

Variabilidade hidrogeoquímica em águas do Estuário Amazônico

Hydrogeochemistry variability in the Amazon Estuary waters

Yashmin Keiller Lisboa Lopes¹

Vania Neu²

Juliana Feitosa Felizzola³

Luiza Carla Girard Mendes Teixeira⁴

Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa⁵(*)

Resumo

Este artigo objetivou avaliar a qualidade das águas do rio Guamá, da baía do Guajará e do canal Furo Grande, mediante métodos estatísticos de análise multivariada, apresentando os resultados de pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica e concentrações iônicas (Cl^- , Na^+ , NO_3^- e NH_4^+), coletadas durante nove campanhas que ocorreram em 2013 e 2014, nos municípios de Belém e Barcarena, PA. Os dados foram avaliados pela análise de componentes principais (ACP), a fim de investigar a variabilidade espacial e sazonal da área, que evidenciou a carga iônica (explicada por 51,10% da variância total) e o consumo de oxigênio para degradação da matéria orgânica (explicada por 17,9%) como determinantes na qualidade das águas. Porém, as variáveis meteorológicas demonstraram potencial influência nos parâmetros de qualidade das águas, sobretudo com os parâmetros de PC1, bem como a temperatura atmosférica que apresentou forte correlação positiva com condutividade elétrica (0,8), Cl^- (0,82) e Na^+ (0,81). Outra parte da explicação para a variabilidade dos parâmetros de qualidade da água está relacionada aos fatores de poluição antrópicos.

Palavras-Chave: Amazônia; análise multivariada; contaminação dos recursos hídricos.

Abstract

This study aim to evaluate the water quality of the Guamá river, the Guajará bay and Furo Grande river through statistical methods of multivariate analysis, presenting the results of pH, dissolved oxygen, electrical conductivity and ion concentrations (Cl^- , Na^+ , NO_3^- and NH_4^+) collected during nine campaigns that occurred in 2013 and

1 Engenheira Ambiental e de Energias Renováveis; Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará; Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, CEP: 66075-110, Guamá, Belém, Pará, Brasil; E-mail: ylisboa@ufpa.br.

2 Dr^a.; Bióloga; Professora Adjunta do Instituto Socioambiental e dos Recursos Hídricos da Universidade Federal Rural da Amazônia; Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501, CEP: 66077-830, Terra Firme, Belém, Pará, Brasil; E-mail: bioneu@yahoo.com.br.

3 Dr^a.; Nutricionista; Pesquisadora na Embrapa Amazônia Oriental; Endereço: Travessa Doutor Enéas Pinheiro, s/n, CEP: 66095-903, Marco, Belém, Pará, Brasil; E-mail: juliana.felizzola@embrapa.br.

4 Dr^a.; Engenheira Civil; Professora Associada da Universidade Federal do Pará; Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, CEP: 66075-110, Guamá, Belém, Pará, Brasil; E-mail: luiza.girard@gmail.com.

5 MSc.; Engenheiro Sanitarista e Ambiental; Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará; Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, CEP: 66075-110, Guamá, Belém, Pará, Brasil; E-mail: eduardoaguiarsc@hotmail.com (*) Autor para correspondência.

2014 in the municipalities of Belém and Barcarena, PA. The data were evaluated by principal component analysis (PCA) in order to investigate the spatial and seasonal variability of the area, which showed the ionic charge (explained for 51,10% of the total variance) and the consumption of oxygen for degradation of organic matter (explained for 17,9%) as determinants on water quality. However, the meteorological variables showed potential influence on the water quality parameters, especially with the PC1 parameters, just as well the atmospheric temperature that presented positive correlation strong with electrical conductivity (0,8), Cl⁻ (0,82) and Na⁺ (0,81), and other part of the explanation for the variability of water quality parameters is related to anthropogenic pollution factors.

Key words: Amazon; multivariable analysis; water resources contamination.

Introdução

Nos rios amazônicos observa-se uma sazonalidade com período chuvoso e seco bem definido que se reflete nas propriedades físico-químicas das águas, ocorrendo gradativas alterações ao longo do tempo (FERREIRA et al., 2012). Enquanto corpos hídricos passam ou margeiam regiões metropolitanas, ou seja, regiões altamente urbanizadas, sofrem também a influência da circulação local e das fontes de poluentes antrópicas, que podem estar sendo lançadas de modo irregular e sem tratamento, incapacitando o poder de autodepuração do sistema (RUGGIERI et al., 2011; ALVES et al., 2012; FERREIRA et al., 2012).

A deterioração dos recursos hídricos vem se agravando ao longo dos anos, com a falta de planejamento urbano, o descaso com o saneamento básico, a intensificação do setor industrial e agropecuário, resultando em contaminação e intensa degradação, que ameaça muitos ecossistemas (LV et al., 2013).

Entre os corpos d'água que tiveram suas propriedades alteradas, na Amazônia, está o sistema hidrográfico que banha a cidade de Belém, capital do Estado do Pará, a qual é envolvida por corpos d'água de extrema importância local, como o rio Guamá e a baía do Guajará (SANTOS et al., 2012).

Os corpos d'água limítrofes ao município recebem uma carga elevada de efluentes e resíduos sólidos, lançados diretamente nos corpos hídricos por cerca de 30 km de canais naturais, que desaguam no rio Guamá e na baía do Guajará (SANTOS et al., 2012). Os contaminantes, presentes nessas águas, são dispersos para a região insular, onde parte da população ribeirinha usufrui desse recurso para sanar suas necessidades, tornando-se vulneráveis a doenças de veiculação hídrica.

Estudos realizados nos corpos hídricos de Belém avaliaram o nível de contaminação das águas, devido ao seu funcionamento como receptor de rejeitos gerados pelo município, favorecendo a degradação socioambiental local. Há vários trabalhos referentes à composição biogeoquímica de acordo com a sazonalidade típica da região (VASCONCELOS; SOUZA 2011; SANTOS et al., 2012; MANGAS et al., 2013).

