



INTRUSÃO SALINA EM UM SISTEMA RIO – PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO TROPICAL INFLUENCIADO POR MACROMARÉS – RIO PINDARÉ (MA)

Walter Luis Muedas Yauri¹ & Ricardo Barbieri^{2*}

¹ Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Oceanografia e Limnologia, Laboratório de Maricultura, Av. dos Portugueses, 1966, Vila Bacanga, CEP: 65080-805, São Luis, MA, Brasil.

² Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Oceanografia e Limnologia, Laboratório de Biogeociclos e Limnologia, Av. dos Portugueses, 1966, Vila Bacanga, CEP: 65080-805, São Luis, MA, Brasil.

E-mail: walter_muedas@yahoo.com.br, limnobarbi@yahoo.com.br (*corresponding author)

Resumo: O baixo curso do rio Pindaré faz parte de um complexo rio-planície de inundação que possui alto dinamismo, principalmente no nível de água e em seus parâmetros físicos e químicos, como resultado do período chuvoso e também altas marés no período seco. O presente estudo teve como objetivo avaliar a intrusão salina no baixo curso do rio Pindaré, até as proximidades da cidade de Cajari, por meio das variáveis físico-químicas. Foram realizadas seis campanhas de coleta, de dezembro de 2014 a fevereiro de 2016, em sete pontos de amostragem. Os parâmetros medidos foram material em suspensão (TSS), transparência (Secchi), e temperatura, condutividade elétrica, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, potencial oxi-redox e percentual de oxigênio na água, com o multiparâmetro da marca YSI® modelo 556. Parâmetros como transparência da água (25 cm) e percentual de oxigênio dissolvido (85%) apresentaram valores maiores na zona mais distante da influência da maré e menores na zona com alta influência (12 cm e 65%, respectivamente), enquanto que salinidade, condutividade elétrica e pH tiveram valores maiores na zona com alta influência da maré (2 g kg⁻¹, 5.100 µS cm⁻¹ e 7,6, respectivamente). Os valores de TSS variaram de 10,2 mg L⁻¹ a 400,1 mg L⁻¹, 40 km e 25 km da foz do rio Pindaré respectivamente, durante a maré de sizígia (período seco), mostrando o efeito de turbulência quanto mais próximo da desembocadura. Foram observadas variações nos parâmetros, indicando que a intrusão salina no baixo curso do rio Pindaré influencia os parâmetros físico-químicos da água na estação seca, principalmente nas marés de sizígia. O aumento da vazão de água doce do rio e o alto nível de água na estação chuvosa induziram características de água doce no trecho estudado do rio.

Palavras-chaves: parâmetros físico-químicos; influência salina; marés; rio tropical.

SALINE INTRUSION IN A TROPICAL RIVER – FLOODPLAIN SYSTEM INFLUENCED BY MACRO-TIDES – PINDARÉ RIVER (MA), BRAZIL: The lower course of the Pindaré River is part of a river-floodplain complex that has high dynamism, mainly in its water level, physical and chemical parameters, as a result of the rainy season and also high tides during dry season. The present study aimed to evaluate the saline intrusion in the lower course of the Pindaré River, up to the vicinity of the city of Cajari, through the water physical and chemical variables. Six campaigns were carried out at seven sampling stations from December 2014 to February 2016. The parameters measured were total suspended solids (TSS), transparency (Secchi), and temperature, electrical conductivity, salinity, pH, dissolved oxygen, oxy-redox potential and percentage of oxygen in water using the YSI® model 556 multiparameter. Water transparency (25 cm) and percentage

of dissolved oxygen (85%) showed higher values in the área under less tidal influence and lower values in the area with high tidal influence (12 cm and 65%, respectively), while salinity, electrical conductivity and pH had higher values in the zone with high tidal influence (2 g kg^{-1} ; $5,100 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ and 7.6, respectively). TSS values ranged from 10.2 to 400.1 mg L^{-1} , 40 km and 25 km from the outfall of the Pindaré River, respectively, that is the higher turbulence effect the closer to the mouth during the spring tide in dry season. Variations in the parameters were observed, indicating that the saline intrusion in the lower course of the Pindaré River influences the water physical and chemical parameters in the dry season, especially in the spring tides. The increase in freshwater discharge from the river and the high water level in the rainy season induced characteristics of freshwater in the studied section of the river.

Keywords: physical-chemical parameters; saline influence; tides; tropical river.

INTRODUÇÃO

Os oceanos sofreram elevação média de nível em torno de 19 cm entre 1901 e 2010, segundo relato de Marques (2017). Uma das conseqüências da elevação do nível dos oceanos é a intrusão salina nos continentes, alterando as características ecológicas, sociais e econômicas de várias áreas. A intrusão salina e seus efeitos na zona costeira dos continentes tem sido objeto de vários estudos no planeta, como p. ex. Zhou *et al.* (2012), que analisaram o comportamento do estuário do rio Zhujiang no sudoeste da China usando um modelo tridimensional com medidas da descarga do rio e do efeito do vento para a entrada de água salgada durante um período de baixa vazão; Shivaprasad *et al.* (2013) estudaram a variabilidade da salinidade no estuário de Cochin, sudoeste da Índia, entre marés de sizígia e quadratura no ciclo sazonal seco e chuvoso, bem como sua influência sobre variáveis químicas e biológicas; Molinas *et al.* (2014) apresentaram resultados numéricos obtidos em experimento de modelagem que servem como base para descrição geral da dinâmica da zona frontal, abordando o papel das marés, descarga do rio e força do vento na estrutura e posição da frente de salinidade de fundo na foz do rio Amazonas; Sridevi *et al.* (2015), para examinar as mudanças nas variáveis físicas do ambiente, foi realizado um estudo sistemático que se estendeu ao longo de 19 meses, para compreender a influência da vazão do rio e das marés na estratificação, intrusão de sal, balanço de sal e tempo de lavagem no estuário Gautami-Godavari (Índia); Alcérreca-Huerta *et al.* (2019) investigaram a intrusão de água salgada no alto estuário do rio Grijalva (México), no interior da Reserva da Biosfera “Pantanos de Centla”; e

Magolan & Halls (2020) estudaram as mudanças nas áreas úmidas ao longo do tempo em dois riachos de maré do estuário do rio Cape Fear no sudeste da Carolina do Norte (EUA), para determinar se existe uma relação espacial entre mudança de habitat, geografia física características e a taxa de migração das zonas úmidas a montante.

Existem inúmeras pesquisas em estuários quanto a estratificação física, descarga do rio, marés, carga de sólidos em suspensão e pluma na zona costeira do Brasil (Cavalcante *et al.* 2013, Molinas *et al.* 2014, Mata-Pavione *et al.* 2019, Nogueira, 2020, Nittrouer *et al.* 2021). Todavia, vários estudos sobre a intrusão salina ou da variação entre marés dentro de estuários tem sido com a variabilidade de comunidades biológicas e a conservação de espécies (Carvalho & Couto 2011, Magris *et al.* 2011, Costa *et al.* 2013, Filho & Aviz 2013, Silva *et al.* 2014).

Até o final do século 20, havia falta de dados regulares sobre a descarga fluvial, e o efeito das macromarés nos estuários e nas planícies costeiras do estado do Maranhão. Com a criação da política estadual de recursos hídricos - PERH (Lei Estadual N° 8.149/04), a Secretaria de Meio Ambiente do estado (SEMA) estabeleceu parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA) para a instalação ou controle de estações meteorológicas e fluviométricas nas bacias do estado. A ANA (2009) publicou uma tabela com a rede de estações fluviométricas do Brasil, incluindo aquelas instaladas no Maranhão pelo antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE desde 1971), e o Núcleo de Geoprocessamento da UEMA (UEMA 2011) fez o primeiro relatório sobre a hidrologia do Estado do Maranhão.

Realizando um trabalho de caracterização hidrológica e meteorológica da bacia do Rio Pindaré, Abreu (2013) obteve resultados consistentes sobre o ciclo hidrológico na bacia mostrando regularidade na vazão do rio, com base nos dados obtidos dos postos pluviométricos, fluviométricos e de uma estação climatológica selecionada, disponibilizados pelo banco de dados Hidroweb da ANA e pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Por outro lado, os dados hidrológicos monitorados pela ANA/CPRM (Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais), independente da série histórica, mostraram que há uma tendência de redução da vazão dos rios principais do Maranhão. Esta evidência pode estar associada a diversos fatores, como a variabilidade climática, à formação geológica da bacia, o uso e ocupação do solo, a intensificação do desmatamento e queimadas, que têm consequência direta na disponibilidade hídrica (IMESC 2019).

