foi de  $5 \pm 1 \text{ mg L}^{-1}$ , variando entre 3 e  $7 \text{ mg L}^{-1}$ . Nos tributários de águas claras foi observado águas mais oxigenadas, principalmente nos períodos de menor vazão e vazante, variando entre 6 a  $7 \text{ mg L}^{-1}$  (Tabela 2).

Diferenças entre os períodos hidrológicos, são observadas apenas no canal principal ( $p < 0,05$ ), com maior oxigenação no período de menor vazão ( $6,6 \pm 0,5 \text{ mg L}^{-1}$ ) e menor oxigenação no período de maior vazão e vazante ( $4,2 \pm 0,6 \text{ mg L}^{-1}$ , para ambos os períodos), similar ao estudo de Gagne-Maynard et al. (2017), os quais, apontam altas taxas fotossintéticas neste período.

No que se refere à temperatura, no canal principal do rio Amazonas foi observado média de  $30 \pm 1$  °C com variação entre 28 a 31 °C, não diferindo significativamente ( $p > 0,05$ ) da média de  $30 \pm 0$  °C, nos tributários de águas claras, que variaram entre 29 e 31 °C. Durante os períodos hidrológicos, somente no canal principal houve variação significativa ( $p < 0,05$ ), com maior temperatura média nos períodos de enchente e menor vazão ( $30 \pm 1$  °C) (Tabela 2).

**Tabela 2** - Valores médios  $\pm$  desvio padrão da condutividade elétrica da água ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ ), pH e temperatura (°C), no canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras (rios Tapajós e Xingu), durante os períodos

Local (estação/rio)	Período de amostragem	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Oxigênio dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ )	pH	Temperatura (°C)
Óbidos (Amazonas)	Enchente	$89 \pm 3$	$4,6 \pm 0,2$	$6,74 \pm 0,05$	$31 \pm 0$
	Maior vazão	-	$3,5 \pm 1,1$	$6,60 \pm 0,44$	$29 \pm 1$
	Vazante	$59 \pm 2$	$2,9 \pm 0,2$	$5,82 \pm 0,07$	$29 \pm 0$
	Menor Vazão	$63 \pm 1$	$5,9 \pm 0,1$	$6,95 \pm 0,026$	$31 \pm 0$
Almeirim (Amazonas)	Enchente	$75 \pm 1$	$5,2 \pm 0,2$	$6,63 \pm 0,03$	$30 \pm 0$
	Maior vazão	-	$4,1 \pm 0,0$	$6,67 \pm 0,02$	$29 \pm 0$
	Vazante	$55 \pm 1$	$3,9 \pm 0,2$	$6,03 \pm 0,03$	$29 \pm 0$
	Menor Vazão	$61 \pm 1$	$6,7 \pm 0,1$	$7,29 \pm 0,03$	$30 \pm 1$
Canal Norte (Amazonas)	Enchente	$77 \pm 0$	$5,5 \pm 0,1$	$7,00 \pm 0,05$	$29 \pm 0$
	Maior vazão	-	$4,7 \pm 0,4$	$6,76 \pm 0,06$	$29 \pm 0$
	Vazante	$56 \pm 1$	$4,9 \pm 0,5$	$6,62 \pm 0,15$	$29 \pm 0$
	Menor Vazão	$61 \pm 1$	$7,0 \pm 0,1$	$7,29 \pm 0,05$	$30 \pm 0$
Canal Sul (Amazonas)	Enchente	$69 \pm 4$	$5,5 \pm 0,4$	$7,11 \pm 0,09$	$30 \pm 0$
	Maior vazão	-	$4,6 \pm 0,2$	$6,73 \pm 0,02$	$29 \pm 0$
	Vazante	$54 \pm 1$	$4,8 \pm 0,1$	$6,55 \pm 0,17$	$29 \pm 0$
	Menor Vazão	$60 \pm 1$	$7,0 \pm 0,3$	$7,24 \pm 0,08$	$30 \pm 0$
Tributários (Tapajós + Xingu)	Enchente	$20 \pm 2$	$5,6 \pm 0,4$	$5,81 \pm 0,21$	$30 \pm 1$
	Maior vazão	-	$5,8 \pm 1,8$	$6,50 \pm 0,09$	$29 \pm 1$
	Vazante	$20 \pm 3$	$6,6 \pm 0,2$	$5,96 \pm 0,54$	$29 \pm 0$
	Menor Vazão	$21 \pm 2$	$7,2 \pm 0,3$	$7,10 \pm 0,15$	$30 \pm 0$

Fonte: O autor.

### 4.3 Concentrações e Fluxos de Carbono e Nitrogênio Dissolvido

#### 4.3.1 Carbono Dissolvido

No canal principal do rio Amazonas, a relação COD:CID foi semelhante em todos os períodos hidrológicos, com valores próximos a 1, apontando concentrações semelhantes entre

entre as frações orgânicas e inorgânicas dissolvidas. Nos rios Tapajós e Xingu, de maneira contrária, a maior concentração média é referente a fração orgânica dissolvida, principalmente no período de enchente e a relação COD:CID é igual a 3.

No canal principal do rio Amazonas, a concentração média de COD, nos períodos de vazante e menor vazão, as concentrações médias de COD foram significativamente maiores ( $p < 0,05$ ), quando comparado aos tributários de águas claras (Figura 11; Tabela 3). Nos períodos de enchente e maior vazão não houve diferenças estatísticas entre o canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras ( $p > 0,05$ ). As concentrações médias de CID, por sua vez, foram maiores ( $p < 0,05$ ) no canal principal do rio Amazonas em todos os períodos hidrológicos. Tais resultados, a jusante de Óbidos, são opostos ao observado nos estudos realizados por Richey e Victoria (1993), Richey et al. (1991) e Richey (1981a), a montante de Óbidos, nos quais, de forma geral, maiores concentrações de COD e CID foram registradas nos tributários do rio Amazonas, principalmente no Rio Negro.

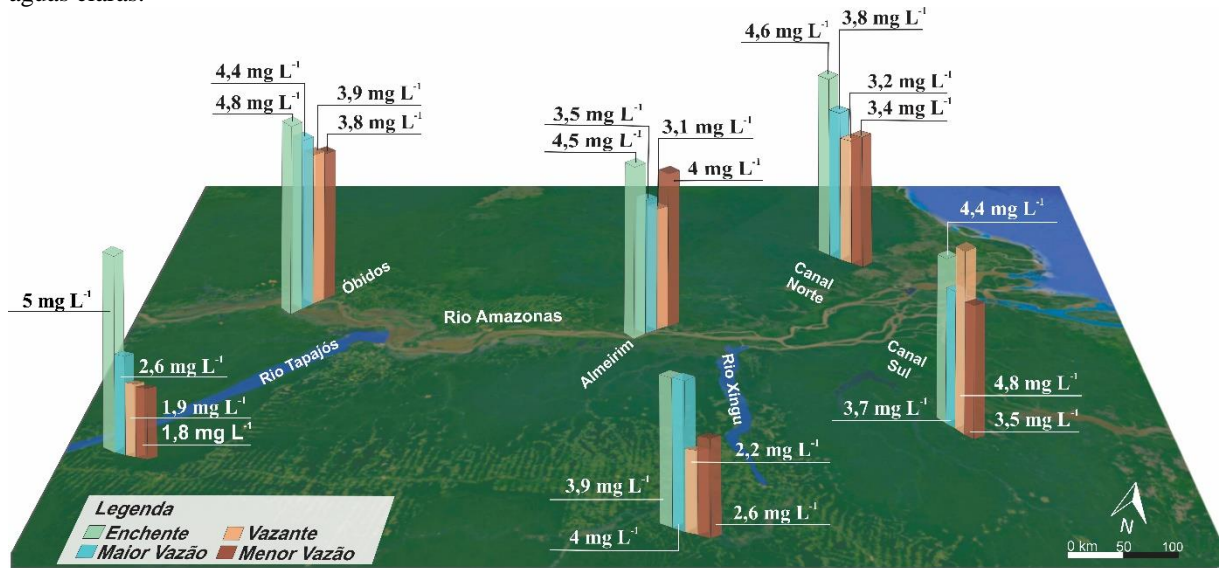
Quanto a variação sazonal, aumento significativo ( $p < 0,05$ ) de COD, durante o período de enchente, foi observado no canal principal do rio Amazonas e seus tributários, com médias de  $4,5 \pm 0,2$  e  $4,5 \pm 0,7 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente (Figura 11; Tabela 3), semelhante ao registrado por Guyot e Wasson (1994), Moreira-Turcq et al. (2003) e Schlesinger e Melack (1981). Tais aumentos, que nos tributários estendem-se ao período de maior vazão, são responsáveis pela aproximação das concentrações médias de COD, nos rios Tapajós e Xingu, às concentrações médias no canal principal do rio Amazonas.

Os rios de águas claras drenam áreas de leito fluvial estável, transportando pouco material em suspensão, de origem terrestre, em oposição ao encontrado em rios de águas brancas (altas concentrações de sólidos dissolvidos com origem andina) e rios de águas pretas (altas concentrações de ácidos húmicos), conseqüentemente, registram-se menores concentrações de COD nestas águas (SIOLI, 1951). Soma-se a isto o fato de o canal principal do rio Amazonas possuir fontes autóctones e duas fontes alóctones distintas de matéria orgânica, as águas brancas de origem andina e planícies amazônicas, ricas em matéria orgânica, enquanto os rios Tapajós e Xingu possuem apenas a planície amazônica como fonte de material alóctone, além de suas fontes autóctones (BERNARDES et al., 2004).

Durante o período de enchente foram registradas as maiores concentrações médias de CID no canal principal do rio Amazonas, com média de  $5,2 \pm 0,4 \text{ mg L}^{-1}$ . Não houve variações estatísticas ( $p > 0,05$ ) nos tributários de águas claras entre os períodos hidrológicos (Figura 12; Tabela 3). Destaca-se os aumentos nas concentrações de CID no canal principal do rio

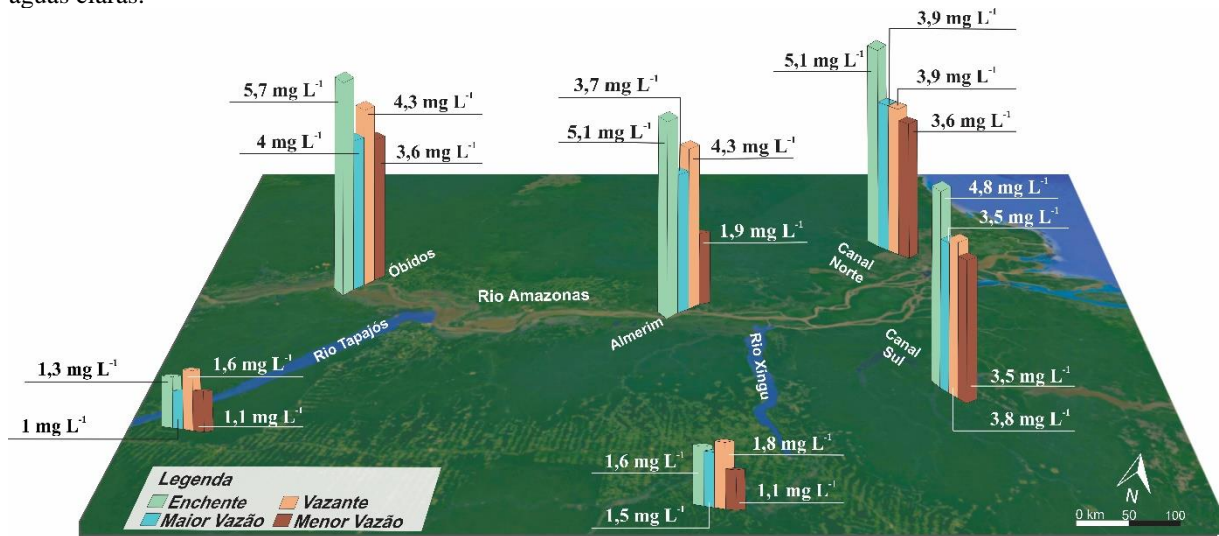
Amazonas no período de vazante, semelhante ao observado por Sawakuchi et al. (2017), o que pode ser atribuído à influência das planícies de inundação no canal principal, as quais, são fontes de carbono (cerca de 40%) para o canal principal do rio Amazonas principalmente no período de vazante (QUAY et al., 1992).