O banco de dados gerado a partir do monitoramento da qualidade da água pode ser analisado com métodos estatísticos de análise multivariada, como a análise dos componentes principais (ACP) (RUGGIERI et al., 2011; GUEDES et al., 2012; BRITO et al., 2014).

Desse modo, objetiva-se avaliar a qualidade da água em seis estações divididas no rio Guamá, baía do Guajará e canal Furo Grande, a partir de análise estatística multivariada, cujas amostragens ocorreram em nove campanhas, nos anos de 2013 e 2014, a fim de contribuir para o avanço do conhecimento acerca da influência da sazonalidade no aporte de nutrientes, bem como na identificação dos grupos de poluição presentes.

Área de Estudo

A cidade de Belém está localizada na zona equatorial, a 120 km do Oceano Atlântico, na foz do rio Amazonas, possuindo, ao norte, a baía do Marajó, a leste, os municípios de Marituba e Ananindeua, a oeste e ao sul, o rio Guamá que desemboca na baía do Guajará (VASCONCELOS; SOUZA, 2011), a qual compõe parte do estuário Amazônico, possuindo, em sua margem direita, o município de Belém, e em sua margem esquerda, uma região insular formada por cerca de 39 ilhas (VASCONCELOS; SOUZA 2011). Dentre essas, encontra-se a ilha das Onças, que distancia 5 km da capital do Estado e está sob domínio administrativo do município de Barcarena – PA. A ilha possui 19 km de extensão, cortados por canais, como o canal Furo Grande que, atualmente, é usado somente para o transporte de embarcações de pequeno porte, sobretudo da comunidade ribeirinha residente na área.

A área de estudo possui clima quente e úmido (Afi, segundo a classificação de Köppen), com umidade relativa do ar média anual de $86,8 \pm 3,05\%$, precipitação média anual de $2.921,7 \pm 122,145$ mm e temperatura média anual de $25,9 \pm 0,33$ °C (INMET, 2014). A distribuição de chuvas é irregular, por isso ela é definida na região com uma estação menos chuvosa, que compreende os meses de junho a novembro, e um período com maior volume de chuvas, observado entre os meses de dezembro a maio, caracterizado como período chuvoso.

Quanto à hidrografia, Furo Grande trata-se de um canal distante e estreito, comparado aos demais canais da ilha das Onças, atravessando esta de ponta, a ponta no sentido transversal. Já o rio Guamá nasce na Serra dos Coroados e deságua na baía do Guajará, que interliga a sub-bacia Guamá-Moju e o estuário do rio Pará, de tal modo que o rio Guamá e seus afluentes são a principal fonte de águas fluviais da baía (SANTOS et al., 2012). Das 14 bacias de drenagem municipais, as que apresentam maior área geográfica de Belém (bacias do Una, Tamandaré, Tucunduba e Estrada Nova) atravessam duas unidades morfológicas correspondentes aos planaltos costeiros e terraços e às planícies sedimentares de inundação (ARAÚJO Jr, 2013).

O rio Guamá recebe resíduos sólidos de áreas com ausência de coleta regular de lixo e chorume proveniente de lixões, o que vem trazendo grandes impactos aos ecossistemas aquáticos e ripários (BRAZ; MELLO 2005). A baía do Guajará corresponde ao ecossistema aquático com maior influência urbana da região amazônica por estar localizada em torno da cidade de Belém, o que resulta no despejo de resíduos oriundos da indústria pesqueira, atividade portuária mal planejada, madeireira, estaleiros e despejos domésticos e de petróleo (MENDES; SILVA; FRAZÃO, 2004; MELO, 2009). A baía recebe efluentes de 30 km de drenagens naturais, algumas canalizadas, que atravessam o setor urbano da cidade de Belém, transportando poluentes e contaminantes produzidos na capital e despejados na baía, degradando este e outros ecossistemas (MELO, 2009). Semelhantemente, grande parte da região Amazônica, especialmente as comunidades ribeirinhas da ilha das Onças não possuem saneamento básico. O lixo, fezes e

urina são lançados de forma *in natura* no meio ambiente, sobre o solo ou diretamente nos rios, contribuindo para a contaminação das águas da região.