Alguns dos estudos já realizados na bacia do rio Pindaré buscaram, por exemplo, caracterizar e comparar limnologicamente as áreas alagáveis da bacia (Ibañez *et al.* 2000, Costa Neto *et al.* 2001), mensurar a carga de nitrogênio, fósforo e sólidos em suspensão transportados pelo rio (Pompêo *et al.* 2002, Lopes 2006), avaliar o ciclo hidrológico na bacia (Abreu 2013) e diagnosticar a qualidade da água no trecho médio do rio (Silva *et al.* 2016). A redução da vazão do rio Pindaré e a intrusão salina no baixo curso do rio são fenômenos que tem sido observados por ribeirinhos desde o final dos anos 90, porém ainda não avaliados cientificamente. O rio Pindaré, junto à Baixada Maranhense, faz parte de um complexo de ecossistemas que possui alto dinamismo, principalmente em seus parâmetros físicos e químicos como consequência do pulso de inundação, que é um processo de enchente e vazante que acontece anualmente e, mais recentemente sob efeito das macromarés em razão do processo de assoreamento no baixo curso, tornando estes ambientes particularmente interessantes para pesquisas envolvendo a dinâmica das suas águas (Costa Neto *et al.* 2001). Pinheiro & Arouche (2013) mencionam impactos como desmatamento, queimada, erosão do solo, caça e a pesca predatória, criação extensiva de búfalos nos campos naturais, construção de

barragens, entre outros, que têm produzido consequências danosas nos ambientes da Baixada Maranhense, inclusive a diminuição do fluxo de água para as bacias lacustres e campos alagáveis.

Este trabalho teve o objetivo de analisar o fenômeno de intrusão salina no baixo curso do rio Pindaré, usando para isso variáveis físico-químicas da água durante as mudanças da situação de maré (enchente e vazante) e da fase lunar (quadratura e sizígia).

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um trecho do baixo curso do rio Pindaré, próximo à cidade de Cajari. A bacia hidrográfica do rio Pindaré, que é afluente do rio Mearim (UEMA 2016), está situada no estado do Maranhão, entre os paralelos 3° 11' e 5° 51' Sul e os meridianos 45° 38' e 46° 26' Oeste. A nascente do rio está localizada nas proximidades das cidades de Montes Altos e Amarante do Maranhão, na serra do Gurupi em área indígena Krikati a cerca de 300 metros de altitude. O rio Pindaré percorre cerca de 466,3 km até atingir a sua desembocadura no rio Mearim e possui área de drenagem total de aproximadamente 40.482 km² (Abreu 2013) (Figura 1). Sua desembocadura dista cerca de 20 km da zona estuarina na baía de São Marcos.

De acordo com a classificação de Köppen (Strahler 1960), o clima na área da bacia é o tropical chuvoso, tipo Aw, apresentando uma estação seca no inverno. Segundo o IMESC/ZEEMA (2019), os valores de precipitação anuais podem ser superiores a 2000 mm no setor Norte do bioma amazônico na bacia e valores abaixo de 1500 mm mais ao Sul, com valores abaixo de 900 mm no extremo Sul. As temperaturas médias do ar variam de 25 °C nas nascentes ao Sul e aumentam até 28 °C no baixo curso ao Norte. Todavia, as máximas podem atingir 32 °C no baixo curso entre os meses de setembro e novembro, estação seca (UEMA 2016).

A área da bacia do rio Pindaré se insere no bioma amazônico, área de transição entre a Floresta Amazônica e o semiárido nordestino. A vegetação original da bacia foi representada pela Floresta Ombrófila Densa Amazônica a oeste e ao sul, atualmente bastante desmatada e modificada

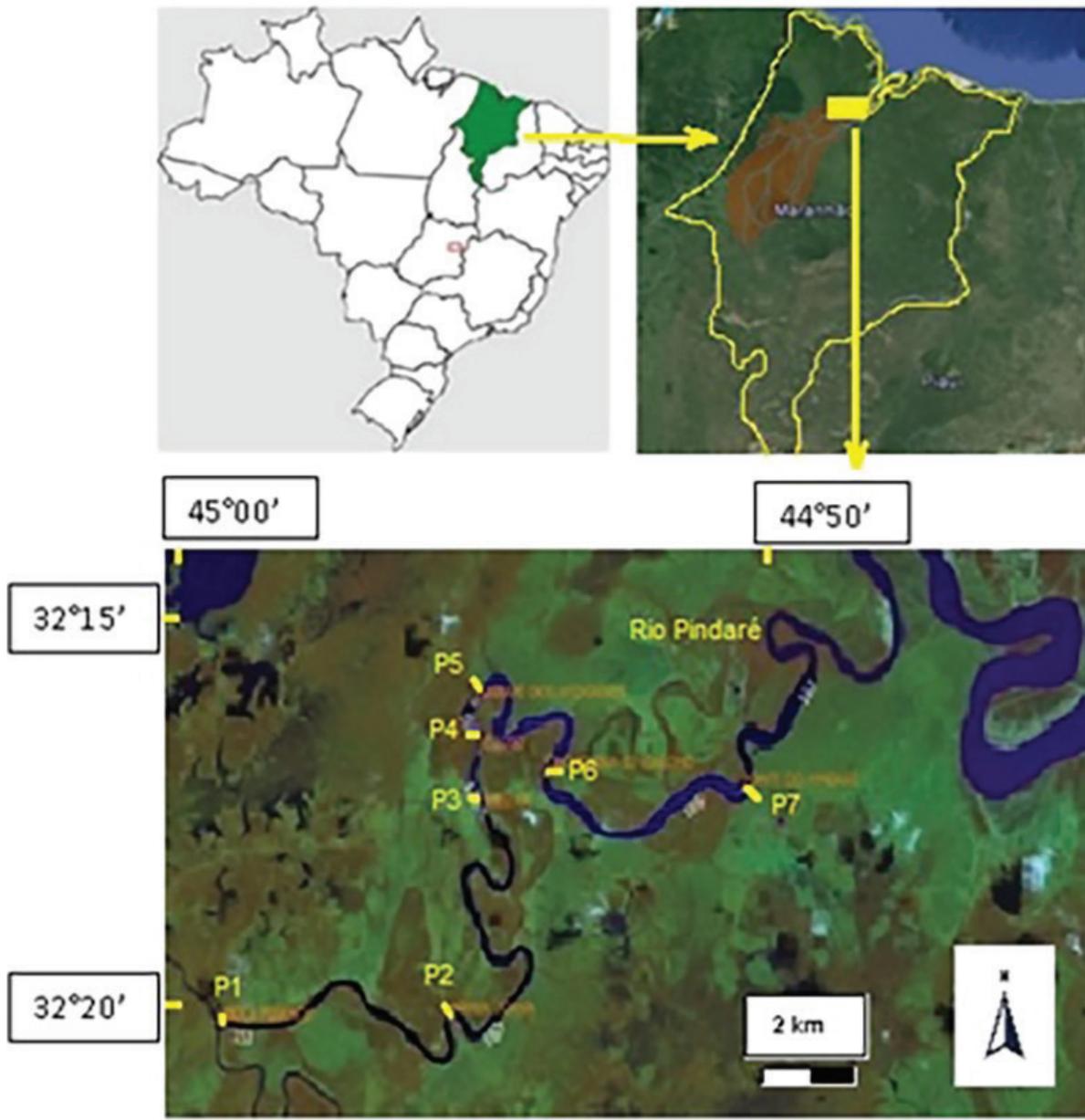


Figura 1. Localização da Bacia do Rio Pindaré e do trecho estudado no Estado do Maranhão, indicando os sete pontos de coleta de dados. Fonte: Abreu (2013)

Figure 1. Location of the Pindaré River Basin and the section studied in the State of Maranhão, indicating the seven sampling points. Source: Abreu (2013)

(cerca de 80% - INPE 2020), e a vegetação de cerrado a leste. Há também a presença de várias fazendas agropecuárias na bacia e uma terra indígena a sudeste.

O rio Pindaré apresenta descarga fluvial bem variável dependente do regime de chuvas na bacia, que é marcado por dois períodos bem distintos. Na metade inferior da bacia, existe um período seco ou de estiagem, de julho a dezembro, e um chuvoso que vai de janeiro a junho. No médio curso do rio, as vazões médias mensais chegam

a mais de $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com mínimas médias de $35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Porém, próximo à desembocadura do rio as vazões excepcionais no pico do período chuvoso podem ir além de $2.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (IMESC/ZEEMA 2019) (Figura 2).