**Figura 11** — Concentrações de COD ( $\text{mg L}^{-1}$ ) ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.



Fonte: O autor.

**Figura 12** — Concentrações de CID ( $\text{mg L}^{-1}$ ) ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.



Fonte: O autor.

Quanto a distribuição longitudinal das concentrações de carbono dissolvido no canal principal do rio Amazonas, na seção 1 (Óbidos - Almeirim), tendências de diminuições significativas ( $p < 0,05$ ) das concentrações médias de COD são observadas nos períodos de

maior vazão e vazante, acompanhadas de balanços de massas negativos para ambos os períodos ( $\Delta F\% = -9\% \sim 106 \text{ kg s}^{-1}$  e  $\Delta F\% = -12\% \sim 125 \text{ kg s}^{-1}$ , respectivamente). No que se refere ao CID, diminuição significativa ( $p < 0,05$ ) foi observada no período de menor vazão, acompanhado de sumidouros não contabilizados ( $\Delta F\% = -47\% \sim 206 \text{ kg s}^{-1}$ ).

**Tabela 3** – Concentrações médias  $\pm$  desvio padrão de concentrações ( $\text{mg L}^{-1}$ ) e fluxos ( $\text{kg s}^{-1}$ ) de COD e CID nas estações de amostragem, conforme a sazonalidade.

Local (rio)	Período de amostragem	COD ( $\text{mg L}^{-1}$ )	CID ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Fluxo de COD ( $\text{kg s}^{-1}$ )	Fluxo de CID ( $\text{kg s}^{-1}$ )
Óbidos (Amazonas)	Enchente	4,8 $\pm$ 0,2	5,7 $\pm$ 0,2	580 $\pm$ 25	694 $\pm$ 26
	Maior vazão	4,4 $\pm$ 0,5	3,9 $\pm$ 0,9	1111 $\pm$ 291	996 $\pm$ 259
	Vazante	3,9 $\pm$ 0,4	4,3 $\pm$ 0,3	994 $\pm$ 113	1074 $\pm$ 81
	Menor Vazão	3,8 $\pm$ 0,2	3,6 $\pm$ 0,0	469 $\pm$ 29	434 $\pm$ 15
	<b>Média</b>	<b>4,1 <math>\pm</math> 0,3</b>	<b>4,4 <math>\pm</math> 0,4</b>	<b>789 <math>\pm</math> 115</b>	<b>800 <math>\pm</math> 95</b>
Almeirim (Amazonas)	Enchente	4,5 $\pm$ 0,2	5,1 $\pm$ 0,4	614 $\pm$ 55	692 $\pm$ 119
	Maior vazão	3,5 $\pm$ 0,6	3,7 $\pm$ 0,1	1049 $\pm$ 1816	1117 $\pm$ 79
	Vazante	3,1 $\pm$ 0,2	4,3 $\pm$ 0,4	882 $\pm$ 55	1214 $\pm$ 12
	Menor Vazão	4,0 $\pm$ 0,5	1,9 $\pm$ 0,7	502 $\pm$ 56	235 $\pm$ 85
	<b>Média</b>	<b>4,0 <math>\pm</math> 0,4</b>	<b>3,4 <math>\pm</math> 0,4</b>	<b>762 <math>\pm</math> 87</b>	<b>815 <math>\pm</math> 101</b>
Canal Norte (Amazonas)	Enchente	4,6 $\pm$ 0,1	5,1 $\pm$ 0,3	474 $\pm$ 13	532 $\pm$ 30
	Maior vazão	3,8 $\pm$ 0,4	3,9 $\pm$ 0,1	535 $\pm$ 49	551 $\pm$ 17
	Vazante	3,2 $\pm$ 0,1	3,9 $\pm$ 0,3	366 $\pm$ 13	442 $\pm$ 36
	Menor Vazão	3,4 $\pm$ 0,2	3,6 $\pm$ 0,1	208 $\pm$ 9	221 $\pm$ 70
	<b>Média</b>	<b>3,4 <math>\pm</math> 0,2</b>	<b>4,1 <math>\pm</math> 0,2</b>	<b>396 <math>\pm</math> 21</b>	<b>437 <math>\pm</math> 23</b>
Canal Sul (Amazonas)	Enchente	4,4 $\pm$ 0,1	4,8 $\pm$ 0,2	232 $\pm$ 6	254 $\pm$ 90
	Maior vazão	3,7 $\pm$ 0,2	3,5 $\pm$ 0,3	758 $\pm$ 52	720 $\pm$ 50
	Vazante	4,8 $\pm$ 0,4	3,8 $\pm$ 0,3	705 $\pm$ 52	559 $\pm$ 40
	Menor Vazão	3,5 $\pm$ 0,2	3,5 $\pm$ 0,1	462 $\pm$ 30	463 $\pm$ 10
	<b>Média</b>	<b>4,1 <math>\pm</math> 0,2</b>	<b>3,9 <math>\pm</math> 0,2</b>	<b>539 <math>\pm</math> 30</b>	<b>499 <math>\pm</math> 16</b>
Tributários (Tapajós + Xingu)	Enchente	4,5 $\pm$ 0,2	1,5 $\pm$ 0,1	41 $\pm$ 30	21 $\pm$ 10
	Maior vazão	3,1 $\pm$ 1,1	1,3 $\pm$ 0,3	49 $\pm$ 11	21 $\pm$ 2
	Vazante	2,1 $\pm$ 0,2	1,7 $\pm$ 0,1	10 $\pm$ 3	8 $\pm$ 2
	Menor Vazão	2,2 $\pm$ 0,5	1,1 $\pm$ 0,0	11 $\pm$ 1	6 $\pm$ 1
	<b>Média</b>	<b>3,0 <math>\pm</math> 0,5</b>	<b>4,4 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>28 <math>\pm</math> 11</b>	<b>12 <math>\pm</math> 4</b>

Fonte: O autor.

A jusante de Óbidos, espera-se a diminuição das concentrações de COD, devido a pequena contribuição dos tributários de águas claras para o canal principal do rio Amazonas. Essa redução é também influenciada pelo aporte de substratos altamente reativos (lábeis), de



baixo peso molecular oriundos dos rios de águas claras. O substrato lábil, quando em contato com o material mais refratário do rio Amazonas, intensifica a quebra da matéria orgânica e aumento da produção de CO<sub>2</sub>, denominado de efeito *priming*. Este processo ocorre principalmente na confluência dos rios Tapajós e Xingu com o canal principal do rio Amazonas (WARD et al., 2016). Com relação ao CID, além da diluição dos tributários, menores concentrações e sumidouros não contabilizados de fluxos, durante o período de menor vazão, são atribuídos a altas taxas de produção primária, no período de menor vazão. Durante este período, Gagne-Maynard et al. (2017) registraram menores concentrações de CO<sub>2</sub>, acompanhadas de maior saturação de O<sub>2</sub>.

A não verificação de tendência de decréscimo de COD e CID, no período de enchente, pode ser atribuída ao grande aporte de substratos de origem alóctone neste período, balanceando as perdas proveniente do processo de oxidação da matéria orgânica, resultando em um pequeno decréscimo no balanço de massa para os fluxos de COD e CID ( $\Delta F\% = -5\% \sim 30 \text{ kg s}^{-1}$  e  $\Delta F\% = -3\% \sim 19 \text{ kg s}^{-1}$ , respectivamente). Apesar do grande aporte de material alóctone ao rio, de acordo com Richey et al. (1990), uma grande parte do COD que chega ao rio Amazonas é caracterizado como material húmico, diageneticamente modificado, sendo uma fonte de material refratário, dificultando a mineralização deste material e aumentos nas concentrações de CID.

No período de menor vazão, o padrão conservativo das concentrações de COD é garantido pela presença de fontes não contabilizadas no balanço de massa ( $\Delta F\% = +5\% \sim 22 \text{ kg s}^{-1}$ ). Durante esse período, intensifica-se a produção primária no canal principal. De acordo com Wetzel et al. (1992), a produção primária é umas das principais fontes autóctones de carbono orgânico para os ambientes aquáticos, sendo este carbono mais lábil, por promover maior reatividade das plantas vasculares, por conseguinte, maior degradação da estrutura vegetal e mineralização, influenciando nas concentrações de CID. Soma-se a isto, ao fato da comunidade microbial tornar-se mais ativa (WARD et al., 2015, 2016).

Quanto ao padrão longitudinal conservativo das concentrações médias de CID nos períodos de maior vazão e vazante, os mesmos são acompanhados de balanços de massas positivos ( $\Delta F\% = +10\% \sim 100 \text{ kg s}^{-1}$ ;  $\Delta F\% = +12\% \sim 128 \text{ kg s}^{-1}$ , respectivamente), sendo possivelmente associados ao processo de remineralização da matéria orgânica, no período de maior vazão, influências das áreas alagáveis laterais, no período de vazante. Richey, Salati e Dos Santos (1985) indicam entradas de carbono das áreas de várzea, principalmente na forma inorgânica.

Na seção 2 (Almeirim - canal norte e sul), variações longitudinais significativas ( $p < 0,05$ ) ocorreram apenas no período de menor vazão. Neste período, diminuições nas concentrações de COD e aumentos nas concentrações de CID foram observados, acompanhados de balanços positivos, quanto ao fluxo, em ambos as frações ( $\Delta F\% = +30\% \sim 156 \text{ kg s}^{-1}$ ; e  $\Delta F\% = +170\% \sim 408 \text{ kg s}^{-1}$ , respectivamente). De acordo com Ward et al. (2016), taxas maiores de remineralização são observadas próximo a foz do rio Amazonas, resultado também do efeito *priming*. Contudo, diferentemente do que ocorre na confluência dos rios Tapajós e Xingu, tal processo não ocorre devido à presença de material algal, mas, possivelmente, a partir de moléculas de baixo peso molecular e açúcares.