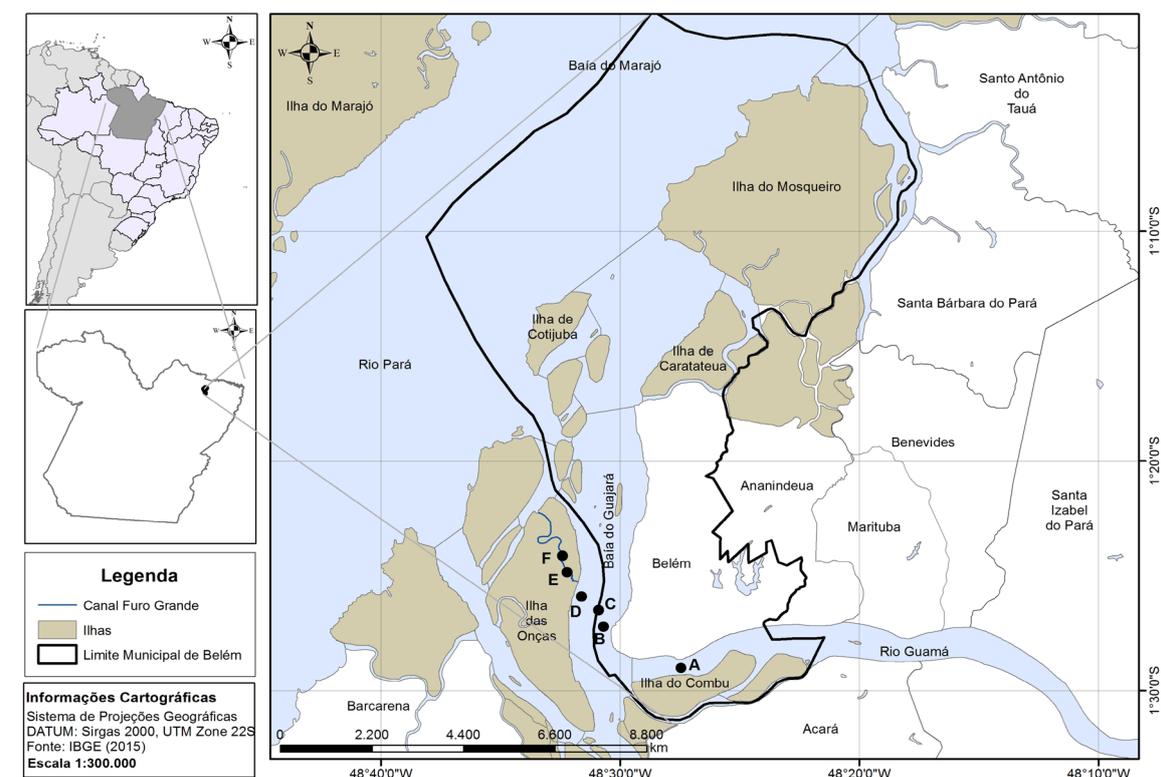
A vegetação da área urbanizada corresponde a florestas secundárias ou capoeiras, enquanto na região insular há o predomínio de açai (*Euterpe oleracea*), com coleta dos frutos e extração do palmito e também do cacau (*Theobroma cacao*). Tais vegetais são fundamentais na manutenção da economia ribeirinha (SCHALLENBERGER, 2010).

Material e Métodos

Procedimentos Amostrais

A química das águas dos três corpos hídricos foi determinada com base em 54 amostras coletadas em seis estações de amostragens, sendo elas: A – a 100 metros da margem direita do rio Guamá; B – a 100 metros da margem direita da baía do Guajará; C – no meio da baía; D – a 100 metros da margem esquerda da baía; E – adentrando 200 metros o canal Furo Grande; F – na parte média do canal (Figura 1). A amostragem ocorreu entre os meses de outubro de 2013 e setembro de 2014, com precipitação média mensal de 186 mm mês, no período menos chuvoso, e de 461 mm mês no período chuvoso. As amostras foram coletadas com o auxílio de uma garrafa vertical do tipo Van Dorn, armazenadas em frascos de polietileno com capacidade volumétrica de 100 mL, previamente tratados com solução de ácido clorídrico (HCl) a 10% (v/v), lavados com água deionizada e secados. Para preservação dos íons, foi adicionado timol nos frascos de determinação de cátions e ânions.

Figura 1 - Localização geográfica das estações de amostragem



Fonte: os autores.

Procedimentos Analíticos

Em campo, foram determinados os parâmetros físico-químicos: pH, oxigênio dissolvido (OD) e condutividade elétrica por potenciometria, a partir de um potenciômetro digital Orion, modelo 250, com eletrodos calibrados com soluções tampões em pH 4,010, 5,00 e 7,00, oxímetro digital Ysi, modelo 55, e de um condutivímetro digital, Amber Science, modelo 2052, ambos calibrados pelo fabricante.

Em laboratório, para a determinação dos cátions (Na^+ e NH_4^+) e ânions (Cl^- e NO_3^-), foram filtrados volumes conhecidos de amostras de água, utilizando filtros de acetato de celulose (Whatman GF/F), com porosidade nominal de 0,45 μm , e suas concentrações, foram determinadas por cromatografia líquida de troca iônica, em equipamento Dionex, modelo DX500, no Laboratório de Análises Sustentáveis da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

O método de análise por cromatografia líquida consiste na injeção da amostra em uma fase móvel, passando por uma coluna de troca iônica (fase estacionária), com sua detecção sendo obtida por condutividade elétrica. As concentrações foram calculadas por comparação com padrões externos, preparados frequentemente.

Parâmetros Meteorológicos

As variáveis meteorológicas incluídas neste estudo foram selecionadas devido a sua influência nos parâmetros de qualidade de água e os poluentes fornecidos a partir da descarga de efluentes domésticos e industriais. Utilizaram-se dados de precipitação acumulada mensal (mm) e temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$), fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia pela do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP, para o mesmo período de estudo (INMET, 2014) e de dados históricos (INMET, 1992).

Análise Estatística

Os dados referentes ao pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e concentrações de íons foram analisados estatisticamente a partir da análise de componentes principais, com o intuito de identificar as variáveis melhor explicadas no banco de dados, além do teste de Tukey, a fim de comparar as médias. A análise estatística dos dados foi executada usando o programa *Minitab Release 14 – Statistical Software* (cedido pela Universidade Federal Rural da Amazônia).

A análise de componentes principais (ACP) foi executada considerando um espaço hepta-dimensional definido pelas variáveis, em que cada caso foi determinado a partir das médias mensais de cada variável determinada nas águas do rio Guamá, baía do Guajará e canal Furo Grande, para o período entre os meses de outubro/2013 e setembro/2014. A análise foi baseada na correlação de matriz, na qual a matriz de covariância das variáveis foi gerada após os dados serem estandardizados, a fim de eliminar os efeitos que possam existir nos mesmos (RUGGIERI et al., 2011). Os componentes principais mais significantes foram definidos de acordo com o maior autovalor da unidade em que foi extraído.

A influência das variáveis meteorológicas selecionadas (temperatura do ar e precipitação) na qualidade das águas das áreas de estudo, foi verificada pela correlação de matrizes usando o coeficiente de correlação não paramétrico de Spearman. Além disto, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparação de médias de Tukey, a 5% de significância, para identificar se os dados de cada variável são estatisticamente semelhantes.