Desenho experimental e coleta de dados

A amostragem foi realizada num trecho do rio com 24 km de extensão, em sete pontos não equidistantes localizados conforme está apresentado na Figura 1. A localização dos pontos

de coleta foi escolhida em razão de segurança devido ao fluxo rápido da maré enchente e pela proximidade a locais conhecidos. Foram realizadas seis campanhas de três dias cada, alternando entre as fases de sizígia e quadratura, e entre maré vazante e enchente de acordo com tábuas de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, para coleta de amostras de água e mensuração dos parâmetros físico-químicos entre dezembro de 2014 e fevereiro de 2016. As seis campanhas realizadas em cada ponto amostral representaram fases de lua e estações climáticas diferentes. As saídas de barco para amostragem eram iniciadas às 9:00 e finalizadas às 15:00, e o tempo de permanência em cada ponto de coleta foi cerca de 30 minutos (Figura 1, Tabela 1).

As amostras de água foram obtidas por meio de

coletores tipo Van Dorn na superfície, meio e fundo da coluna d'água, considerando a profundidade que em média variou de 5,7 m no P1 a 2,5 m no P7, ou seja, três amostras em cada ponto de coleta para efeito da análise de material em suspensão. As amostras foram armazenadas em frascos de polietileno de 500 ml de volume, previamente limpos, imediatamente acomodadas em isopor com gelo e posteriormente levadas ao Laboratório de Maricultura da Universidade Federal do Maranhão para análise de Sólidos Totais em Suspensão (TSS), Sólidos Totais Inorgânicos (TSI) e Sólidos Totais Orgânicos (TSO).

Parâmetros físico-químicos da água

Em campo, durante as coletas em cada ponto do rio, foi usado o Multiparâmetro portátil YSI® modelo 556 para mensuração dos parâmetros

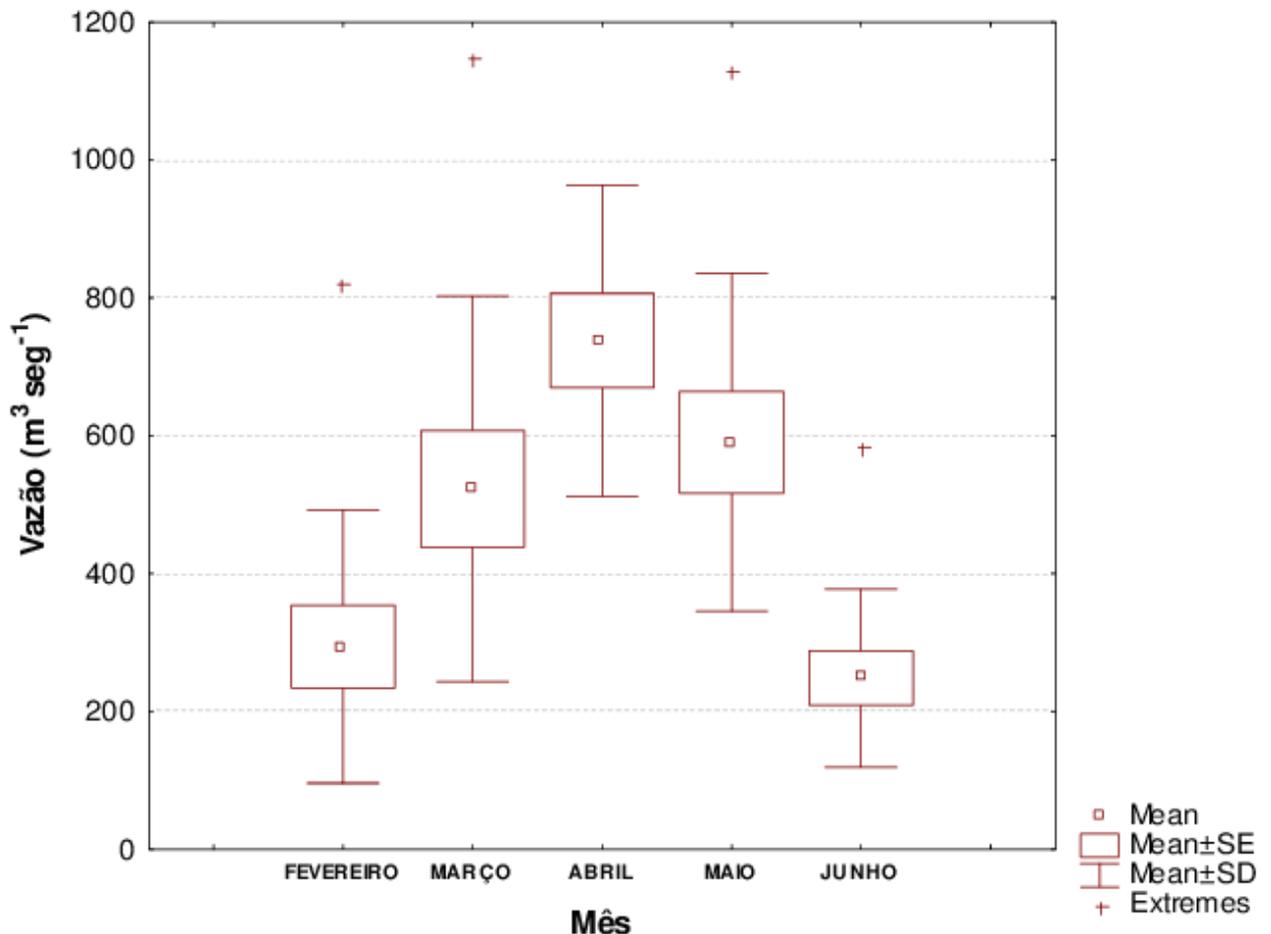


Figura 2. Box-plot para vazão mensal do rio Pindaré na estação fluviométrica de Pindaré Mirim, baixo curso, no período chuvoso para os anos de 2002 a 2012. (Mean – média, SE – erro padrão, SD – desvio padrão e Extremes - extremos). Fonte: ANA-Agência Nacional de Águas/HIDROWEB (2013).

Figure 2. Box-plot for the monthly flow of the Pindaré River at the Pindaré Mirim fluviometric station, low course, in the rainy season for the years 2002 to 2012. (Mean, SE – standard error, SD – standard deviation and Extremes). Source: ANA-National Water Agency/HIDROWEB (2013).

Tabela 1. Coordenadas geográficas dos pontos de coleta no baixo curso do rio Pindaré e distância dos pontos para a desembocadura no rio Mearim. Distância da desembocadura do rio Pindaré para a Baía de São Marcos (estuário) – 20 km.

Table 1. Geographical coordinates of the sampling points in the lower course of the Pindaré River and distance from the points to the mouth at the Mearim River. Distance from the mouth of the Pindaré River to the São Marcos Bay (estuary) – 20 km.

Pontos	Latitude	Longitude	Distância (km)
1. Boca do Maracú	03° 20' 11" S	44° 59' 50" O	49
2. Maria Joana	03° 20' 20" S	44° 56' 64" O	43
3. Meu ar	03° 18' 16" S	44° 56' 68" O	36
4. Veloso	03° 17' 45" S	44° 56' 42" O	35
5. Igarapé dos Afogados	03° 17' 07" S	44° 56' 48" O	34
6. Cachoeira do Gaúcho	03° 17' 57" S	44° 55' 58" O	30
7. Ponte do Pindaré	03° 17' 62" S	44° 53' 82" O	25

físico-químicos da água: temperatura (°C), condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$), salinidade (g kg^{-1}), pH, oxigênio dissolvido (mg L^{-1}) e percentual de saturação de oxigênio dissolvido (%). Para efeito de comparação, a salinidade também foi avaliada com uso de um refratômetro óptico e a transparência da água por meio do disco de Secchi (cm). Os resultados foram expressos pela média das medidas da superfície, meio e fundo da coluna d'água, tendo em vista a grande turbulência nesse trecho do rio.

Sólidos totais em suspensão (TSS)

A concentração de sólidos totais em suspensão presente nas amostras das três camadas da coluna d'água foi determinada por técnica gravimétrica, segundo as metodologias descritas em Strickland & Parsons (1972) e APHA (2017). No laboratório, 100 ml de cada amostra de água foram filtrados através de filtros de fibra de vidro WhatmanTM de 47mm e Fisherbrand[®] de 24mm. No entanto, para algumas amostras, especialmente do fundo da coluna d'água, foram filtrados apenas 25 ou 50 ml tendo em vista a grande quantidade de sólidos em suspensão presente. As filtrações foram feitas em duplicatas, com filtros previamente secos por 1 hora a 100° C em estufa. Logo após, os filtros foram pesados em balança analítica de precisão e identificados em pequenos envelopes, de acordo com o ponto e a profundidade em que foi realizada a coleta da amostra. Após a filtração, os filtros foram colocados novamente na estufa por 1 hora a 100° C, resfriados em dessecador e pesados. A diferença entre o peso final e o inicial forneceu

o peso dos sólidos totais em suspensão, expresso em mg L^{-1} .