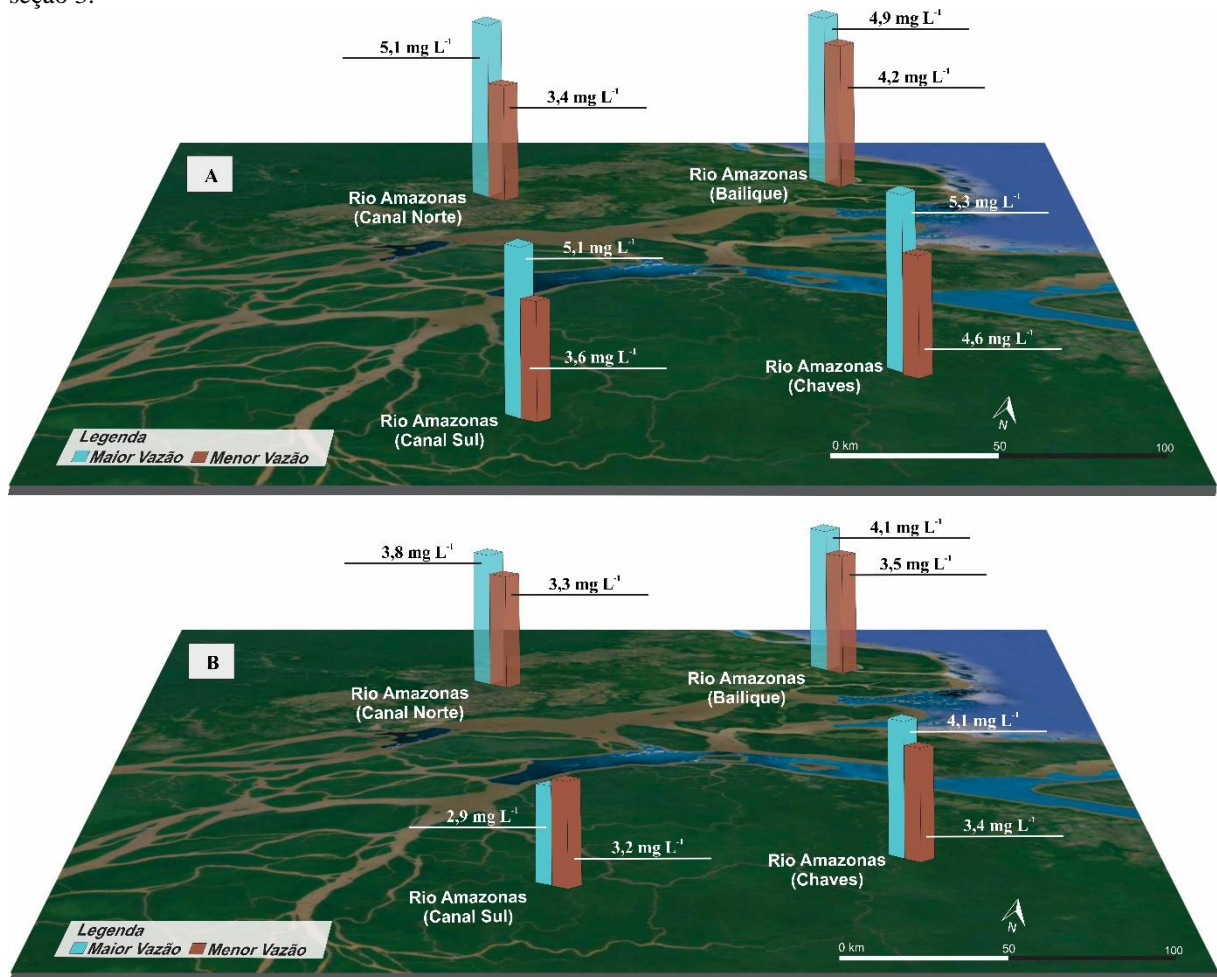
Ward et al. (2015) observaram tendência de aumento das concentrações de COD em direção a foz (de  $3,9$  a  $4,2 \text{ mg L}^{-1}$ ), resultante da combinação do aporte advindo de tributários, escoamento direto das zonas adjacentes ao canal principal, troca sazonal e diária com áreas alagadas (ciclo de maré) e quebra de compostos particulados. Diferenças entre os resultados aqui encontrado e os estudos de Ward et al. (2015) podem estar relacionadas a grande variabilidade das concentrações na foz da bacia amazônica, ocasionada pelo efeito de maré semidiurno, assim como, variações interanuais, resultantes de alterações climáticas e hidrológicas, uma vez que, nos períodos de maior e menor vazão, as descargas médias na foz, aqui registradas, foram cerca de 2 e 1,4 vezes maiores, respectivamente, que as médias de vazão nos mesmos períodos de amostragem no estudo de Ward et al. (2015).

Destaca-se aqui o aumento das concentrações de COD no canal sul ( $4,8 \text{ mg L}^{-1}$ ) em relação ao canal norte ( $3,2 \text{ mg L}^{-1}$ ), próximos a Macapá, durante o período de vazante. Com exceção do período de menor vazão, o canal sul representa de 57 a 68% da vazão do rio Amazonas, portanto, espera-se a intensificação das interações entre canal principal do rio Amazonas e as áreas alagáveis, principalmente neste período. Outro ponto a ser destacado é a maior presença de ilhas ao longo do canal sul, impulsionando a interação canal principal e ambientes terrestres.

Na seção 3 (canal norte e sul, próximos a Macapá, até as estações próximas a Bailique e Chaves), variações longitudinais significativas ( $p < 0,05$ ), quanto ao COD, foram observadas apenas no período de menor vazão, com aumento da concentração média em direção a foz. No que se refere ao CID, variações longitudinais significativas, foram observadas apenas no período de menor vazão, no canal sul do rio Amazonas, com aumento da concentração média em direção a foz (Figura 13).

O fluxo médio de carbono dissolvido transportado pelo rio Amazonas aqui calculado em  $59 \text{ Tg ano}^{-1}$ , não apresentou diferenças significativas aos resultados obtidos pelos modelos biogeoquímicos prévios, realizados Richey (1981) e Richey et al. (1990), os quais, estimaram um fluxo médio de 53 e  $57 \text{ Tg ano}^{-1}$ , respectivamente, em Óbidos. Ao longo de todos os períodos hidrológicos, observa-se fluxos semelhantes das frações orgânica e inorgânica dissolvidas, diferente do observado por Smoak, Krest e Swarzenski (2006), os quais indicam o CID como maior contribuinte de carbono para o estuário amazônico. O período de maior vazão é responsável por cerca de 34% do fluxo total de carbono, seguido dos períodos de vazante (27%), enchente (21%) e menor vazão (18%).

**Figura 13** — Concentrações de COD (A) e CID (B) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), nas estações de amostragem do rio Amazonas, na seção 3.



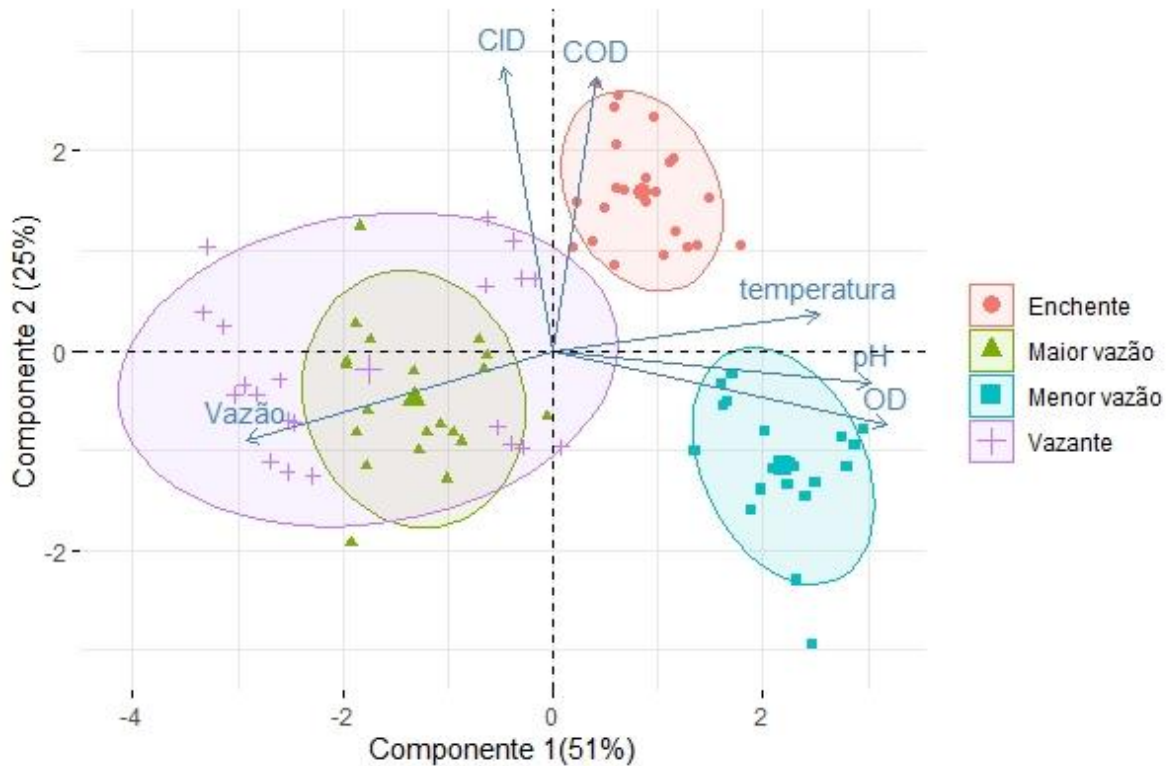
Fonte: O autor.

As médias de fluxo obtidas para a bacia amazônica representam cerca de 7% de CID e 13% de COD do total transportado para os oceanos pelos rios do mundo ( $430$  e  $220 \text{ Tg.ano}^{-1}$ , respectivamente), estimados por Meybeck (1982) e Li et al. (2017). O oceano atlântico é o

responsável pelo recebimento da maior quantidade de carbono dissolvido entre os oceanos, cerca de  $107 \text{ Tg.ano}^{-1}$  de COD e  $158 \text{ Tg.ano}^{-1}$  de CID (LI et. al., 2017). Assim sendo, a bacia amazônica é responsável pelo transporte de, aproximadamente, 27% de COD e 19% de CID para o oceano atlântico.

De acordo com a análise de componente principal (ACP), 76,7% da variação total das observações realizadas no canal principal do rio Amazonas, durante os períodos hidrológicos, são explicadas pelos dois primeiros componentes principais (Tabela 4), os quais são descritos pelas equações 3 e 4, representadas graficamente pelos eixos x e y, respectivamente (Figura 14).

**Figura 14** — *Biplot* da análise de componentes principais a partir da matriz de correlação (COD, CID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).



Fonte: O autor.

**Tabela 4** - Componentes principais, autovalores (variâncias), porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes, a partir da matriz de correlação (COD, CID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).

Componente Principal	Autovalores	Proporção	Proporção Acumulada (%)
Componente 1	3,1	51,3	51,3
Componente 2	1,5	25,4	76,7
Componente 3	0,7	10,9	87,6
Componente 4	0,5	7,8	95,4
Componente 5	0,2	3,4	98,7
Componente 6	0,1	1,2	100

**Fonte:** O autor

O componente 1 (CP1) foi responsável por 51,3% da distribuição de dados (Tabela 4), sendo as variáveis oxigênio dissolvido (OD), pH, temperatura e vazão, as principais variáveis deste modelo. Estas variáveis possuem correlação significativa e positiva entre si, com maior influência sobre o período hidrológico de menor vazão. A variável vazão, por sua vez, possui correlações significativas e inversa com as variáveis citadas anteriormente, tendo maior influências sobre a variabilidade dos dados nos períodos hidrológicos de maior vazão e vazante.

Durante o período de menor descarga, maiores concentrações de oxigênio dissolvido são atribuídas as maiores taxas de produção primária neste período, coerente com a menor concentração de sedimentos em suspensão, responsável por limitar este processo (GAGNE-MAYNARD et al., 2017). Ademais, altos níveis de produção primária promovem um aumento no pH, explicando os valores próximos à neutralidade no período de menor vazão no canal principal do rio Amazonas ( $7,19 \pm 0,16$ ) (TUNDISI; TUNDISI, 2008). A maior influência da variável vazão sobre a variabilidade dos dados nos períodos de maior vazão e vazante, indica a maior interação entre canal principal e áreas alagáveis nestes períodos, nos quais grandes volumes de água são estocados e, posteriormente, voltam ao canal principal do rio Amazonas (MELACK; FORSBERG, 2001).