Resultados e Discussão

Análise de Componentes Principais (ACP)

Os resultados da ACP estão apresentados na tabela 1. Os quatro componentes principais explicaram a distribuição, por estação, com padrões de resposta em torno de 93,50%, sendo que o primeiro componente principal é responsável por explicar metade dos resultados (51,10%), com 3,6 de variância (autovalor), enquanto o segundo componente explica 17,9%, correspondendo a 1,2 da variância total. Já o terceiro e quarto componentes principais foram considerados com menor importância, pois explicam somente 13,0% e 11,40% da variância total, respectivamente. Portanto, consideraram-se os dois primeiros componentes principais, por representarem uma variação maior dos dados (69,00% da variância).

Tabela 1 - Coeficientes para os quatro primeiros componentes principais. Os valores negritos representam os escores de cada parâmetro em relação a cada componente. CE – Condutividade Elétrica, OD – Oxigênio Dissolvido.

Variável	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	0,368152	-0,19411	0,46854	-0,23318
CE	0,508371	0,004471	-0,19438	0,199223
Cl ⁻	0,499201	0,198295	-0,03326	0,196736
Na ⁺	0,486645	-0,01331	-0,30763	0,249554
OD	-0,16407	0,683457	-0,46649	-0,08902
NO ₃ ⁻	0,096181	0,669772	0,636437	0,080467
NH ₄ ⁺	-0,28953	-0,08424	0,155831	0,889133
Autovalor	3,5755	1,2562	0,9118	0,7994

Fonte: os autores.

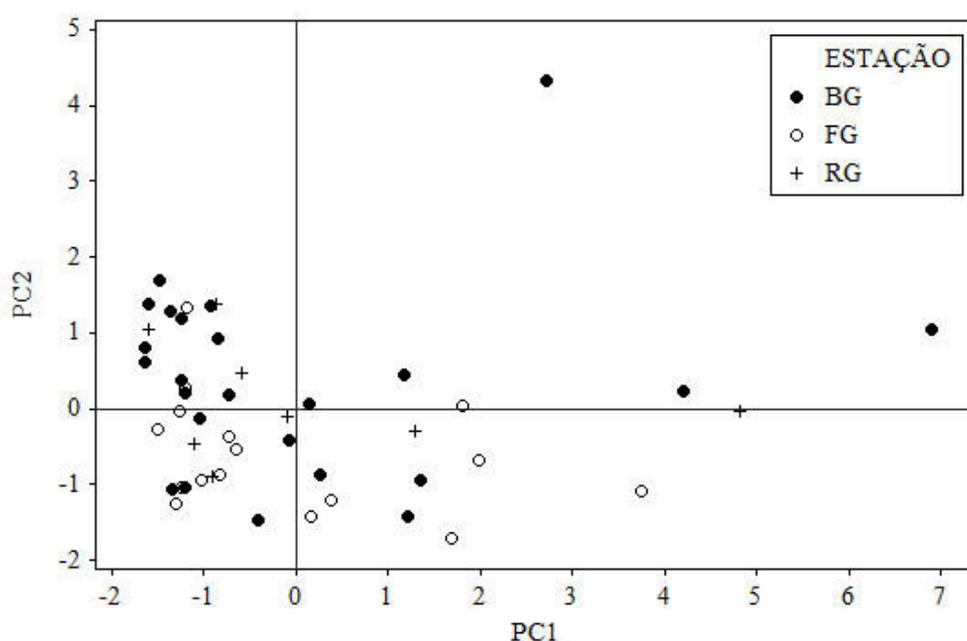
O primeiro componente principal (PC1) separou espacialmente as estações em função dos elementos iônicos, com coeficientes positivos para condutividade, Cl⁻ e Na⁺, enquanto OD e NH₄⁺ possuem coeficientes negativos (Tabela 1). O segundo componente principal (PC2) tem coeficiente positivo para OD e NO₃⁻ e coeficiente negativo para pH (Tabela 1), separando espacialmente as estações de amostragem, em função do consumo de oxigênio para degradação química da matéria orgânica.

Tradicionalmente, a biodegradação da matéria orgânica e a presença de NO₃⁻ são observadas como marcadores de efluentes na coluna de água, enquanto o pH sofre interferências naturais, a partir da variação da temperatura, e antrópicas com o despejo de efluentes domésticos e industriais. Portanto, esse componente pode ser interpretado como uma medida geral da descarga de águas

residuais que são despejadas na área de estudo, provenientes dos rios que desaguam no rio Guamá, como por exemplo, o Murutucu, o Tucunduba e o da Estrada Nova, que carregam taxas elevadas de nitrito e nitrato provenientes de esgotos domésticos e efluentes da estação de tratamento de água que abastece a cidade. Apesar de o OD também possuir carga no PC1, o segundo componente principal representa uma parte da variação inexplicada pela primeira componente.

Na figura 2, são apresentados os resultados de PC1 e PC2 de acordo com a estação de amostragem, na qual a convergência de grande parte dos elementos de cada estação, para o lado esquerdo do diagrama, remete à baixa influência das cargas iônicas nos mesmos.

Figura 2 - Plotagem dos resultados dos dois primeiros componentes principais da ACP, considerando as propriedades físicas e químicas nas águas do rio Guamá (RG), baía do Guajará (BG) e canal Furo Grande (FG) – Pa, para os anos de 2013 e 2014



Fonte: Autores, 2014.

No primeiro componente, constata-se que, embora a maioria das estações esteja disposta na parte esquerda do diagrama, alguns elementos de todas as áreas de estudo, principalmente da baía do Guajará e do canal Furo Grande, estão distribuídos na parte direita, devido ao grande aporte de nutrientes descarregados nos corpos hídricos, proveniente de atividades comerciais da indústria pesqueira, da atividade portuária inadequada, madeireira, estaleiros e dos vazantes de petróleo e, sobretudo, a carga de efluentes despejada nesse corpo hídrico, aumentando a carga iônica e dissipados até o canal (Figura 2). Entretanto, observa-se, no componente 2, que a maioria dos elementos da baía, está na parte superior do diagrama, possuindo coeficientes positivos, enquanto os elementos do canal Furo Grande estão distribuídos na parte inferior com valores negativos para tal componente (Figura 2), caracterizando o canal como área mais impactada para PC2.