Matéria orgânica em suspensão

A matéria orgânica em suspensão presente nas amostras foi determinada por técnica gravimétrica, após a calcinação dos filtros contendo material em suspensão seco em cadinhos, em forno mufla por 1 hora a 500 °C, segundo a metodologia descrita em APHA (2017). Por essa metodologia, apenas a matéria orgânica volátil presente na amostra é calcinada, sendo assim uma aproximação à concentração de TSO. Após o seu resfriamento até temperatura ambiente, os filtros foram pesados em balança analítica de precisão. A diferença do peso do filtro contendo TSS e do peso dele depois da combustão indica a perda da matéria orgânica volatilizada na forma de CO_2 , que foi expressa em percentual da matéria orgânica em suspensão.

Análises de dados

O tratamento dos resultados de parâmetros físico-químicos foi realizado com o Programa STATISTICA 7. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi feita com o Programa PAST 3.14, com a finalidade de identificar parâmetros físicos próximos na sua variação, assim como a influência da situação de maré e da estação climática sobre os parâmetros. O teste de Kruskal-Wallis foi adotado para identificar se existe diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias dos parâmetros medidos nos sete pontos de coleta

considerando as estações seca e chuvosa, bem como a situação de maré.

RESULTADOS

Distribuição temporal e espacial dos parâmetros físico-químicos

A variação de parâmetros físico-químicos na água ao longo do trecho estudado do rio Pindaré (pontos 1 a 7) entre dezembro de 2014 e fevereiro de 2016 é apresentada na Figura 3.

A profundidade do rio variou ao longo dos pontos de coleta, sendo maior no P1, média de 5,7 m, que é a área de confluência entre o rio Pindaré e o rio Maracú, e foi tornando-se menor quanto mais próxima à foz, média de 2,5 m no P7.

A transparência da água apresentou variação longitudinal clara, de forma que no Ponto 1 (P1) se mostrou significativamente diferente ao restante dos pontos de coleta ($p < 0,001$). Os valores da transparência foram maiores, com média de 25 cm porque nessa área o fluxo fluvial tem pouca influência da maré, e menores no P7, média de 9 cm.

Os valores de temperatura da água apresentaram um padrão homogêneo ao longo do trecho do rio, assim como nas três camadas (superfície, meio e fundo) da coluna, não havendo diferença estatística ($p > 0,05$). A temperatura mínima observada foi de 28 °C e a máxima de 30 °C entre dezembro de 2014 e fevereiro de 2016. A variação observada deve estar relacionada aos diferentes momentos do dia em que foram realizadas as medidas, entre os horários de 9:00 h e 15:00 h.

Os valores de concentração de oxigênio dissolvido (OD) indicaram que as águas do baixo curso do rio Pindaré apresentaram boa oxigenação nos sete pontos de medidas tanto em situação de maré enchente como de vazante, com média acima de 5,0 mg L⁻¹. O valor mínimo foi de 3,75 mg L⁻¹ no P4 e o máximo de 7,88 mg L⁻¹ no P5 para todo o período de estudo.

Com relação à salinidade, essa variável apresentou sempre valores mais elevados nos pontos 6 e 7 (máximo de 5,37), e mais baixos nos pontos 1, 2 e 3, próximos à desembocadura do rio Maracú. O rio Pindaré, no seu baixo curso, apresenta a influência da intrusão salina até o

P4, cerca de 35 km acima da foz, especialmente durante as marés de sizígia no período seco.

Os resultados de condutividade elétrica da água obtidos no rio Pindaré são consequência da presença de salinidade e demonstram que no período seco houve diferença muito significativa ($p < 0,01$) de carga de íons em relação ao período de chuvoso, valor mínimo de 123 $\mu\text{S cm}^{-1}$ em abril de 2015 e valor máximo de 12.194 $\mu\text{S cm}^{-1}$ em maré vazante de sizígia no período seco, dezembro de 2014. A condutividade elétrica da água do rio Pindaré mostrou um aumento no sentido da desembocadura do rio, especialmente no período seco. No P4 iniciou a elevação do valor, que era em torno de 382 $\mu\text{S cm}^{-1}$ até 469,7 $\mu\text{S cm}^{-1}$ no P3, 1.512,4 $\mu\text{S cm}^{-1}$ no P5, 4.075,8 $\mu\text{S cm}^{-1}$ no P6 até 5.179,2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ no P7.

Os valores de pH da água do rio Pindaré indicaram que o trecho estudado tem diferentes características, pois no período da pesquisa foram encontrados valores entre 6,5 e 9,0. Os pontos 1, 2 e 3 mostraram o pH levemente ácido e os pontos de 4 a 7 pH levemente básico, indicando uma diferença significativa ($p < 0,05$). Estes resultados mostraram normalidade, quando comparados com os valores recomendados pela Resolução CONAMA N.º 357/2005, que estabelece valores de pH entre 6,5 e 8,5 para águas destinadas ao consumo humano, e entre 6,0 e 9,5 para todas as classes de água doce.

Sólidos totais (TSS) - sólidos inorgânicos (TSI) e sólidos orgânicos (TSO) em suspensão

Foram verificadas três situações para a variação dos sólidos em suspensão no trecho em estudo do rio Pindaré. Situação 1 (campanhas 1 e 5), correspondente a maré de sizígia no período seco nos meses de dezembro/2014 e setembro/2015, respectivamente. Situação 2 (campanhas 2 e 3), correspondente a maré de sizígia no período chuvoso nos meses de fevereiro/2015 e abril/2015. Situação 3 (campanhas 4 e 6), correspondente a maré de quadratura no início do período seco e posteriormente no início do período chuvoso, respectivamente nos meses de julho/2015 e fevereiro/2016. Na campanha 1, as concentrações obtidas para TSS foram entre 10,2 mg L⁻¹ no P3 e 400,1 mg L⁻¹ no P6. Estes valores são extremos, considerando que foram medidos no mesmo período seco sob efeito da