O componente 2 (CP2) foi responsável por explicar 25,4% da variação total dos dados (Tabela 4). Na equação 2, destaca-se a contribuição de COD e CID, os quais correlacionam-se de forma positiva sobre a variabilidade dos dados no período de enchente (Figura 14). Concentrações de carbono dissolvido, no período de enchente, são principalmente influenciadas pela grande quantidade de matéria orgânica alóctone, resultando no aumento das concentrações de COD e CID. Correlações entre estas frações refletem a importância de processos biogênicos envolvendo a oxidação da matéria orgânica (MORTATTI et al., 2006a). Processos de mineralização da matéria orgânica fluvial promovem a formação de  $\text{HCO}_3^-$  e posteriormente,

após reoxidação, produção de CO<sub>2</sub>. Portanto, estes componentes do CID estão correlacionados ao COD em águas fluviais (MORTATTI et al., 2006b).

$$\text{CP1: } 0,95\text{OD} + 0,90\text{pH} + 0,76\text{temperatura} + 0,12\text{COD} - 0,13\text{CID} - 0,87\text{vazão} \quad (3)$$

$$\text{CP2: } 0,85\text{CID} + 0,82\text{COD} + 0,11\text{temperatura} - 0,09\text{pH} - 0,22\text{OD} - 0,27\text{vazão} \quad (4)$$

#### 4.3.2 Nitrogênio Dissolvido

No canal principal do baixo rio Amazonas, no período de enchente, foi registrado relação NOD:NID igual a 1,9, indicando concentrações significativamente maiores de NOD neste período. Nos períodos de maior e menor vazão<sup>1</sup> observa-se padrão inverso, com relação NOD:NID igual a 0,6. No período de vazante, as concentrações médias de NOD e NID foram semelhantes (NOD:NID ~1).

Relações NOD:NID diferem em estudos que analisam grande bacias; Lewis et al. (1999), por exemplo, registraram concentrações maiores de NID em relação ao NOD em seu estudos em bacias hidrográficas na América, ao passo que Meybeck (1982), Dagg et al. (2004), Sipler e Bronk (2014) e Meybeck (1982) observam maiores concentrações de NOD em relação ao NID em ambientes fluviais.

Nos tributários de águas claras do rio Amazonas, as concentrações médias de NID foram superiores as concentrações médias de NOD (NOD:NID  $\leq$  0,6), com exceção do período de enchente, no qual a concentração de NOD compõe cerca de 74% da concentração de NTD, padrão atribuído a entrada de grandes quantidades de material alóctone neste período

O N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> é a forma dominante de NID no canal principal e seus tributários durante todos os períodos estudados. O valor médio anual registrado no canal principal do rio Amazonas foi de  $0,08 \pm 0,06$  mg N L<sup>-1</sup>, maior que o observado por Gibbs (1972) próximo a foz da bacia hidrográfica em questão, com concentração de 0,04 mg N L<sup>-1</sup>, mas semelhante à concentração média de rios sulamericanos, 0,07 mg N L<sup>-1</sup>, observado pelo mesmo autor.

Por representar a fração dominante de NID, Richey et al. (1991) observaram concentrações de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> próximas às concentrações de NOD, no canal principal do rio Amazonas, sendo o nitrogênio uniformemente distribuído entre as frações NOD, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e NOP (nitrogênio orgânico particulado). Padrão também observado neste estudo, com exceção do período de enchente, com maior concentração média de NOD ( $0,22 \pm 0,0$  mg N L<sup>-1</sup>), cerca de 11 vezes maior que a concentração média de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ( $0,02 \pm 0,01$  mg N L<sup>-1</sup>).

---

<sup>1</sup> Nos períodos de maior e menor vazão, concentrações de NOD e NID referem-se apenas as estações canal norte e sul, próximas a Macapá.

Quanto ao  $\text{N-NH}_4^+$ , em rios com concentrações médias de nitrogênio mineral ( $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_2^-$ ), caso do rio Amazonas, o  $\text{N-NH}_4^+$  representa em média 15% do NID, proporção também aqui verificada. Concentrações relativas ao  $\text{N-NO}_2^-$ , por sua vez, são caracterizadas como constantes e pequenas, cerca de 7% do NID, padrão atribuído a redução facilitada quimicamente e biologicamente, principalmente em ambientes tropicais, geralmente abaixo do limite de detecção das metodologias utilizadas (TUNDISI; TUNDISI, 2008; MEYBECK, 1982).

Na comparação entre canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras, no que se refere ao NOD (Figura 15; Tabela 5), houve variações estaticamente significativas ( $p < 0,05$ ) apenas nos períodos de vazante e menor vazão. Nestes períodos, concentrações maiores foram registradas no canal principal do rio Amazonas, com variação de 0,02 a 0,27  $\text{mg N L}^{-1}$  (vazante) e 0,08 a 0,10  $\text{mg N L}^{-1}$  (menor vazão), enquanto que, em seus tributários, houve variações de 0,01 a 0,05  $\text{mg N L}^{-1}$  (vazante) e 0,01 a 0,16  $\text{mg N L}^{-1}$  (menor vazão).

De forma semelhante ao observado para o COD, variações sazonais significativas ( $p < 0,05$ ) de NOD ocorrem principalmente devido a entrada de matéria orgânica alóctone no período de enchente, elevando a concentração média de NOD cerca de 64% neste período, em relação as concentrações médias dos demais períodos. Nos tributários de águas claras, este aumento das concentrações de NOD, cerca de 286%, também são verificados no período de enchente ( $p < 0,05$ ), contudo, prolongando-se até o período de maior vazão, aproximando as concentrações de NOD ao canal principal do rio Amazonas (Figura 15; Tabela 5).

Quanto as concentrações de NID, entre o canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras, houve diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) apenas nos períodos de enchente e menor vazão (Figura 16; Tabela 5). No período de enchente, as concentrações médias de NID foram, aproximadamente, duas vezes maiores ( $p < 0,05$ ) nos tributários de águas claras, quando comparado ao canal principal, padrão que se inverte no período de menor vazão, com concentrações duas vezes maiores ( $p < 0,05$ ) no canal principal do rio Amazonas.

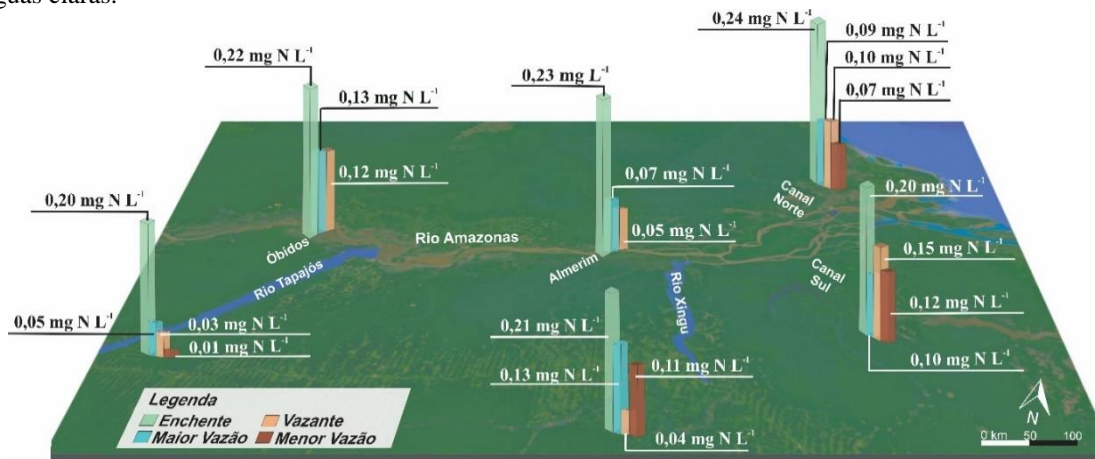
O  $\text{N-NO}_3^-$  tem padrão similar às concentrações de oxigênio dissolvido, com menor oxigenação no canal principal do Amazonas no período de enchente, devido à disponibilidade de substratos orgânicos e altas taxas de oxidação da matéria orgânica, principalmente no canal principal do rio Amazonas. Rios de águas claras possuem, de maneira constante, altas concentrações de oxigênio dissolvido durante o ano hidrológico (BENNER et al., 1995). Durante o período de menor vazão, devido ao aumento da produção primária e maior aporte de material lábil no canal principal do rio Amazonas, processos aeróbicos de nitrificação



aumentam as concentrações de NID durante esta fase da hidrógrafa, elevando suas concentrações médias em relação aos seus tributários de águas claras (GAGNER-MAYNARD et al., 2017).

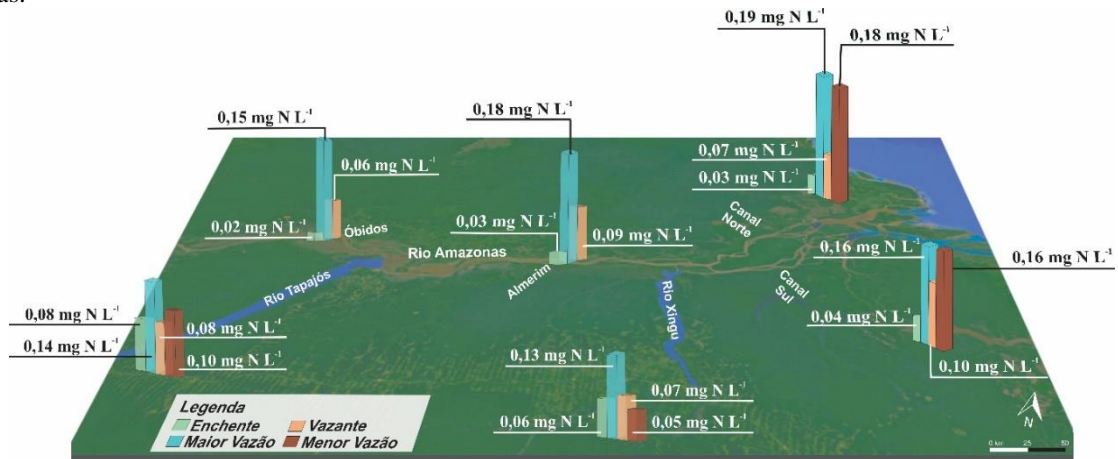
No período de maior vazão, maiores concentrações de NID são observadas no canal principal do rio Amazonas, mesmo sob condições de menores concentrações de oxigênio dissolvido. Este padrão pode ser atribuído ao processo de remineralização, favorecido pela maior eficiência biológica neste período, tendo em vista a capacidade de remineralização e modificação da matéria orgânica por organismos de vida livre (BENNER et al., 1995; WARD et al., 2018). Mesmo em condições de menor concentração de oxigênio dissolvido, o processo de remineralização pode produzir máximas concentrações de  $\text{N-NO}_3^-$ , de acordo com Devol et al. (1995).

**Figura 15** — Concentrações de NOD ( $\text{mg N L}^{-1}$ ) ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.



Fonte: O autor.

**Figura 16** — Concentrações de NID ao longo do canal principal do rio Amazonas e seus tributários de águas claras.



Fonte: O autor.



Concentrações menores de NID são registradas no período de vazante. A remoção do nitrogênio remineralizado via absorção pela comunidade microbiana e desnitrificação podem ser atribuídos a esta redução de concentração, porém, o processo de desnitrificação é menos provável devido à natureza bem oxigenada do rio Amazonas, podendo ocorrer, contudo em bancos de sedimento anaeróbicos e em áreas alagáveis laterais. Neste último, a remoção de nitrogênio via gasosa é favorecida por condições anóxicas na fase aquática, além da redução de NID nestes ambientes pela absorção de  $\text{N-NO}_3^-$ , por fitoplânctons, justificando concentrações menores de NID em relação ao período hidrológico anterior (DEVOL et al., 1995; KOSCHORRECK; DARWICH, 2003).