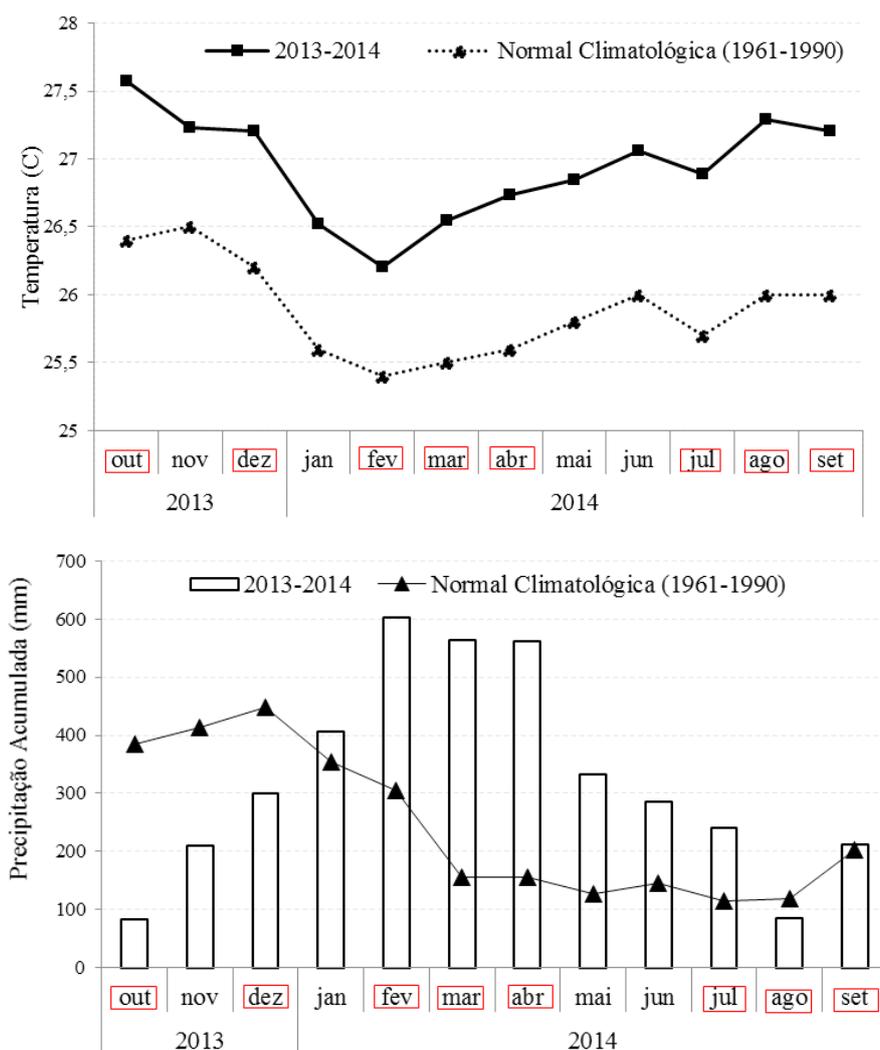
Brito et al. (2014) definiram, para as águas superficiais do lago Catalão em 2004 e 2005, PC1 em função da condutividade, alcalinidade, CO_2 e cátions, enquanto PC2 foi firmemente influenciado pela concentração de OD, embora NH_4^+ , sólidos suspensos totais (SST) e transparência da água tenham se mostrado relevantes para esse componente.

Alves et al. (2012) interpretaram para as águas do rio Arari, na Ilha do Marajó, PC1 como um gradiente para demanda biológica de oxigênio (DBO_5), maré, índice de estado trófico (IET) e clorofila-a, enquanto PC2 é representado positivamente por maré, pH, temperatura, condutividade, OD e índice de qualidade da água (IQA).

Variação espacial e sazonal na qualidade da água

As variáveis climatológicas estão apresentadas na figura 3, durante o ano hidrológico de outubro de 2013 a setembro de 2014. Na tabela 2, é mostrada a correlação de matrizes entre as variáveis meteorológicas selecionadas (precipitação acumulada e temperatura do ar) e os parâmetros de qualidade de água. As plotagens gráficas dos parâmetros de qualidade de água permitem a avaliação visual da variabilidade espacial e sazonal do pH (Figura 4), condutividade elétrica, Cl^- e Na^+ (Figura 5) e OD, NO_3^- e NH_4^+ (Figura 6).

Figura 3 - Comportamento anual (2013-2014) e Normais Climatológicas (1961-1990) da temperatura atmosférica (A) e da precipitação acumulada (B). Destaque em vermelho para os meses de amostragem.



Fonte: INMET (1992; 2014).

O teste de Tukey revelou que os dados da variável pH não apresentaram diferença estatisticamente significativa ($p=0,10$). Além disso, a variável apresentou correlação negativa com a precipitação nos períodos chuvoso e menos chuvoso, significando que as variáveis possuem comportamento inverso, de modo que a intensificação das chuvas na região induz à redução do pH dos rios, tornando-os mais ácidos, e a diminuição do volume precipitado provoca a alcalinidade dos corpos hídricos, enquanto, no período menos chuvoso, indicou correlação positiva com a temperatura (Tabela 2).