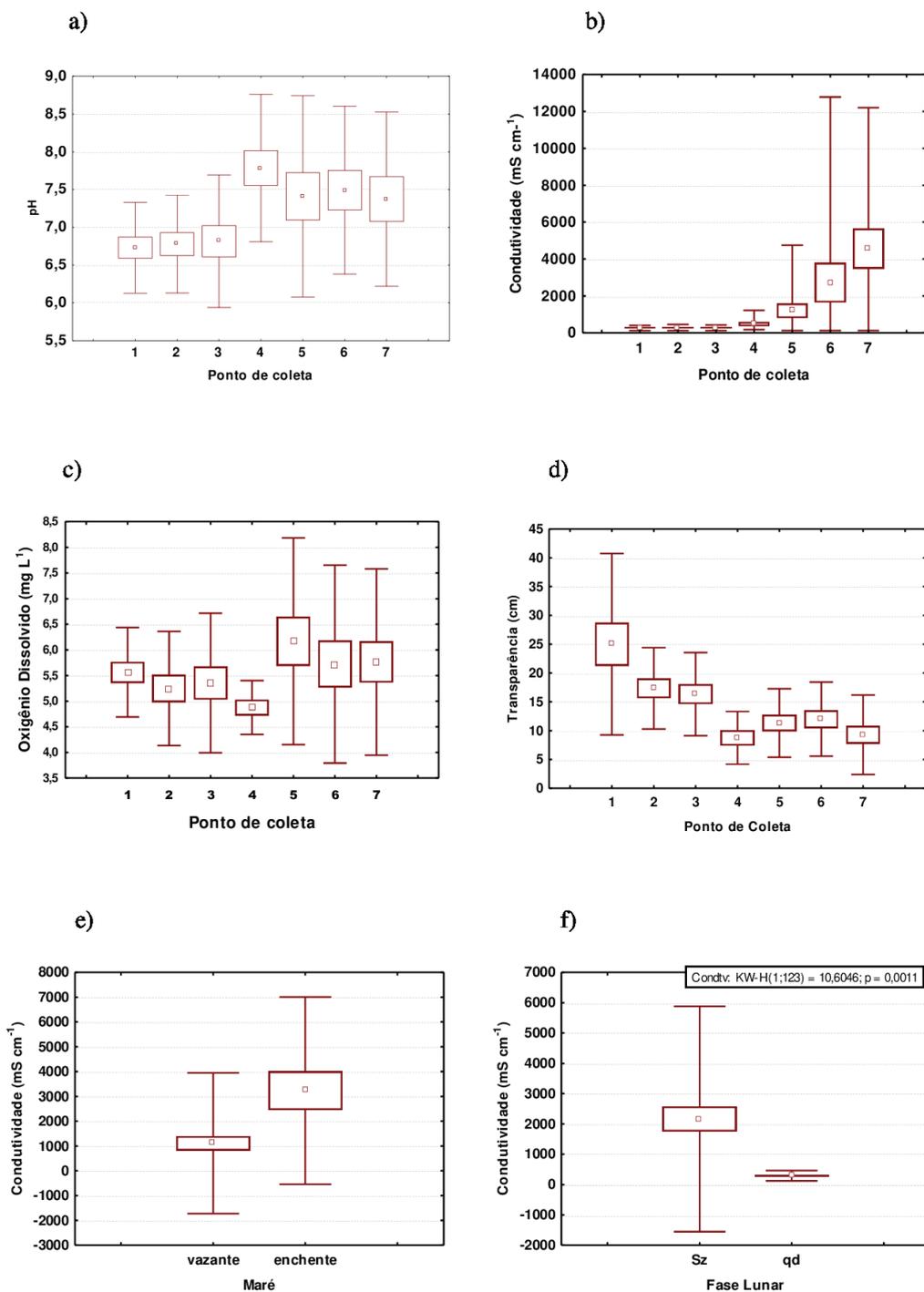


Figura 3. Box-plot para a variação de parâmetros físico-químicos, média (ponto central), erro padrão (limites verticais da caixa) e desvio padrão (limites verticais da barra), na água ao longo do trecho estudado do rio Pindaré (pontos 1 a 7), entre dezembro de 2014 e fevereiro de 2016. a) pH; b) condutividade elétrica; c) oxigênio dissolvido; d) transparência; e) condutividade elétrica e situação da maré; e f) condutividade elétrica e fase lunar (Sz – sizígia e qd – quadratura).

Figure 3. Box-plot for the variation of physical-chemical parameters, mean (central point), standard error (vertical limits of the box) and standard deviation (vertical limits of the bar), in the water along the studied section of the Pindaré River (points 1 to 7), between December 2014 and February 2016. a) pH; b) electrical conductivity; c) dissolved oxygen; d) transparency; e) electrical conductivity and tidal status; and f) electrical conductivity and lunar phase (Sz – syzygy and qd – quadrature).

maré de sizígia, onde a descarga fluvial é menos expressiva que a influência marinha no baixo curso, a qual provoca uma maior turbulência ressuspensando os sedimentos (Figura 4a). As concentrações obtidas durante a sizígia no meio do período chuvoso estão bem abaixo daqueles mencionados nas situações anteriores, devido ao fato de que foram medidos no pico do período de cheia (abril de 2015). Verifica-se no P5 uma carga comparativamente maior de sólidos totais em suspensão, devido provavelmente a que existem muitos processos erosivos ocasionados pelo desmatamento em torno deste ponto. A lixiviação provocada pela chuva arrasta o sedimento para o rio elevando assim a concentração de sólidos totais em suspensão. Na campanha 4, realizada em julho de 2015, durante a maré de quadratura no período seco, as concentrações de sólidos totais em suspensão foram baixas e uniformes. Somente o P7, ponto mais próximo a foz, apresentou maior valor devido à influência da zona de turbulência provocada pela maré de quadratura. Os valores obtidos estiveram entre 22,98 mg L⁻¹ no P1 e 43,33 mg L⁻¹ no P7 (Figura 4b). Em todas as campanhas os resultados mostraram sempre maior concentração dos sólidos inorgânicos (> 90 %) para os sólidos totais em suspensão.

Intrusão salina

Durante as marés de sizígia no período seco (campanhas 1 e 5), a intrusão salina ocorreu em

ambas as campanhas numa extensão de 40 km desde a desembocadura do rio até o P4 (povoado de Veloso). Foi verificada uma queda gradual da salinidade a partir do P7 de 5,11 até 0,20 no P4. Seguindo para montante, a salinidade estabilizou em torno de 0,17, valor mais real da água doce do rio Pindaré até a sua confluência com o rio Maracá no P1 (Tabela 2).

Durante a maré de sizígia do período chuvoso, a intrusão salina na campanha 2 avançou cerca de 38,5 km desde a desembocadura até o P5. Foi obtido o valor de 0,21 no P6 e houve um aumento da salinidade para 0,54 no P5. Esse aumento inesperado no P5 se deve à mensuração da salinidade no horário de máxima altura da maré ou então a erro de coleta ou de análise. Após este local, a salinidade mostrou decréscimo para montante de 0,13. Na campanha 3, a água estava doce ao longo do trecho do rio. Durante a maré de quadratura em período seco, na campanha 4, não ocorreu intrusão salina havendo homogeneidade ao longo do trecho do rio com o valor de 0,07. Na campanha 6, houve intrusão até o P6 (0,17) e a evidente mistura das águas, e o valor foi contínuo até o P1 (0,16).

Análise de Componentes Principais (PCA)

A Figura 5 apresenta a análise dos componentes principais dos parâmetros físico-químicos, associados aos locais de amostragem (pontos P1 a P7) em função da sazonalidade climática e da

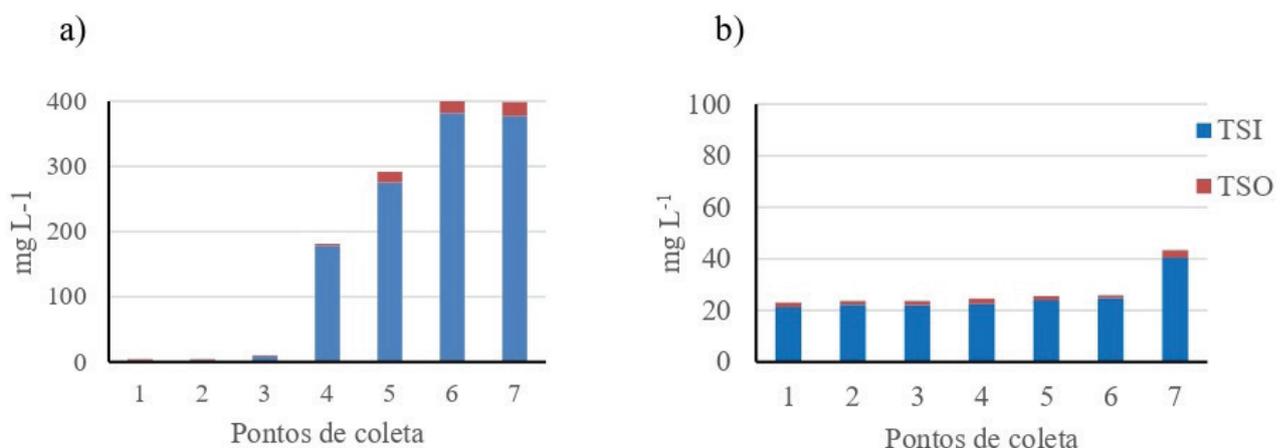


Figura 4. Sólidos totais em suspensão: sólidos inorgânicos totais (TSI) e sólidos orgânicos totais (TSO) da água do rio Pindaré ao longo dos pontos amostrais. a) Campanha 1, no período seco (dezembro de 2014) em maré de sizígia e b) Campanha 4, no período seco (julho de 2015) em maré de quadratura.

Figure 4. Total suspended solids: total inorganic solids (TSI) and total organic solids (TSO) of the Pindaré river water along the sampling points. a) Campaign 1, in the dry season (December 2014) at spring tide and b) Campaign 4, in the dry season (July 2015) at neap tide.

Tabela 2. Salinidade da água do rio Pindaré nos pontos de coleta (média e desvio padrão-dp) durante o período de estudo, de dezembro de 2014 a fevereiro de 2016. Valores em negrito indicam aumento abrupto da salinidade e o avanço da maré em direção ao ponto 1, mais distante. Obs.: sd – sem dados; sz – sizígia; qd – quadratura.

Table 2. Salinity of the Pindaré River water at the sampling points (mean and standard deviation-SD) during the study period, from December 2014 to February 2016. Values in bold indicate an abrupt increase in salinity and tidal advance towards point 1, further away. Obs.: sd – no data; sz – syzygy; qd – quadrature.

Mês		Ponto de coleta							Lua	Período
		1	2	3	4	5	6	7		
Campanha 1 (dez.2014)	média	0,17	0,19	0,17	sd	0,26	1,22	5,11	sz	seco
	dp	0,01	0,02	0,01	sd	0,02	0,20	0,23		
Campanha 2 (fev.2015)	média	0,12	0,11	0,11	0,13	0,54	0,21	3,48	sz	chuvoso
	dp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,16		
Campanha 3 (abr.2015)	média	0,06	0,05	0,05	sd	0,06	0,05	0,06	sz	chuvoso
	dp	0,00	0,00	0,01	sd	0,00	0,01	0,01		
Campanha 4 (jul.2015)	média	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	qd	seco
	dp	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00		
Campanha 5 (set.2015)	média	0,17	0,18	0,18	0,48	2,04	5,37	sd	sz	seco
	dp	0,01	0,00	0,00	0,05	0,03	0,20	sd		
Campanha 6 (fev.2016)	média	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,17	0,35	qd	chuvoso
	dp	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03		

fase lunar. O componente 1 enquadrado 35,8% da variância, enquanto o componente 2 foi responsável por 14,8% da variância, totalizando 50,6% da totalidade dos dados.