Quanto a distribuição longitudinal de nitrogênio dissolvido no canal principal do rio Amazonas, variações significativas ( $p < 0,05$ ) das concentrações de NOD foram observadas apenas no período de vazante. Durante este período, concentrações de NOD foram menores em Almeirim em relação a Óbidos, acompanhado de sumidouros não contabilizados de NOD ( $\Delta F\% = -42\% \sim 13 \text{ kg s}^{-1}$ ) na seção 1 (Óbidos - Almeirim) (Figura 15 e 16; Tabelas 5 e 6). Apesar de nas áreas alagadas laterais o nitrogênio estar presente principalmente na forma de NOD, os substratos orgânicos dissolvidos advindos destas regiões abastecem as taxas de respiração no canal principal, sendo rapidamente oxidados (BENNER et al., 1995). No que se refere a seção 2, próximo as estações Macapá norte e sul, houve aumento da concentração média, acompanhado de fontes não contabilizadas ( $\Delta F\% = +94\% \sim 17 \text{ kg s}^{-1}$ ).

No período de maior vazão, na seção 1, sumidouros de NOD foram registrados ( $\Delta F\% = -35\% \sim 12 \text{ kg s}^{-1}$ ), contudo não acompanhados de variações significativas nas concentrações. Durante o período de maior vazão, taxas de oxidação da matéria orgânica podem ser atribuídas como sumidouro de NOD, concomitante com a diminuição do aporte de material orgânico alóctone, em comparação ao período de enchente. Na mesma seção, no período de enchente e menor vazão, foram observados balanços de massa próximos ao equilíbrio ( $\Delta F\% = +8\% \sim 2,4 \text{ kg s}^{-1}$  e  $\Delta F\% = +13\% \sim 4 \text{ kg s}^{-1}$ , respectivamente).

Na seção 2, fontes não contabilizadas de NOD foram observadas nos períodos de maior vazão, menor vazão e enchente ( $\Delta F\% = +21\% \sim 5,1 \text{ kg s}^{-1}$ ;  $\Delta F\% = +2\% \sim 0,6 \text{ kg s}^{-1}$  e  $\Delta F\% = 36\% \sim 11 \text{ kg s}^{-1}$ , respectivamente), também não acarretando diminuições significativas nas concentrações obtidas. Na seção 2, entradas e saídas são possivelmente desequilibradas pela intensificação dos efeitos de marés semidiurno, promovendo maior interação do canal principal com as áreas alagáveis, além de possíveis trocas com o canal de Breves, o qual conecta as bacias hidrográficas do rio Amazonas e rio Tocantins.

Variações longitudinais significativas ( $p < 0,05$ ) de NID foram observadas apenas entre a estação de Almeirim e a foz (seção 2), durante os períodos de enchente e maior vazão, com tendências de aumento das concentrações médias. Concomitante a estes aumentos, balanços positivos nos fluxos foram verificados ( $\Delta F\% = +11\% \sim 6 \text{ kg s}^{-1}$  e  $\Delta F\% = +67\% \sim 2 \text{ kg s}^{-1}$ , respectivamente).

Aumentos nas concentrações e fluxos de NID na seção 2 podem estar correlacionadas ao aumento da saturação de  $\text{O}_2$ , como descrito por Gagne-Maynard et al. (2017), resultado de fatores como a perda de sedimentos suspensos provocados pelos efeitos de maré semidiurno, facilitando a entrada de luz e produtividade primária. O aumento da turbulência próximo à foz, também promove maior oxigenação do rio, intensificando o processo de nitrificação (processo aeróbico), resultando em aumentos nas concentrações desta fração nitrogenada, também visualizado no setor 3, como descrito abaixo. Ademais, ao promover a entrada de material mais reativo (algas), efeitos de maré semidiurno resultam no aumento da mineralização da matéria orgânica, consistentes com as anomalias positivas de  $\text{N-NO}_3^-$  (RICHEY; VICTORIA, 1993; ESTEVES, 1998; WARD et al., 2015; WARD et al., 2016).

Nas estações de amostragem mais próximas a pluma amazônica (Bailique e Chaves), não houve variações significativas ( $p > 0,05$ ) quanto ao NOD, em relação as estações no canal norte e sul, próximas a Macapá (Figura 17 A). Contudo, durante o período de maior vazão, destaca-se as maiores concentrações de NOD nas estações mais ao sul (canal sul e Chaves). O padrão se inverte no período de menor vazão, com maiores concentrações nas estações ao norte (canal norte e Bailiqui). Estes padrões inversos podem estar correlacionados a vazão nos respectivos períodos, uma vez que, no canal sul, observa-se maior taxa de descarga, com exceção do período de menor vazão, onde é verificada maior taxa de descarga no canal norte, como comentado anteriormente.

**Tabela 5** - Concentrações médias  $\pm$  desvio padrão (mg N L<sup>-1</sup>) de NTD, NOD, NID, nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) nos pontos amostrais, conforme a sazonalidade.

Local (rio)	Período de amostragem	NTD (mg N L <sup>-1</sup> )	NOD (mg N L <sup>-1</sup> )	NID (mg N L <sup>-1</sup> )	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg N L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg N L <sup>-1</sup> )
Óbidos (Amazonas)	Enchente	0,24 $\pm$ 0,0	0,22 $\pm$ 0,0	0,02 $\pm$ 0,0	-	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,01
	Maior vazão	0,28 $\pm$ 0,0	0,13 $\pm$ 0,0	0,15 $\pm$ 0,0	0,02 $\pm$ 0,00	0,09 $\pm$ 0,00	0,04 $\pm$ 0,01
	Vazante	0,17 $\pm$ 0,1	0,12 $\pm$ 0,2	0,06 $\pm$ 0,0	0,01 $\pm$ 0,00	0,05 $\pm$ 0,00	-
	Menor Vazão	0,25 $\pm$ 0,0	-	-	0,02 $\pm$ 0,01	-	0,07 $\pm$ 0,03
	<b>Média</b>	<b>0,24 <math>\pm</math> 0,03</b>	<b>0,16 <math>\pm</math> 0,07</b>	<b>0,08 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>0,02 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>0,05 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>0,04 <math>\pm</math> 0,00</b>
Almeirim (Amazonas)	Enchente	0,26 $\pm$ 0,0	0,23 $\pm$ 0,0	0,03 $\pm$ 0,1	0,004 $\pm$ 0,00	0,02 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,01
	Maior vazão	0,25 $\pm$ 0,0	0,07 $\pm$ 0,0	0,18 $\pm$ 0,0	0,02 $\pm$ 0,00	0,11 $\pm$ 0,00	0,05 $\pm$ 0,01
	Vazante	0,14 $\pm$ 0,0	0,05 $\pm$ 0,0	0,09 $\pm$ 0,0	0,01 $\pm$ 0,00	0,06 $\pm$ 0,00	0,02 $\pm$ 0,01
	Menor Vazão	0,27 $\pm$ 0,0	-	-	0,01 $\pm$ 0,01	-	0,02 $\pm$ 0,01
	<b>Média</b>	<b>0,23 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,12 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,10 <math>\pm</math> 0,03</b>	<b>0,01 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>0,06 <math>\pm</math> 0,02</b>	<b>0,03 <math>\pm</math> 0,01</b>
Macapá Norte (Amazonas)	Enchente	0,27 $\pm$ 0,1	0,24 $\pm$ 0,0	0,03 $\pm$ 0,0	0,003 $\pm$ 0,00	0,03 $\pm$ 0,04	-
	Maior vazão	0,28 $\pm$ 0,1	0,09 $\pm$ 0,0	0,19 $\pm$ 0,0	0,02 $\pm$ 0,00	0,12 $\pm$ 0,04	0,05 $\pm$ 0,00
	Vazante	0,18 $\pm$ 0,0	0,10 $\pm$ 0,0	0,07 $\pm$ 0,0	0,01 $\pm$ 0,00	0,05 $\pm$ 0,03	0,02 $\pm$ 0,01
	Menor Vazão	0,25 $\pm$ 0,0	0,07 $\pm$ 0,0	0,18 $\pm$ 0,1	0,01 $\pm$ 0,00	0,13 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,02
	<b>Média</b>	<b>0,25 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,13 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,12 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,01 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>0,08 <math>\pm</math> 0,03</b>	<b>0,04 <math>\pm</math> 0,01</b>
Macapá Sul (Amazonas)	Enchente	0,24 $\pm$ 0,1	0,20 $\pm$ 0,0	0,04 $\pm$ 0,0	-	0,03 $\pm$ 0,04	0,03 $\pm$ 0,01
	Maior vazão	0,27 $\pm$ 0,1	0,10 $\pm$ 0,0	0,16 $\pm$ 0,0	0,01 $\pm$ 0,00	0,12 $\pm$ 0,00	0,04 $\pm$ 0,01
	Vazante	0,27 $\pm$ 0,0	0,15 $\pm$ 0,1	0,10 $\pm$ 0,0	0,01 $\pm$ 0,00	0,08 $\pm$ 0,00	0,03 $\pm$ 0,01
	Menor Vazão	0,28 $\pm$ 0,0	0,12 $\pm$ 0,0	0,16 $\pm$ 0,0	0,02 $\pm$ 0,10	0,11 $\pm$ 0,00	0,03 $\pm$ 0,02
	<b>Média</b>	<b>0,27 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,14 <math>\pm</math> 0,3</b>	<b>0,12 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,01 <math>\pm</math> 0,03</b>	<b>0,09 <math>\pm</math> 0,01</b>	<b>0,03 <math>\pm</math> 0,01</b>
Tributários (Tapajós + Xingu)	Enchente	0,27 $\pm$ 0,0	0,20 $\pm$ 0,0	0,07 $\pm$ 0,0	0,01 $\pm$ 0,00	0,06 $\pm$ 0,01	-
	Maior vazão	0,23 $\pm$ 0,0	0,09 $\pm$ 0,0	0,14 $\pm$ 0,0	0,02 $\pm$ 0,00	0,06 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,00
	Vazante	0,11 $\pm$ 0,0	0,03 $\pm$ 0,0	0,10 $\pm$ 0,0	0,01 $\pm$ 0,00	0,07 $\pm$ 0,02	-
	Menor Vazão	0,13 $\pm$ 0,0	0,03 $\pm$ 0,0	0,10 $\pm$ 0,2	0,02 $\pm$ 0,01	0,08 $\pm$ 0,04	-
	<b>Média</b>	<b>0,19 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,09 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>0,10 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>0,02 <math>\pm</math> 0,00</b>	<b>0,07 <math>\pm</math> 0,02</b>	<b>0,06 <math>\pm</math> 0,00</b>

Fonte: O autor.

**Tabela 6** - Fluxos médios  $\pm$  desvio padrão ( $\text{kg N s}^{-1}$ ) de NTD, NOD, NID, nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) nos pontos amostrais, conforme a sazonalidade.