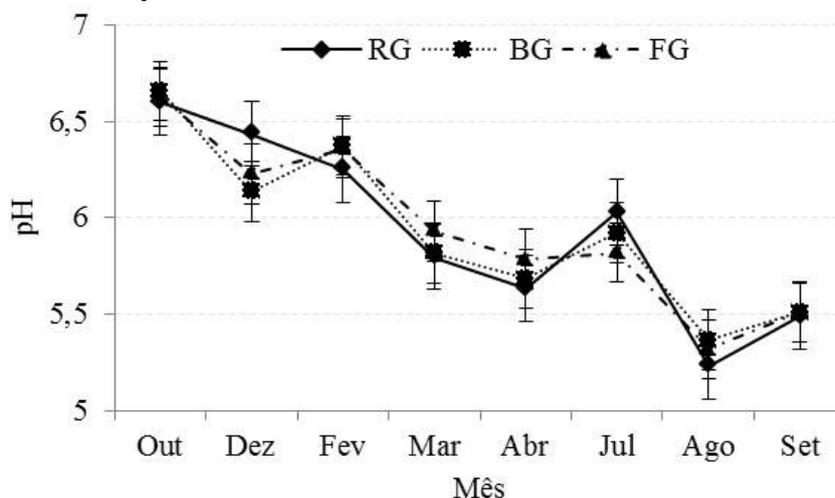
Tabela 2 - Correlação de Spearman entre os parâmetros de qualidade de água e as médias meteorológicas. CE – Condutividade Elétrica; OD – Oxigênio Dissolvido.

Variável	pH	CE	Cl ⁻	Na ⁺	OD	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
Menos Chuvoso							
Temperatura	0,46	0,8	0,78	0,81	-0,34	0,78	-0,14
Precipitação	-0,24	-0,56	-0,57	-0,51	0,03	-0,41	0,19
Chuvoso							
Temperatura	-0,13	0,8	0,82	0,81	0,19	-0,53	-0,38
Precipitação	-0,28	-0,98	-0,98	-0,98	0,22	0,13	0,64

Fonte: os autores.

Ao longo do ano hidrológico, os valores de pH demonstraram valores homogêneos entre as áreas analisadas, variando entre 5,2 e 6,6, com valor médio de $6 \pm 0,4$ (Figura 4). Sazonalmente, as águas dos três corpos hídricos registraram valores elevados durante o período chuvoso cuja média foi de $6,0 \pm 0,3$, enquanto, na faixa menos chuvosa, a média observada foi de $5,8 \pm 0,6$.

Figura 4 - Comportamento mensal médio do pH nas águas superficiais do rio Guamá (RG), baía do Guajará (BG) e canal Furo Grande (FG). Os símbolos representam o valor médio e os segmentos representam o desvio padrão.



Fonte: os autores.

O pH observado nas áreas de estudo apresentou-se ligeiramente ácido (5,2 e 6,6), semelhante a diversos estudos nos rios da região Amazônica (6,1), sem danos ao ambiente aquático (PINTO et al., 2009; ALVES et al., 2012; FERREIRA et al., 2012; SANTOS et al., 2013; BRITO et al., 2014; LOBATO et al., 2015).

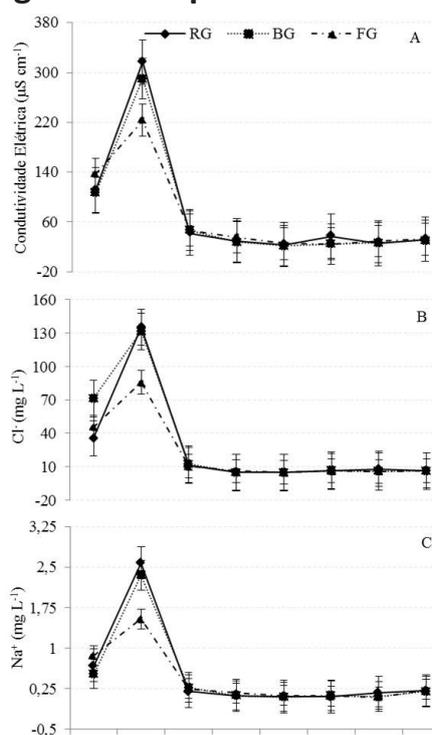
A pequena variação no pH reflete a eficiente capacidade de tamponamento pelo ecossistema, de tal modo vai de variação de ligeiramente ácida, pela contribuição da bacia hidrográfica e decomposição da matéria orgânica, até ligeiramente alcalina, devido à contribuição geológica (SIQUEIRA et al., 2012).

A condutividade elétrica da que água apresentou diferença estatisticamente significativa de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,01$), está positivamente correlacionada com a temperatura nas duas fases climatológicas analisadas neste estudo e apresenta forte correlação negativa com a precipitação no período chuvoso (Tabela 2). Logo, a elevação nas taxas de precipitação acumulada representa a redução das taxas iônicas no período chuvoso.

Quanto à sazonalidade, verificou-se que dezembro foi o mês de maior concentração de íons e maior variabilidade nas três áreas aferidas, com médias de $77 \pm 100 \mu\text{S cm}^{-1}$, $72 \pm 92 \mu\text{S cm}^{-1}$ e $69 \pm 72 \mu\text{S cm}^{-1}$, nas águas superficiais do rio Guamá, baía do Guajará e canal Furo Grande, respectivamente (Figura 5A).

Esse comportamento é explicado devido ao início do período chuvoso que, após lavar o município e a região insular, favorece a elevação das cargas iônicas escoadas para as águas superficiais, ao passo que, durante os meses mais chuvosos como fevereiro, março e abril, os valores registrados de condutividade elétrica foram baixos, devido seu alto grau de diluição.

Figura 5 - Comportamento mensal médio da condutividade elétrica (A), Cl⁻ (B) e Na⁺ (C) nas águas superficiais do rio Guamá (RG), baía do Guajará (BG) e canal Furo Grande (FG). Os símbolos representam o valor médio e os segmentos representam o desvio padrão.



Fonte: os autores.