Os parâmetros pH, oxigênio dissolvido, % de oxigênio e condutividade elétrica apresentaram-se associados ao período seco na fase de sizígia; os parâmetros sólidos orgânicos em suspensão, sólidos inorgânicos em suspensão, e sólidos totais em suspensão apresentaram-se associados ao período chuvoso na fase de quadratura notadamente em P5, P6 e P7, próximo à desembocadura do rio Pindaré; a temperatura se mostrou mais associada à fase de quadratura no período chuvoso, principalmente em P1, P2 e P3; a relação pH/mv apresentou maiores valores na fase de sizígia durante o período chuvoso; o potencial de oxi-redução e transparência apresentaram maiores valores na fase de quadratura porém sem clara associação a nenhum período sazonal.

A Figura 6 apresenta a análise dos componentes principais dos parâmetros físico-químicos, associados aos locais de amostragem (pontos P1 a P7) em função da sazonalidade climática e situação de maré (Ench - enchente e Vaz - vazante). O componente 1 enquadrado 35,8% da variância, enquanto o componente 2 foi responsável

por 14,8% da variância, totalizando 50,6% da totalidade dos dados.

Os parâmetros pH, oxigênio dissolvido, % de oxigênio e condutividade elétrica apresentaram-se com a tendência para associação às condições de maré vazante no período seco com predominância nos pontos P5, P6 e P7, próximo à desembocadura do rio Pindaré; os sólidos orgânicos em suspensão, sólidos inorgânicos em suspensão, e sólidos totais em suspensão estão mais associados à maré enchente e período chuvoso notadamente em P5, P6 e P7, próximo à desembocadura; a temperatura, relação pH/mv, potencial de oxi-redução e transparência estão associadas à condição de vazante porém sem clara associação ao período sazonal.

DISCUSSÃO

O fenômeno natural de intrusão salina no baixo curso do rio Pindaré tem sido observado com maior frequência e intensidade desde o final da década de 90. Na presente pesquisa, os dados de salinidade e condutividade elétrica da água mostraram a influência salina no baixo curso do rio Pindaré há pelo menos 60 km (P4) acima da região estuarina da baía de São Marcos. Todavia

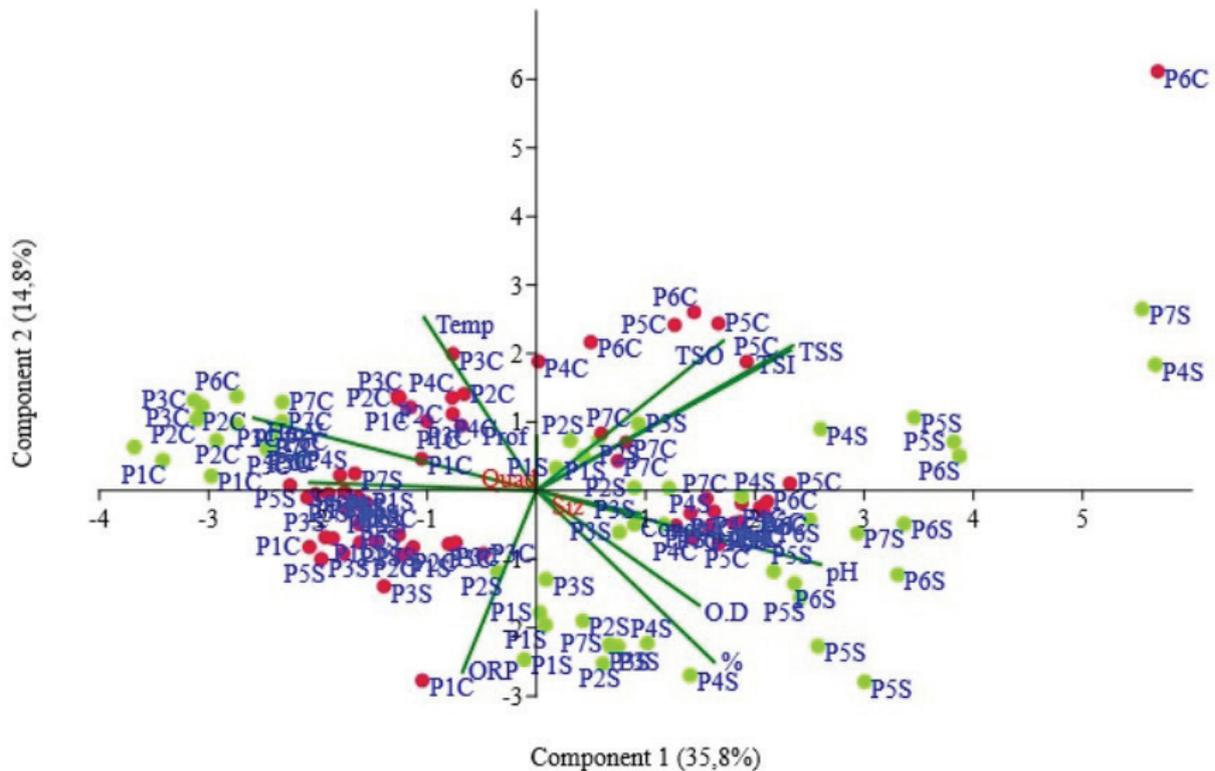


Figura 5. Análise de componente principal (PCA) associando os locais de amostragem (pontos P1 a P7) em função da sazonalidade (períodos S - seco e C - chuvoso) e da fase lunar (Quad - quadratura e Siz - sizígia), no trecho estudado do rio Pindaré, entre dezembro de 2014 e fevereiro de 2016. Obs.: As bolas verdes representam o grupo sizígia e as bolas vermelhas representam o grupo quadratura. (Parâmetros da água: Prof – profundidade, Temp – temperatura, pH – potencial hidrogeniônico, Cond – condutividade elétrica, OD – oxigênio dissolvido, %OD – percentual de saturação de oxigênio, ORP – potencial de oxidação-redução, Secchi – transparência, pH/mv – relação potencial hidrogeniônico com ORP, TSS – sólidos totais suspensos, TSO – sólidos orgânicos suspensos, TSI – sólidos inorgânicos suspensos).

Figure 5. Principal component analysis (PCA) associating the sampling points (points P1 to P7) as a function of seasonality (S - dry and C - rainy periods) and lunar phase (Quad - quadrature and Siz - syzygy), in the studied section of the Pindaré River, between December 2014 and February 2016. Note: The green balls represent the syzygy group and the red balls represent the quadrature group. (Water parameters: Prof – depth, Temp – temperature, pH – hydrogenionic potential, Cond – electrical conductivity, OD – dissolved oxygen, %OD – oxygen saturation percentage, ORP – oxidation-reduction potential, Secchi – transparency, pH /mv – hydrogenionic potential ratio with ORP, TSS – total suspended solids, TSO – suspended organic solids, TSI – suspended inorganic solids).

os resultados de condutividade elétrica, de pH e de sólidos em suspensão na água também indicaram uma mistura das águas do rio e do estuário, com menor intensidade, até próximo da confluência do rio Pindaré com o rio Maracú, P1 do trecho estudado, durante as marés de sizígia no auge do período seco. As margens e matas ciliares de ambos os rios nesse trecho estão bem preservadas, garantindo assim a sustentação do solo, evitando a lixiviação e aumento da turbidez da água. Entretanto, Costa Neto *et al.* (2001) obtiveram um alto valor para condutividade elétrica da água de $2.800 \mu\text{S cm}^{-1}$ ou salinidade próxima de 1 g kg^{-1} dentro do lago de Viana, sub-

bacia do rio Maracú cerca de 12 km a montante de sua desembocadura, em dezembro de 1998. Ou seja, em anos de descarga excepcionalmente baixa do rio Pindaré no período seco ($< 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e situação de maré de sizígia, a intrusão salina atinge cerca de 95 km a montante da região estuarina. R. Barbieri (dados não publicados), em uma excursão pela planície alagável do lago de Viana em novembro de 2018, avaliou a salinidade em um córrego e obteve 4 g kg^{-1} e em uma lagoa no campo 11 g kg^{-1} . Segundo o SISBAHIA – Projeto Baías do Brasil (2018) da COPPE/UFRJ, as macromarés de sizígia na confluência do rio Pindaré com o rio Mearim apresentam um efeito