Local (rio)	Período de amostragem	NTD ( $\text{kg N s}^{-1}$ )	NOD ( $\text{kg N s}^{-1}$ )	NID ( $\text{kg N s}^{-1}$ )	$\text{NO}_2^-$ ( $\text{kg N s}^{-1}$ )	$\text{NO}_3^-$ ( $\text{kg N s}^{-1}$ )	$\text{NH}_4^+$ ( $\text{kg N s}^{-1}$ )
Óbidos (Amazonas)	Enchente	29 $\pm$ 5	27 $\pm$ 4	2 $\pm$ 1	-	2 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1
	Maior vazão	71 $\pm$ 5	37 $\pm$ 4	34 $\pm$ 1	4 $\pm$ 0	23 $\pm$ 1	11 $\pm$ 1
	Vazante	43 $\pm$ 19	25 $\pm$ 20	15 $\pm$ 9	2 $\pm$ 1	13 $\pm$ 7	-
	Menor Vazão	31 $\pm$ 1	-	-	2 $\pm$ 1	-	8 $\pm$ 3
	<b>Média</b>	<b>44 <math>\pm</math> 8</b>	<b>30 <math>\pm</math> 9</b>	<b>17 <math>\pm</math> 4</b>	<b>3 <math>\pm</math> 1</b>	<b>13 <math>\pm</math> 3</b>	<b>7 <math>\pm</math> 2</b>
Almeirim (Amazonas)	Enchente	35 $\pm$ 4	32 $\pm$ 5	3 $\pm$ 1	1 $\pm$ 0	3 $\pm$ 1	2 $\pm$ 1
	Maior vazão	75 $\pm$ 4	18 $\pm$ 5	42 $\pm$ 1	5 $\pm$ 0	33 $\pm$ 1	15 $\pm$ 1
	Vazante	40 $\pm$ 2	18 $\pm$ 10	22 $\pm$ 9	3 $\pm$ 1	18 $\pm$ 9	5 $\pm$ 2
	Menor Vazão	33 $\pm$ 2	-	-	2 $\pm$ 1	-	3 $\pm$ 1
	<b>Média</b>	<b>46 <math>\pm</math> 3</b>	<b>23 <math>\pm</math> 7</b>	<b>22 <math>\pm</math> 4</b>	<b>3 <math>\pm</math> 1</b>	<b>18 <math>\pm</math> 4</b>	<b>6 <math>\pm</math> 1</b>
Canal Norte (Amazonas)	Enchente	28 $\pm$ 6	25 $\pm$ 4	3 $\pm$ 4	0 $\pm$ 0	3 $\pm$ 4	-
	Maior vazão	39 $\pm$ 6	15 $\pm$ 4	27 $\pm$ 4	2 $\pm$ 0	17 $\pm$ 4	7 $\pm$ 0
	Vazante	20 $\pm$ 2	12 $\pm$ 2	9 $\pm$ 3	1 $\pm$ 0	6 $\pm$ 4	2 $\pm$ 1
	Menor Vazão	15 $\pm$ 0	4 $\pm$ 2	11 $\pm$ 4	1 $\pm$ 0	8 $\pm$ 3	2 $\pm$ 1
	<b>Média</b>	<b>26 <math>\pm</math> 4</b>	<b>14 <math>\pm</math> 3</b>	<b>13 <math>\pm</math> 4</b>	<b>1 <math>\pm</math> 0</b>	<b>9 <math>\pm</math> 4</b>	<b>4 <math>\pm</math> 1</b>
Canal Sul (Amazonas)	Enchente	13 $\pm$ 7	13 $\pm$ 2	2 $\pm$ 2	-	2 $\pm$ 2	2 $\pm$ 1
	Maior vazão	55 $\pm$ 7	21 $\pm$ 2	34 $\pm$ 2	2 $\pm$ 0	24 $\pm$ 2	7 $\pm$ 1
	Vazante	39 $\pm$ 6	21 $\pm$ 10	15 $\pm$ 4	1 $\pm$ 0	12 $\pm$ 2	4 $\pm$ 2
	Menor Vazão	37 $\pm$ 4	8 $\pm$ 2	22 $\pm$ 4	3 $\pm$ 0	15 $\pm$ 6	4 $\pm$ 2
	<b>Média</b>	<b>36 <math>\pm</math> 6</b>	<b>16 <math>\pm</math> 4</b>	<b>18 <math>\pm</math> 3</b>	<b>2 <math>\pm</math> 0</b>	<b>13 <math>\pm</math> 3</b>	<b>4 <math>\pm</math> 2</b>
Tributários (Tapajós + Xingu)	Enchente	2 $\pm$ 1	2 $\pm$ 1	1 $\pm$ 0	0,1 $\pm$ 0,0	1 $\pm$ 0	-
	Maior vazão	4 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1	2 $\pm$ 0	0,3 $\pm$ 0,0	1 $\pm$ 0	-
	Vazante	1 $\pm$ 0	0,2 $\pm$ 0,1	0 $\pm$ 0	0,04 $\pm$ 0,02	0,3 $\pm$ 0,2	1 $\pm$ 0
	Menor Vazão	1 $\pm$ 0	-	2 $\pm$ 1	0,10 $\pm$ 0,00	0,4 $\pm$ 0,2	-
	<b>Média</b>	<b>2 <math>\pm</math> 1</b>	<b>1 <math>\pm</math> 1</b>	<b>1 <math>\pm</math> 0</b>	<b>0,1 <math>\pm</math> 0,0</b>	<b>1 <math>\pm</math> 0</b>	<b>1 <math>\pm</math> 0</b>

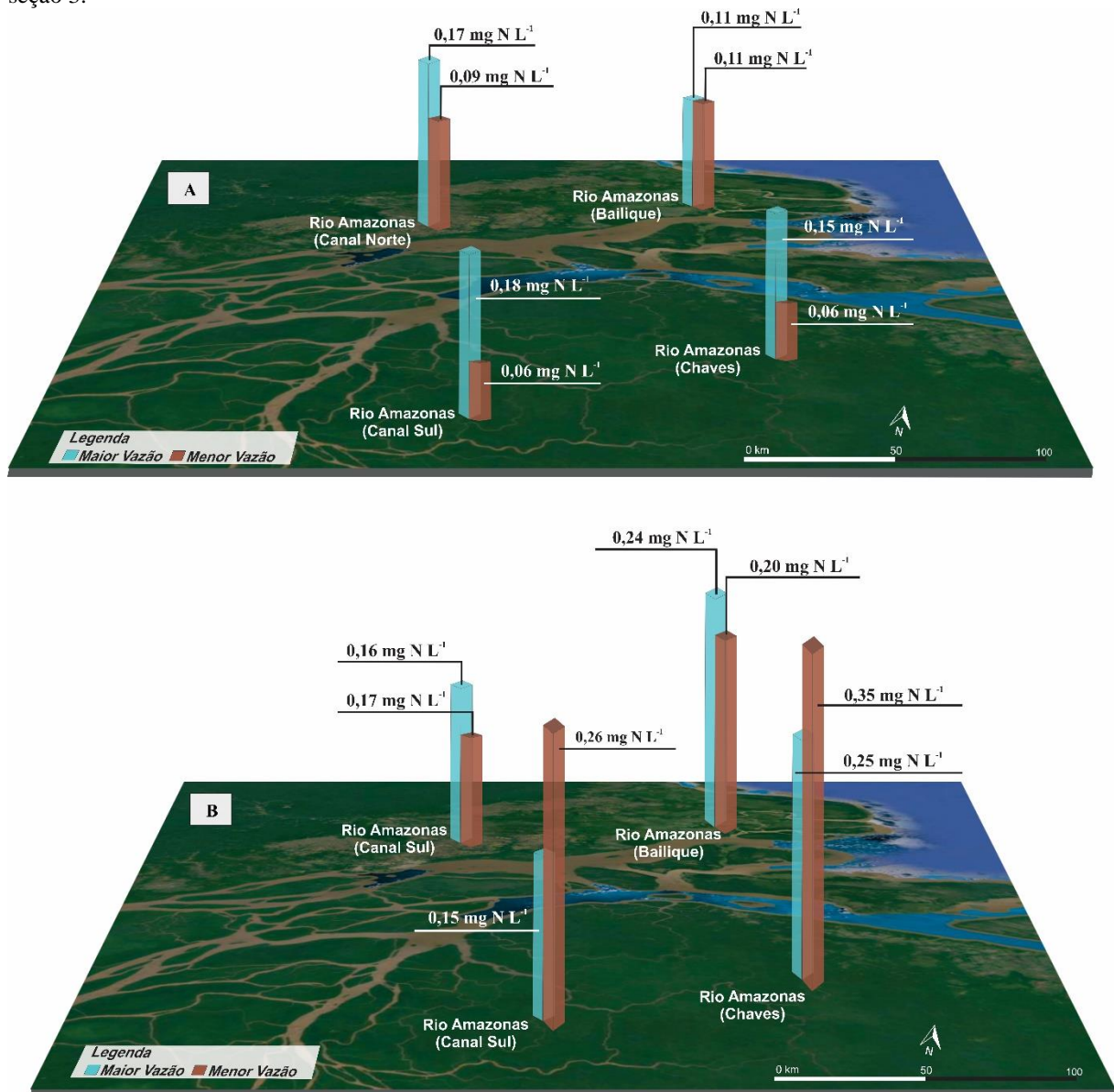
Fonte: O autor.

Com relação ao NID, foram verificados aumentos significativos ( $p < 0,05$ ) nos períodos de maior e menor vazão (Figura 17 B). No período de maior vazão foi observado aumento de 150% entre Bailique e o canal norte, enquanto que, entre canal sul e Chaves um aumento de 67% foi registrado. No período de menor vazão, aumentos de 17 e 34% foram verificados entre as respectivas estações.

A média anual de exportação de NTD ao oceano foi de 2 Tg.ano<sup>-1</sup>. O período de maior vazão é responsável pelo transporte de 38% deste total, seguido dos períodos de vazante (24%), menor vazão (21%) e enchente (17%) (Tabela 6).

O fluxo médio anual de NTD aqui registrado, foi cerca de 25% maior que o fluxo médio observado por Bustamante et al. (2015), a qual registrou valor médio igual a  $1,6 \text{ Tg.ano}^{-1}$ , em Óbidos. O fluxo médio de NTD registrado na foz do rio Amazonas, representa, aproximadamente, 46% do total de nitrogênio transportado ao oceano atlântico ( $4,37 \text{ Tg. ano}^{-1}$ ) pela América central e sul, de acordo com Howarth et al. (1996). Quanto a proporção do fluxo entre as frações orgânica e inorgânica de nitrogênio dissolvido pelo rio Amazonas, valores proporcionais foram observados, semelhante aos estudos de Bustamante et al. (2015) e Lewis et al. (1999), em Óbidos.

**Figura 17** — Concentrações de NOD (A) e NID (B) ( $\text{mg N L}^{-1}$ ) nas estações de amostragem do rio Amazonas na seção 3.



Fonte: O autor.