A concentração de Cl^- apresentou diferença estatisticamente significativa para o teste de Tukey ($p < 0,01$), com correlação positiva com a temperatura atmosférica, já que altas taxas dessa variável resultam no aumento do percentual evaporado e, em um consequente aumento na concentração de Cl^- . A precipitação registrou forte correlação negativa com o íon no período chuvoso, pois a ocorrência de chuvas aumenta o grau de dissociação do ânion (Tabela 2).

A dinâmica sazonal de Cl^- (Figura 5B) registrou comportamento semelhante à condutividade elétrica (Figura 5A). A maior concentração do íon ocorreu no período mais chuvoso no rio Guamá e na baía do Guajará, com médias de $135 \pm 43 \text{ mg L}^{-1}$ e $132 \pm 55 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente, e o canal Furo Grande registrou menores concentrações, com média de $86 \pm 34 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 5B).

O teste de Tukey revelou que os dados referentes à concentração de Na^+ apresentaram diferença estatisticamente significativa ($p < 0,01$), enquanto o coeficiente de correlação de Spearman mostrou que houve correlação positiva com a temperatura em ambos os períodos e forte correlação negativa com a precipitação na fase mais chuvosa (Tabela 2). Tais correlações estão relacionadas ao volume de água superficial, percentual de evaporação e concentração de Na^+ resultante, pois o aumento da temperatura favorece a evaporação e a elevação do íon; já o aumento das chuvas provoca maior dissociação iônica.

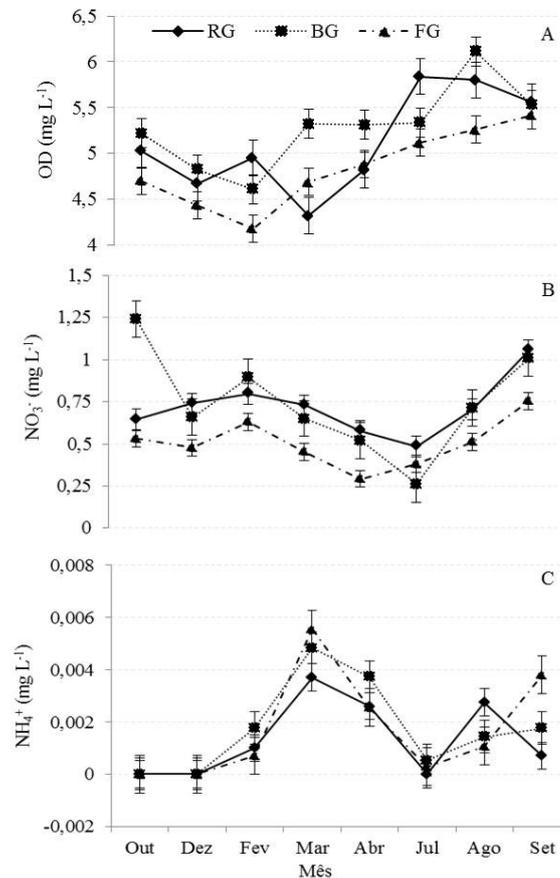
As maiores concentrações de Na^+ foram observadas no final do período seco e início do chuvoso, no qual o mês de dezembro apresentou maior variabilidade com média de $2,10 \pm 1,10 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 5C). Menores concentrações do íon foram registradas nos meses mais chuvosos, com média de $0,16 \pm 0,08 \text{ mg L}^{-1}$, devido ao aumento de sua taxa de diluição no sistema após a elevação na entrada de água a partir da precipitação.

O parâmetro condutividade elétrica destacou-se por se apresentar semelhante entre o rio Guamá, a baía do Guajará e o canal Furo Grande, com valores elevados no início do período chuvoso (dezembro), decorrente da entrada de marés oceânicas em maior volume, rica em Na^+ e Cl^- , além do escoamento superficial provocado pelas chuvas na região metropolitana e insular, elevando a concentração de cargas iônicas. Santos et al. (2013) verificaram maiores valores de condutividade elétrica, Cl^- e Na^+ no período menos chuvoso. A redução da condutividade elétrica revela a capacidade dos corpos hídricos em diluir os despejos recebidos (PINTO et al., 2009).

Observou-se, com a aplicação do teste de Tukey, que os dados de OD são estatisticamente semelhantes ($p > 0,15$), enquanto o coeficiente de correlação de Spearman mostra que OD possui fraca correlação com as variáveis climatológicas, apresentando maior coeficiente negativo com a temperatura no período menos chuvoso, ou seja, quanto maior a temperatura, maior é o grau de degradação da matéria orgânica e menor a concentração de OD (Tabela 2), exceto no período chuvoso em que há correlação não linear com a variável climatológica, demonstrando que a insolação não influencia no aporte de oxigênio nesta fase sazonal.

A análise sazonal revelou grande heterogeneidade entre as concentrações de OD, com mínimas em fevereiro de $4,5$ e $4,9 \text{ mg L}^{-1}$, na baía e no canal, respectivamente (Figura 6A), valores baixos para o período chuvoso. Quanto à concentração espacial de OD, constatou-se a baía do Guajará como área de maior variação, com média de $5,3 \pm 0,45 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto a menor variação ocorreu no canal Furo Grande, com média de $4,8 \pm 0,4 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 6A), apresentando menor concentração devido ao acúmulo de matéria orgânica e de efluentes provenientes da região metropolitana de Belém que são direcionados ao Furo Grande impactando a área.

Figura 6 - Comportamento mensal médio de OD (A), NO_3^- (B) e NH_4^+ (C), nas águas superficiais do rio Guamá (RG), baía do Guajará (BG) e canal Furo Grande (FG). Os símbolos representam o valor médio e os segmentos representam o desvio padrão.



Fonte: os autores.

As concentrações de NO_3^- apresentaram-se diferentes, estatisticamente, para o teste de Tukey, com $p < 0,01$. Além disso, há correlação positiva com a temperatura no período menos chuvoso, de tal modo que o aumento da temperatura resulta em maior evaporação das águas superficiais e, conseqüentemente, elevação no aporte do íon (Tabela 2).