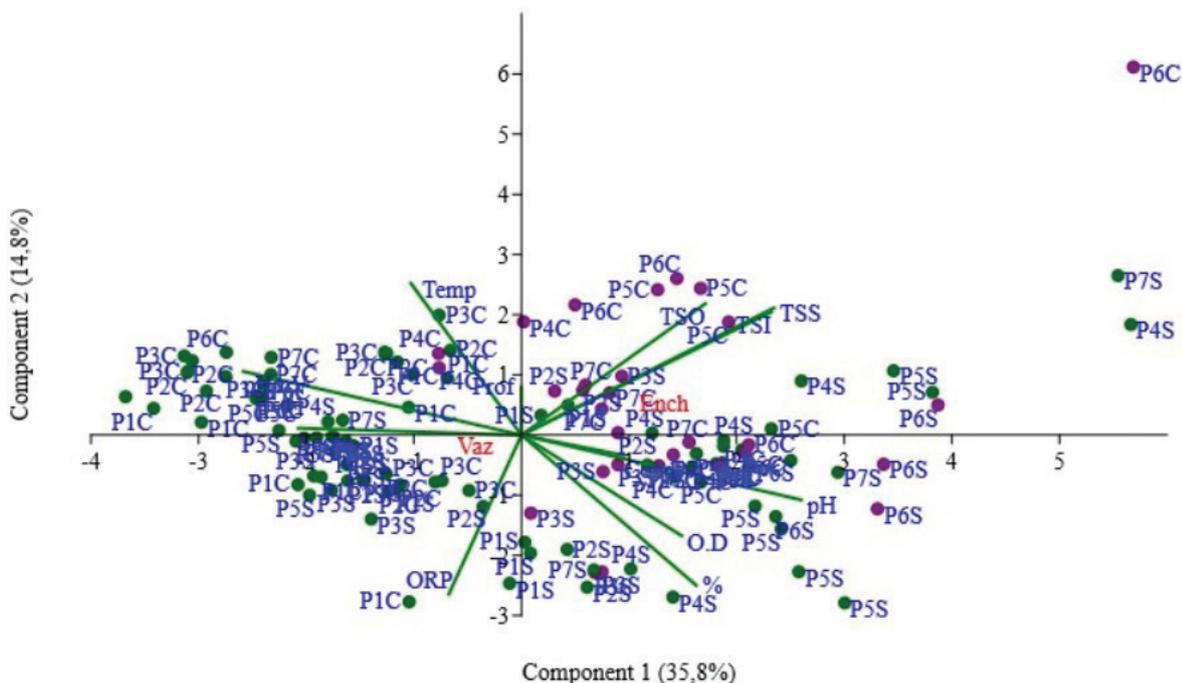


Figura 6. Análise de componente principal (PCA) associando os locais de amostragem (pontos P1 a P7) em função da sazonalidade (períodos S - seco e C - chuvoso) e situação de maré (enchente e vazante), no trecho estudado do rio Pindaré, entre dezembro de 2014 e fevereiro de 2016. As bolas verdes representam o grupo vazante e as bolas lilases representam o grupo enchente. (Parâmetros da água: Prof – profundidade, Temp – temperatura, pH – potencial hidrogeniônico, Cond – condutividade elétrica, OD – oxigênio dissolvido, %OD – percentual de saturação de oxigênio, ORP – potencial de oxi-redução, Secchi – transparência, pH/mv – relação potencial hidrogeniônico com ORP, TSS – sólidos totais suspensos, TSO – sólidos orgânicos suspensos, TSI – sólidos inorgânicos suspensos).

Figure 6. Principal component analysis (PCA) associating the sampling points (points P1 to P7) as a function of seasonality (S - dry and C - rainy periods) and tidal situation (flood and ebb), in the studied section of the Pindaré River, between December 2014 and February 2016. The green balls represent the ebb group and the lilac balls represent the flood group. (Water parameters: Prof – depth, Temp – temperature, pH – hydrogenionic potential, Cond – electrical conductivity, OD – dissolved oxygen, %OD – oxygen saturation percentage, ORP – oxidation-reduction potential, Secchi – transparency, pH/mv – hydrogenionic potential ratio with ORP, TSS – total suspended solids, TSO – suspended organic solids, TSI – suspended inorganic solids).

crescente atingindo mais de 7 m e velocidade de fluxo de $2,5 \text{ m s}^{-1}$, como resultado da somatória do nível de maré com o nível da água do rio Mearim, enquanto no porto de Ponta da Madeira em São Luis a maré de sizígia atinge pouco mais de 6 m. Nesta situação, o efeito mecânico e salino da maré se torna evidente em vários locais da Baixada Maranhense, microrregião de campos alagáveis do baixo curso dos principais rios que desaguam na baía de São Marcos, região estuarina do rio Mearim.

Por outro lado, Rosário *et al.* (2009) em estudo no canal norte da foz do rio Amazonas verificaram a estratificação salina e formação de cunha em situação de maré de sizígia com 3,7 m e velocidade de fluxo de 2 m s^{-1} , porém a intrusão atinge cerca de 120 km para fora da foz do rio Amazonas durante a

descarga máxima do rio ($278.900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) em junho de 2006. Todavia a intrusão chega a 80 km da foz quando a descarga do rio fica abaixo de $90.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Todavia, Molinas *et al.* (2014) estudando a hidrodinâmica e estratificação salina na foz do rio Amazonas concluíram que, apesar da forte dinâmica das águas na plataforma frontal do rio e do regime de ventos, o efeito da maré astronômica também domina a formação da estratificação halina na foz do rio.

Considerando os parâmetros físico-químicos, o pH da água, especialmente na maré enchente de sizígia, foi tamponado pela entrada de água salgada no sistema e os teores de oxigênio dissolvido aumentaram nos pontos 5, 6 e 7, indicando que a turbulência provocada pela enchente fez os teores elevarem na água do rio como consequência

dinâmica da maré. Assim, os valores de pH do baixo curso do rio Pindaré sofrem variações induzidas principalmente pelas marés e, secundariamente, o decréscimo dos valores para a acidez sob influência da alta produção orgânica da Baixada Maranhense, a montante.

O teor de sais na água do rio está relacionado com o aporte fluvial e com a precipitação pluviométrica considerando que nos meses chuvosos da pesquisa (janeiro a junho) foram obtidas as menores salinidades, e valores mais elevados no período seco (julho a dezembro), nas marés de sizígia com a contribuição da água marinha da baía de São Marcos. Desta forma, foi possível constatar que a principal força que induz a entrada da água salgada no baixo curso do rio Pindaré é a maré, principalmente as marés de Sizígia. Deve-se levar em consideração que a profundidade do rio foi diferente nos pontos de coleta e variou de acordo com a influência da enchente e vazante da maré, que ocorrem ao longo do dia, além da influência sofrida anualmente devido à variação da pluviosidade entre o período seco e o chuvoso, fato que altera marcadamente a vazão e o nível do rio. Perto da foz o assoreamento do rio é marcante devido aos processos de erosão das margens rio acima.

A turbulência provocada pela maré enchente, especialmente de sizígia, para a elevação das concentrações de sólidos em suspensão nos pontos P4 a P7 foi evidente tanto em dezembro de 2014 como em setembro de 2015. Esta intensa dinâmica no baixo curso do rio Pindaré, associada às menores profundidades verificadas, provavelmente tem alterado com rapidez os processos de erosão das margens e mudança dos meandros do rio nesse trecho. Nas marés de quadratura e com o aumento da descarga fluvial esse processo diminui.

Os dados do presente estudo levam a crer que a entrada de água salgada pelo rio Pindaré é dependente de vários fatores, como a fase lunar, o regime de maré e, mais recentemente, a diminuição da descarga fluvial ou da vazão do rio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) pelo suporte

financeiro à pesquisa selecionada no edital Universal 2014. Agradecem também à Dra. Larissa Nascimento Barreto pela correção inicial do manuscrito, bem como ao apoio dos estudantes de Oceanografia da UFMA Josenilde Diniz Santos, Ana Biondo, Francisco das Chagas e Alaides Boaes da Silva, nos trabalhos de campo e laboratório relativos ao projeto “Dinâmica hídrica relacionada à distribuição dos peixes estuarinos no baixo curso do rio Pindaré e o impacto das atividades antrópicas na biodiversidade aquática e na pesca”.