Com base nos resultados obtidos pela técnica de componentes principais (ACP), 80,1% da variação total das observações realizadas no canal principal, durante os períodos hidrológicos, são explicadas pelos dois primeiros componentes principais (Tabela 7), descritos pelas equações 5 e 6, representadas graficamente pelos eixos x e y, respectivamente (Figura 18).

$$\text{CP1: } 0,9\text{OD} + 0,9\text{NOD} + 0,8\text{pH} + 0,8\text{temperatura} + 0,5\text{NTD} - 0,65\text{NID} - 0,8\text{vazão} \quad (5)$$

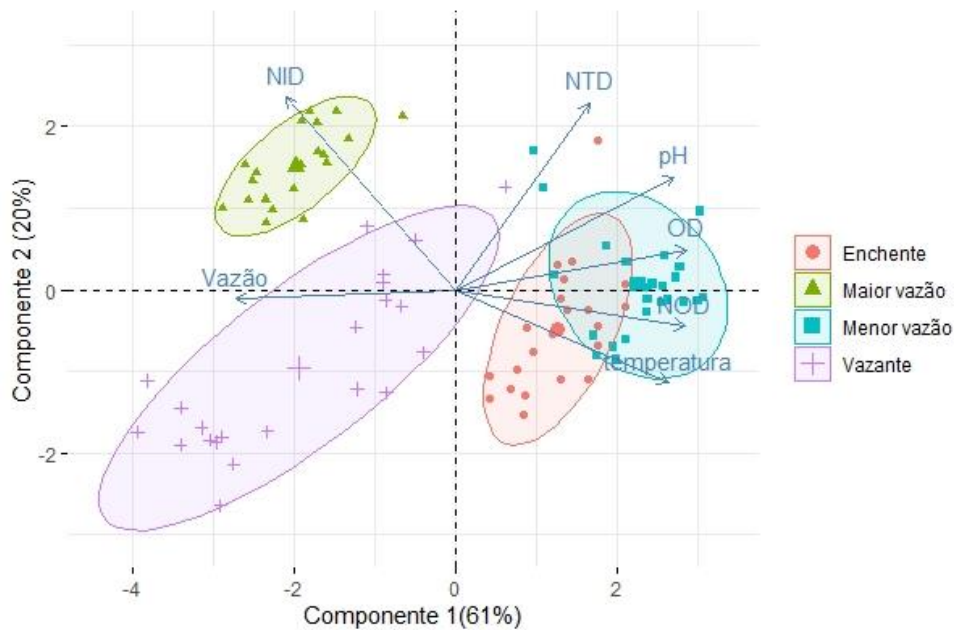
$$\text{CP2: } 0,7\text{NID} + 0,7\text{NTD} + 0,4\text{pH} + 0,15\text{OD} - 0,1\text{vazão} - 0,1\text{NOD} - 0,4\text{temperatura} \quad (6)$$

**Tabela 7** - Componentes principais, autovalores (variâncias), porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes, a partir da matriz de correlação (NTD, NOD, NID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).

Componente Principal	Autovalores	Proporção	Proporção Acumulada (%)
Componente 1	4,2	60,6	60,6
Componente 2	3,1	19,4	80,1
Componente 3	0,7	10,6	90,7
Componente 4	0,4	5,32	96,0
Componente 5	0,2	2,62	98,7
Componente 6	0,1	1,34	100
Componente 7	$3,3 \cdot 10^{-31}$	4,83	100

Fonte: O autor.

**Figura 18** — Biplot da análise de componentes principais a partir da matriz de correlação (NTD, NOD, NID, temperatura, oxigênio dissolvido - OD, pH e vazão).



Fonte: O autor

O componente 1 (CP1) foi responsável por explicar 60,6% da distribuição dos dados (Tabela 7), sendo as variáveis oxigênio dissolvido, NOD, pH temperatura e vazão as principais variáveis deste modelo. Oxigênio dissolvido, NOD, pH e temperatura possuem correlação significativa e positiva entre si, com maior influência sobre a variabilidade dos dados nos períodos de menor vazão e enchente. Semelhante ao COD, o NOD possui correlação significativa com a entrada de substratos de origem alóctone, principalmente no início da estação chuvosa (enchente). Esta correlação também é verificada no período de menor vazão, contudo, isto pode estar atribuído ao fato das observações de NOD, neste período, serem referentes apenas aos canais norte e sul, próximo a Macapá, apontando um possível aumento de substratos com origem algal. Ainda com base na equação 5, observa-se influência significativa da variável vazão sobre a variabilidade dos dados no período de vazante, mantendo correlações inversamente proporcionais com as variáveis anteriormente mencionadas.

O componente 2 (CP2) foi responsável por explicar 19,4% da variação total dos dados (Tabela 7). Com base na equação 6 e figura 14, destaca-se a influência da variável NID sobre a variação dos dados no período de maior vazão, resultando também em uma maior influência sobre as concentrações de NTD no respectivo período. De maneira contrária aos estudos de Devol et al. (1995), os quais apontam o NID correlacionado ao oxigênio dissolvido, os resultados aqui obtidos demonstram baixa correlação entre as duas variáveis e significativa correlação entre as concentrações de NID e o processo de remineralização da matéria orgânica.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido às características naturais, variações sazonais e espaciais das concentrações de COD e NOD, entre o canal principal do rio Amazonas e os tributários de águas claras são reguladas principalmente pela entrada de material alóctone, influenciando principalmente as concentrações dos rios Tapajós e Xingu, no período de enchente e maior vazão. As variações sazonais das concentrações médias das frações inorgânicas, CID e NID, por sua vez, foram menos uniformes, padrão atribuído, principalmente, a influência da vazão, interferência de áreas alagáveis e processos de remineralização da matéria orgânica.

Quanto a distribuição longitudinal no canal principal do rio Amazonas, não são observados decréscimos progressivos das concentrações de carbono e nitrogênio dissolvido, a jusante de Óbidos. Entre as estações de amostragens de Óbidos e Almeirim, contribuições de material alóctone no período de enchente, material lábil com origem em áreas alagáveis e influência do aumento da atividade primária são suficientes para manter concentrações constantes. Entre as estações de Almeirim e a foz do rio Amazonas, além dos fatores citados anteriormente, o ciclo de maré semidiurno tem intensa influência na maior oxigenação da água, aumento da produtividade primária e disponibilização de material lábil, promovendo a ocorrência do efeito *priming* na região. Tais fatores resultam em enorme variabilidade e aumentos nas concentrações média em certos períodos.

Os fluxos de carbono dissolvido em direção ao oceano, aqui calculados, foram semelhantes aos fluxos observados em Óbidos, em estudos prévios, porém, os fluxos de nitrogênio dissolvido em direção ao oceano foram cerca de 25% maiores que os fluxos anteriormente calculados em Óbidos, apontando importante influência da região do baixo rio Amazonas na exportação de nitrogênio ao oceano.

A variabilidade dos dados de carbono e nitrogênio dissolvido, ao longo dos períodos hidrológicos, possuem alto grau de explicação pelas variáveis estudadas, próximo a 80%, de acordo com a estatística multivariada (ACP). Os modelos resultantes análises estatísticas reafirmam a importância de processos como a intensificação da produtividade primária e entrada de material alóctone nos períodos de menor vazão e enchente, respectivamente. Destaca-se também a importância da interação canal principal e áreas alagáveis para o carbono dissolvido, no período de maior vazão e vazante, além dos processos de remineralização para o NID, também no período de maior vazão.



## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb). Brasília: ANA, 2019.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s.l.]. v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

BENNER, R. *et al.* Bacterial carbon metabolism in the Amazon River system. **Limnology and Oceanography**, [s.l.]. 1995. DOI: 10.4319/lo.1995.40.7.1262

BERNARDES, M. C. *et al.* Riverine organic matter composition as a function of land use changes, southwest Amazon. **Ecological Applications**, [s.l.]. 2004.

BERTASSOLI, D. J. *et al.* The Fate of Carbon in Sediments of the Xingu and Tapajós Clearwater Rivers, Eastern Amazon. **Frontiers in Marine Science**, [s.l.]. 2017. DOI: 10.3389/fmars.2017.00044

BOUCHER, D.; CHI, D. Amazon Deforestation in Brazil: What Has Not Happened and How the Global Media Covered It. **Tropical Conservation Science**, [s.l.]. 2018. DOI: 10.1177/1940082918794325

BUSTAMANTE, M. M. C. *et al.* Nitrogen management challenges in major watersheds of South America. **Environmental Research Letters**, [s.l.]. v. 10, n. 6, 2015. DOI: 10.1088/1748-9326/10/6/065007

CARVALHO, W. D. *et al.* Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. **Perspectives in Ecology and Conservation**, [s.l.]. 2019. DOI: 10.1016/j.pecon.2019.06.002

COE, M. T. *et al.* Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, [s.l.]. 2002. DOI: 10.1029/2001JD000740

COPPOLA, A. I. *et al.* Marked isotopic variability within and between the Amazon River and marine dissolved black carbon pools. **Nature Communications**, [s.l.]. 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-11543-9

DAGG, M. *et al.* Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: Plume processes. **Continental Shelf Research**, [s.l.]. 2004. DOI: 10.1016/j.csr.2004.02.003

DEVOL, A. H. *et al.* Nutrient addition experiments in Lago Jacaretinga, Central Amazon, Brazil: 2. The effect of humic and fulvic acids. **Hydrobiologia**, [s.l.]. 1984. DOI: 10.1007/BF00011569

DEVOL, A. H.; HEDGES, J. I. Organic Matter and Nutrients in the Mainstream Amazon River. In: MCCLAIN, M. E.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. (Eds.). **The Biogeochemistry of the Amazon Basin**. [s.l.] Oxford, 2001. p. 275–306.

DEVOL, A. H. *et al.* Seasonal variation in chemical distributions in the Amazon (Solimões)

- River: A multiyear time series. **Global Biogeochemical Cycles**, [s.l]. 1995. DOI: 10.1029/95GB01145
- DICKINSON, R. E.; RICHEY, J. E.; RIBEIRO, M. N. G. Chapter 13. Element cycling in the Amazon basin: a Riverine Perspective. **The Geophysiology of Amazon**, [s.l].1987.
- EOM, J.; SEO, K. W.; RYU, D. Estimation of Amazon River discharge based on EOF analysis of GRACE gravity data. **Remote Sensing of Environment**, [s.l]. 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.011
- ERTEL, J. R. *et al.* Dissolved humic substances of the Amazon River system. **Limnology and Oceanography**, [s.l].1986. DOI: 10.4319/lo.1986.31.4.0739
- ESCOBAR, H. Amazon fires clearly linked to deforestation, scientists say. **Science**, [s.l]. v. 365, n. 6456, p. 853–853, 30 ago. 2019. DOI: 10.1126/science.365.6456.853
- ESTEVEZ, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2ª Ed. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1988.
- FEITOSA, I. B. *et al.* Plankton community interactions in an Amazonian floodplain lake, from bacteria to zooplankton. **Hydrobiologia**, [s.l]. 2019. DOI: 10.1007/s10750-018-3855-x
- FORSBERG, B. R. *et al.* Factors controlling nutrient concentrations in Amazon floodplain lakes. **Limnology and Oceanography**, [s.l]. 1988. DOI: 10.4319/lo.1988.33.1.0041
- GAGNE-MAYNARD, W. C. *et al.* Evaluation of Primary Production in the Lower Amazon River Based on a Dissolved Oxygen Stable Isotopic Mass Balance. **Frontiers in Marine Science**, [s.l]. 2017. DOI: 10.3389/fmars.2017.00026
- GIBBS, R. E. Water chemistry of the Amazon River. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s.l]. v. 36, p. 1061–1066, 1972. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(72\)90021-X](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(72)90021-X)
- GOMES, V. H. F. *et al.* Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. **Nature Climate Change**, [s.l]. 2019. DOI: 10.1038/s41558-019-0500-2
- GUYOT, J. L.; WASSON, J. G. Regional pattern of riverine dissolved organic carbon in the Amazon drainage basin of Bolivia. **Limnology and Oceanography**, [s.l]. v. 39, n. 2, p. 452–458, mar. 1994. DOI: 10.4319/lo.1994.39.2.0452
- HEDGES, J. I. *et al.* Organic matter in Bolivian tributaries of the Amazon River: A comparison to the lower mainstream. **Limnology and Oceanography**, [s.l]. 2000. DOI: 10.4319/lo.2000.45.7.1449
- HOWARTH, R. W. *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. **Biogeochemistry**, [s.l]. v. 35, n. 1, p. 75–139, 1996. DOI: 10.1007/BF02179825
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Bases cartográficas contínuas. Brasília: IBGE, 2018.
- JUNK, W. J. *et al.* A classification of major naturally-occurring amazonian lowland wetlands.

**Wetlands**, [s.l.]. 2011. DOI: 10.1007/s13157-011-0190-7

JUNK, W. J.; WEBER, G. E. Amazonian floodplains: a limnological perspective. **SIL Proceedings, 1922-2010**, [s.l.]. 1996. DOI: 10.1080/03680770.1995.11900699

KOSCHORRECK, M.; DARWICH, A. Nitrogen dynamics in seasonally flooded soils in the Amazon floodplain. **Wetlands Ecology and Management**, [s.l.]. 2003. DOI: 10.1023/B:WETL.0000005536.39074.72

KOSTASCHUK, R.; VILLARD, P.; BEST, J. Measuring Velocity and Shear Stress over Dunes with Acoustic Doppler Profiler. **Journal of Hydraulic Engineering-ASCE**, [s.l.]. 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(932)

KOSUTH, P. *et al.*. Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. **Hydrological Processes**, [s.l.]. 2009. DOI: 10.1002/hyp.7387

LE POUPON, C.; BENAÏM, J. Y. Distribution of Organic Carbon and Nitrogen in Particulate, Colloid and Dissolved Phases from the Amazon River System. In: de LACERDA, L. Drude; SANTELLI, R.E.; DUURSMA, E. K.; ABRÃO, J. J. (eds) **Environmental Geochemistry in Tropical and Subtropical Environments**. Environmental Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.

LEWIS, W. M. *et al.* Nitrogen yields from undisturbed watersheds in the Americas. **Biogeochemistry**, [s.l.]. 1999. DOI: 10.1007/BF01007577

LI, Mi. *et al.* The carbon flux of global rivers: A re-evaluation of amount and spatial patterns. **Ecological Indicators**, [s.l.]. 2017. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.049

MARTINELLI, L. *et al.*. Descarga de sólidos dissolvidos totais do Rio Amazonas e seus principais tributários. **Geochim. Brasil.**, [s.l.]. v. 3, p. 141–148, 1 jan. 1989.

MEDEIROS, P. M. *et al.* Fate of the Amazon River dissolved organic matter in the tropical Atlantic Ocean. **Global Biogeochemical Cycles**, [s.l.]. 2015. DOI: 10.1002/2015GB005115

MELACK, J.; FORSBERG, B. Biogeochemistry of Amazon floodplain lakes and associated wetlands. In: MCCLAIN, M.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. (Eds.). **The biogeochemistry of the Amazon Basin**. New York: Oxford University Press, 2001. p. 235–274.

MELACK, J. M. Amazon floodplain lakes: Shape, fetch, and stratification, **SIL Proceedings, 1922-2010**, p. 1278-1282, 1984. DOI: 10.1080/03680770.1983.11897485

MELACK, J. M. Amazon floodplain lakes: Shape, fetch, and stratification. **SIL Proceedings, 1922-2010**, [s.l.]. 1984. DOI: 10.1080/03680770.1983.11897485

MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote Sensing of the Distribution and Extent of Wetlands in the Amazon Basin. In: JUNK, W. *et al.* (Eds.). **Amazonian Floodplain Forests. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)**. Vol 210 ed. Dordrecht: Springer, 2010. p. 43–59.

MEYBECK, M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. **American**

**Journal of Science**, [s.l.]. 1982. DOI: 10.2475/ajs.282.4.401

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia**. Brasília: MMA, 2006.

MOLINIER, M. *et al.* **Les regimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents**. SIL Proceedings IAHS-AISH Publication, 1996.

MOLLERI, G. S. F.; NOVO, Evelyn M. L. D. M.; KAMPEL, M.. Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. **Continental Shelf Research**, [s.l.]. 2010. DOI: 10.1016/j.csr.2009.11.015

MOREIRA-TURCQ, P. *et al.* Exportation of organic carbon from the Amazon River and its main tributaries. **Hydrological Processes**, [s.l.]. 2003. DOI: 10.1002/hyp.1287

MORTATTI, J. *et al.* Origem Do Carbono Inorgânico Dissolvido No Rio Tietê (São Paulo): Reações De Equilíbrio E Variabilidade Temporal. **Geochimica Brasiliensis**, [s.l.]. v. 20, n. 3, p. 267–277, 2006a. DOI: 10.21715/gb.v20i3.249

MORTATTI, J. *et al.* Fluxo de carbono inorgânico dissolvido no rio piracicaba (São Paulo): partição e reações de equilíbrio do sistema carbonato. **Geociencias**, [s.l.]. 2006b.

NOBRE, Carlos A. *et al.* Characteristics of Amazonian climate: Main features. In: UNION, A. G. (Ed.). **Geophysical Monograph Series**. [s.l.: s.n.]. p. 149–162, 2009

OLIVEIRA, J. B. **PEDOLOGIA APLICADA**. 4. ed. Piracicaba: Fealq, 2011. 592 p.]

PATEL, N. *et al.* Fluxes of dissolved and colloidal organic carbon, along the Purus and Amazonas rivers (Brazil). **Science of the Total Environment**, [s.l.]. 1999. DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00069-8

QUAY, Paul D. *et al.* Carbon cycling in the Amazon River: Implications from the <sup>13</sup>C compositions of particles and solutes. **Limnology and Oceanography**, [s.l.]. v. 37, n. 4, p. 857–871, jun. 1992. DOI: 10.4319/lo.1992.37.4.0857

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RICHEY, J. E. *et al.* The biogeochemistry of a major river system: the Amazon case study. In: DEGENS, E. T.; KEMPE, S.; RICHEY, J. E. (Eds.). **Biogeochemistry of major world rivers**. New York: SCOPE #42 (John Wiley & Sons), 1991. p. 57–74.

RICHEY, J. E. *et al.* Organic matter and nutrient dynamics in river corridors of the Amazon basin and their response to anthropogenic change. **Ciência e Cultura-Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science**, vol. 49, no. 1-2, p. 98-110, 1997

RICHEY, J. E.; SALATI, E.; DOS SANTOS, U. Biochemistry of the Amazon River: an update. **Mitt. Geol-Palaont. Inst.**, 58 245-257. 1985

RICHEY, J. E. *et al.* Organic carbon: Oxidation and transport in the Amazon River. **Science**,

[s.l.]. 1980. DOI: 10.1126/science.207.4437.1348

RICHEY, J. E. Particulate and dissolved carbon in the Amazon River: a preliminary annual budget. **SIL Proceedings, 1922-2010**, [s.l.]. 1981a. DOI: 10.1080/03680770.1980.11897109

RICHEY, J. E. Fluxes of organic matter in rivers relative to the global carbon cycle. **Carbon Dioxide Effects Research and Assessment Program**, [s.l.].p. 270, 1981b.

RICHEY, J. E. The Amazon river system: a biogeochemical model. **Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Pt**, [s.l.]. v. 1, p. 365–378, 1982.

RICHEY, J. E. *et al.* Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. **Limnology and Oceanography**, [s.l.]. v. 35, n. 2, p. 352–371, 1990. DOI: 10.4319/lo.1990.35.2.0352

RICHEY, J. E.; NOBRE, C.; DESER, C. Amazon River discharge and climate variability: 1903 to 1985. **Science**, [s.l.]. 1989. DOI: 10.1126/science.246.4926.101

RICHEY, J. E. *et al.* (Eds.). In: **Interactions of C, N, P and S Biogeochemical Cycles and Global Change**. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change), vol 4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993. p. 123–139.

RICHEY, J. E.; VICTORIA, R. L. Continental-scale biogeochemical cycles of the Amazon River system. **SIL Proceedings, 1922-2010**, [s.l.]. 1996. DOI: 10.1080/03680770.1995.11900705

SANTOS, M. L. S. *et al.* Nutrient and phytoplankton biomass in the Amazon River shelf waters. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, [s.l.].2008.

SAWAKUCHI, H. O. *et al.* Carbon Dioxide Emissions along the Lower Amazon River. **Frontiers in Marine Science**, [s.l.]. 2017. DOI: 10.3389/fmars.2017.00076

SCHAEFER, C. E. G. R. *et al.* Solos da região Amazônica. In: CURI, N. *et al.* (Eds.). **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. 1. ed. [s.l.] Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 111–176.

SCHLESINGER, W. H.; MELACK, J. M. Transport of organic carbon in the world's rivers. **Tellus**, [s.l.]. 1981. DOI: 10.3402/tellusa.v33i2.10706

SEDELL, J. R.; RICHEY, J. E.; SWANSON, F. J. 1989. **The river continuum concept: A basis for the expected ecosystem behavior of very large rivers?** In: Dodge, Douglas P., ed. Proceedings of the international large river symposium; Honey Harbour, ON. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106. [Place of publication unknown]: [Publisher unknown]: 49-55.

SEIDEL, M. *et al.* Molecular-level changes of dissolved organic matter along the Amazon River-to-ocean continuum. **Marine Chemistry**, [s.l.]. 2015. DOI: 10.1016/j.marchem.2015.06.019

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - SFB. **Florestas do Brasil em resumo - 2010**: dados de 2005-2010. Brasília: SFB; 2010. 152 p.

SIOLI, H. **Amazônia: fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais**. [s.l.] Editora Vozes, 1985.

SIPLER, R. E.; BRONK, D. A. Dynamics of Dissolved Organic Nitrogen. In: HANSEL, D.; CARLSON, C. A. (Eds.). **Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter**. second edition [s.l.] Elsevier, 2014. p. 127–232.

SMOAK, J. M.; KREST, J. M.; SWARZENSKI, P. W. Geochemistry of the Amazon Estuary. In: **Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. p. 71–90.

SO HYBAM - Environmental Research Observatory. Disponível em: < <http://www.ore-hybam.org/>>

SORRIBAS, M. V. *et al.* Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. **Climatic Change**, [s.l.]. 2016. DOI: 10.1007/s10584-016-1640-2

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. [s.l.] Oficina de Textos, 2008.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY - USGS. EarthExplorer. 2018 Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 29 de jun. de 2018.

VALERIO, A. M. *et al.* Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and pCO<sub>2</sub> in the Lower Amazon River. **Optics Express**, [s.l.]. 2018. DOI: 10.1364/OE.26.00A657

VANNOTE, R. L. *et al.* The River Continuum Concept. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, [s.l.]. v. 37, n. 1, p. 130–137, 1 jan. 1980. DOI: 10.1139/f80-017

WARD, N. D. *et al.* Degradation of terrestrially derived macromolecules in the Amazon River. **Nature Geoscience**, [s.l.]. 2013. DOI: 10.1038/ngeo1817

WARD, N. D. *et al.* The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River-Óbidos to the ocean. **Marine Chemistry**, [s.l.]. 2015. DOI: 10.1016/j.marchem.2015.06.013

WARD, N. D. *et al.* The reactivity of plant-derived organic matter and the potential importance of priming effects along the lower Amazon River. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, [s.l.]. 2016. DOI: 10.1002/2016JG003342

WARD, N. D. *et al.* Where Carbon Goes When Water Flows: Carbon Cycling across the Aquatic Continuum. **Frontiers in Marine Science**, [s.l.]. 2017. DOI: 10.3389/fmars.2017.00007

WARD, N. D. *et al.* Velocity-amplified microbial respiration rates in the lower Amazon River. **Limnology and Oceanography Letters**, [s.l.]. 2018. DOI: 10.1002/lol2.10062

WEATHERS, K. C.; STRAYER, D. L.; LIKENS, G. E. **Fundamentos de Ciência dos Ecossistemas**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2015.

WETZEL, R.G. Gradient-dominated ecosystems: sources and regulatory functions of dissolved organic matter in freshwater ecosystems. **Hydrobiologia**, n. 229, 181–198, 1992. doi:10.1007/BF00007000