REFERÊNCIAS

- Abreu, B.V. 2013. Estudos hidrológicos da bacia do rio Pindaré-Mirim. Monografia de graduação. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. p.93.
- Agência Nacional de Águas – ANA (Brasil). 2009. Inventário das estações fluviométricas / Agência Nacional de Águas. p. 196. ed. ANA/Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, Brasília, DF. From: https://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/CatalogoPublicacoes_2009.asp
- Alcérreca-Huerta, J. C., Callejas-Jiménez, M. E., Carrillo, L., & Castillo, M. M. 2018. Dam implications on salt-water intrusion and land use within a tropical estuarine environment of the Gulf of Mexico. *The Science of the Total Environment*, 652, 1102-1112. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.288
- American Public Health Association - APHA. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. R. B. Baird, A. D. Eaton, E. W. Rice (Ed.), Washington: American Public Health Association: p. 1504.
- Carvalho, F.L. & Couto, E.C.G. 2011. Environmental variables influencing the Callinectes (Crustacea: Brachyura: Portunidae) species distribution in a tropical estuary - Cachoeira River (Bahia, Brazil). *Journal of the Marine Biological Association*, 91(4), 793-800.
- Cavalcante, G. H., Feary, D. A. & Kjerfve, B. 2013. Effects of tidal range variability and local morphology on hydrodynamic behavior and salinity structure in the Caeté River Estuary, North Brazil. *International Journal of Oceanography*, 10 p. DOI: 10.1155/2013/315328
- Costa, K. G., Bezerra, T. R., Monteiro, M. C.,

- Vallinoto, M., Berredo, J. F., Pereira, L. C. C. & Costa, R. M. 2013. Tidal-induced changes in the zooplankton community of na Amazon estuary. *Journal of Coastal Research*, 29(4), 756-766.
- Costa Neto, J. P., Barbieri, R., Ibañez, M. S. R., Cavalcante, P. R. S. & Piorski, N. M. 2001. Limnologia de três ecossistemas aquáticos característicos da Baixada Maranhense. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, 14/15, 19-38.
- Filho, J. & Aviz, D. 2013. Macrobenthic communities of an Amazonian estuary (Guajará Bay, Brazil): temporal and spatial changes. *Journal of Coastal Research*, 1(65), 123-128.
- Ibañez, M. S. R., Cavalcante, P. R. S., Costa Neto, J. P., Barbieri, R., Pontes, J. P., Santana, S. C. C., Serra, C. L. M., Nakamoto, N. & Mitamura, O. 2000. Limnological characteristics of three aquatic systems of the pre-amazonian floodplain, Baixada Maranhense (Maranhão, Brazil). *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 3(4), 521-531. DOI: 10.1080/14634980008650689.
- Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos Cartográficos - Imesc 2019. Sumário Executivo do Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Maranhão – ZEE. Etapa Bioma Amazônico. Catunda, P. H. A, Dias, L. J. B. S. (Coord.). São Luís: Imesc, p. 214.
- Lopes, I. A. 2006. Transporte de material particulado em suspensão pelos rios Grajaú, Pindaré e Mearim para o sistema estuarino da baía de São Marcos - MA. Dissertação de mestrado. Mestrado em Sustentabilidade de Ecossistemas da Universidade Federal do Maranhão. p. 93.
- Magolan, J. L. & Halls, J. N. 2020. A multi-decadal investigation of tidal creek wetland changes, water level rise, and ghost forests. *Remote Sensing*, 12, 1141-1163. DOI:10.3390/rs12071141
- Magris, R. A., Pereira, J. B. & Loureiro Fernandes, L. F. 2011. Interannual variability in tropical estuarine copepod assemblages of Northeastern Brazil. *Journal of Crustacean Biology*, 31(2), 260-269. DOI: org/10.1651/10-3308.1
- Marques, L. 2017. Degelo e elevação do nível do mar. *Jornal da Unicamp*. <https://www.unicamp.br/unicamp/index.php/ju/artigos/luiz-marques/o-degelo-e-elevacao-do-nivel-do-mar>
- Mata Pavione, P., Costa, K., Perônico, C., McMaster, M., Parrott, J., Hewitt, L., Munkittrick, K., Barreto, F., Basilo, T., Gomes, M., Reis Filho, R. & Furley, T. 2019. Development of environmental effects monitoring protocol in Brazil: a fish guide study of three river estuaries. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191(11), 1-20. DOI: 10.1007/s10661-019-7860-y
- Molinas, E., Vinzon, S., Xavier Vilela, C. & Gallo, M. 2014. Structure and position of the bottom salinity front in the Amazon Estuary. *Ocean Dynamics*, 64(11), 1583-1599. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0763-0>
- Nittrouer, C. A., Demaster, D. J., Kuehl, S. A., Figueiredo, A. G., Sternberg, R. W., Faria, L. E. C., Silveira, O. M., Allison, M. A., Kineke, G. C., Ogston, A. S., Souza Filho, P. W. M., Asp, N. E., Nowacki, D. J. & Fricke, A. T. 2021. Amazon sediment transport and accumulation along the continuum of mixed fluvial and marine processes. *Annual Review of Marine Science*, 2021, 13, 501-536. DOI: org/10.1146/annurev-marine-010816-060457
- Nogueira, F. 2020. Impacts of sea level rise on seawater intrusion in Cubatão River, Brazil. *Environmental Modeling & Assessment*, 25(6), 831-841.
- Pinheiro, C. U. B., & Arouche, G.C. 2013. Os recursos naturais, a sócio-economia e a cultura do município de Penalva, Baixada Maranhense. São Luís: Aquarela: p. 110.
- Pompêo, M. L. M., Moschini-Carlos, V., & Silva-Filho, C. G. 2002. Transporte de nitrogênio, fósforo e seston em três rios pré-amazônicos (estado do Maranhão, Brasil). *Bioikos*, 16(1/2), 29-39.
- Rosário, R. P., Bezerra, M. O., & Vinzón, S. B. 2009. Dynamics of the saline front in the northern channel of the Amazon River – Influence of fluvial flow and tidal range (Brazil). *Journal of Coastal Research*, Special Issue (56), 1414-1418.
- Silva, G. S., Santos, E. A., Corrêa, L. B., Marques, A. L. B., Marques, E. P., Sousa, E. R., & Silva, G. S. 2014. Avaliação integrada da qualidade de águas superficiais: grau de trofia e proteção da vida aquática nos rios Anil e Bacanga, São Luís (MA). *Engenharia Sanitaria e*

- Ambiental, 19(3), 245-250. DOI: 10.1590/S1413-41522014019000000438
- Silva, M. R., Silva, L. V., Barreto, L. N., C.; Rodrigues, E. H. C., Miranda, R. C. M., Bezerra, D. S. & Pereira, D. C. A. 2016. Qualidade da água da bacia do rio Pindaré nos trechos correspondentes aos municípios de Pindaré-Mirim, Tufilândia e Alto Alegre no Estado do Maranhão. *Águas Subterrâneas*, 31(4), 347-354. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28929>
- Silva, F. P., Martins, J. R. S., & Nogueira, F. F. 2020. Impacts of sea level rise on seawater intrusion in Cubatão River, Brazil. *Environmental Modeling & Assessment*, 25(6), 831-841. DOI: 10.1007/s10666-020-09720-y
- SisBaHia. 2018. Projeto baías do Brasil - Baía de São Marcos, Maranhão. Relatório Descritivo do Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica. Resgatado em 15 de fevereiro de 2021, de http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/assets/relatorios/rel_baia_saomarcos.html
- Shivaprasad, A., Vinita, J., Revichandran, C., Reny, P., Deepak, M., Muraleedharan, K. & Kumar, K. 2013. Seasonal stratification and property distributions in a tropical estuary (Cochin Estuary, west coast, India). *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 187-199. DOI:10.5194/hessd-9-8979-2012
- Sridevi, B. S., Sarma, V. V. S. S., Murty, T. V. R., Sadharam, Y., Reddy, N. P. C., Vijayakumar, K., Raju, N. S. N., Jawahar Kumar, C. H., Raju, Y. S. N., Luis, R., Kumar, M. D., & Prasad, K. V. S. R. 2015. Variability in stratification and flushing times of the Gautami–Godavari estuary, India. *Journal of Earth and Systematic Science*, 124(5), 993-1003.
- Strahler, A. N. 1960. Climate and their classification. *Physical geography*, 2nd ed., New York: John Wiley, p.181-193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/00309133309360627>
- Strickland, J. D. H., & Parsons, T. R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd ed. Ottawa: Bulletin Fisheries Research Board of Canada. p. 310.
- Uema - Universidade Estadual do Maranhão. 2009. Estimativa das demandas e da disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas do Estado do Maranhão. Relatório Parcial nº 03. Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão. São Luis, MA. p.26.
- Uema - Universidade Estadual do Maranhão. 2016. Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão. Relatório Técnico. Centro de Ciências Agrárias - Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, MA. p.165. Recuperado 23 novembro de 2020, <https://www.nugeo.uema.br/upnugeo/publicacoes/Bacias%20Hidrogr%C3%A1ficas%20e%20>
- Zhou, W., Wang, D., & Luo, L. 2012. Investigation of saltwater intrusion and salinity stratification in winter of 2007/2008 in the Zhujiang River Estuary in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(3), 31-46. DOI: 10.1007/s13131-012-0204-1

Submitted: 04 June 2021

Accepted: 24 March 2022

*Invited Associate Editors: Rayanne Setubal,
Reinaldo Bozelli and Vinícius Farjalla*