Ao longo do ano hidrológico, observou-se que o íon NO_3^- variou com a quantidade de chuvas, com valores maiores no mês de outubro, na baía, o qual compreende período menos chuvoso, com média de $1,2 \pm 0,5 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 6B). Essa fase é caracterizada por apresentar maior concentração de nutrientes nos corpos hídricos, devido sua baixa diluição, com a entrada de NO_3^- proveniente de efluentes domésticos da região metropolitana de Belém além do que é inserido ao sistema pela navegação.

O íon NH_4^+ apresentou diferença estatisticamente significativa entre os pontos de coleta ($p < 0,01$), de acordo com o teste do Tukey, e correlação positiva com a precipitação nas fases menos chuvosa e chuvosa (Tabela 2), segundo o coeficiente de Spearman. O comportamento sazonal do íon registrou uma elevação na concentração durante o período chuvoso, nos meses de março e abril, com médias de $0,005 \pm 0,001 \text{ mg L}^{-1}$ e $0,003 \pm 0,002 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente (Figura 6C), comportamento comum em período chuvoso, pois as águas pluviais carregam maior quantidade de

matéria orgânica para os corpos hídricos, aumentando, assim, a concentração de NH_4^+ nas águas superficiais. Além disso, verificou-se alta concentração de NH_4^+ no canal Furo Grande no mês mais chuvoso (março), caracterizando a área como de baixa capacidade de diluição de poluentes.

Análises espaciais permitiram identificar a baía do Guajará como a área mais impactada quanto à qualidade das águas devido aos resíduos de pescados, ao intenso fluxo de embarcações e ao despejo de efluentes domésticos que são dispostos nessa área, representados pela alta concentração de NO_3^- e NH_4^+ , que indica a poluição bacteriana e o caráter redutor deste setor (Pinto et al. 2009).

Áreas com forte interferência antrópica estão sujeitas a alterações de suas propriedades físico-químicas, produzindo condições ambientais inadequadas, como baixas concentrações de OD são decorrentes do lançamento de efluentes contendo elevada carga de material em suspensão e matéria orgânica (PINTO et al., 2009; SIQUEIRA et al., 2012).

Alves et al. (2012) constataram altas concentrações de OD no período menos chuvoso favorecidas pela entrada de marés semidiurnas, enquanto Santos et al. (2013) aferiram, nas águas do Lago Água Preta, em Belém, maior concentração de OD na fase mais chuvosa, com média de $5,1 \pm 1,2$ mg L⁻¹, e de $5,0 \pm 1$ mg L⁻¹ na fase menos chuvosa. Além disso, Santos et al. (2013) também verificaram comportamento semelhante para as variáveis NO_3^- e NH_4^+ com menor concentração no período menos chuvoso ($0,27 \pm 0,3$ mg L⁻¹ e $0,01 \pm 3,3$ mg L⁻¹, respectivamente), enquanto Pinto et al. (2009) constataram maior concentração de NH_4^+ no final do período chuvoso em área de grande influência humana, com mínimo de $0,32$ mg L⁻¹ e máximo de $0,49$ mg L⁻¹, nas águas do rio Negro, em Manaus.

Da análise dos resultados, observa-se que a primeira componente principal, de fato, modela a carga iônica, pois o comportamento da condutividade elétrica e o aporte de Cl^- e Na^+ , entre os corpos hídricos, apresentaram-se semelhantes, demonstrando o controle que a dinâmica sazonal possui sobre esses parâmetros, já que ambos indicam correlação positiva com a temperatura atmosférica. Constata-se essa forte correlação, observando-se o comportamento anual da temperatura do ar durante o período de estudo, o qual se assemelha ao comportamento das cargas iônicas.

Além disto, os parâmetros determinados como componentes principais indicam forte correlação negativa com a precipitação, apresentando-se inversamente proporcional ao aporte de íons Cl^- , Na^+ e condutividade elétrica. Portanto, os meses com altas temperaturas do ar e baixa precipitação correspondem à alta concentração iônica, como observado no mês de dezembro.

A sazonalidade revelou que a temperatura atmosférica está mais positivamente correlacionada aos parâmetros determinados como componente principal, de tal modo que a elevação da temperatura provoca um aumento na concentração dos elementos iônicos decorrente do aumento na taxa de evaporação. Assim como a precipitação indicou forte correlação negativa com os mesmos parâmetros, caracterizando o período chuvoso com menor concentração de íons nas águas superficiais estudadas, eventos de forte chuva significam aumento da descarga de água, favorecendo a diluição dos íons (RUGGIERI et al., 2011).

Conclusão

A avaliação físico-química das águas superficiais permitiu visualizar a variabilidade de cada parâmetro observando a dinâmica sazonal e a distribuição de fontes de poluentes nas áreas analisadas, caracterizando o canal Furo Grande como área fortemente impactada pela descarga de efluentes domésticos e industriais, provenientes da região metropolitana de Belém, reduzindo a concentração de OD e elevando a concentração de poluentes como o NH_4^+ .

As variações observadas na região indicam que as condições meteorológicas da área de estudo são determinantes no comportamento das variáveis hidrogeoquímicas, sobretudo das cargas iônicas. Logo, o controle da descarga de efluentes domésticos e industriais oriundos da região metropolitana de Belém, assim como os resíduos provenientes de embarcações, deve ser maior no período em que há favorecimento sazonal da degradação das bacias que compõem a área de estudo, a fim de garantir a qualidade do sistema hidrográfico Amazônico.

Material Suplementar

PONTOS	DATA	pH	Cond	OD	cloro (Cl)	nitro (NO_3^-)	amônio (NH_4^+)	sódio (Na^+)
A	28.10.2013	6,5993333	111,3	5,03	35,5189	0,64488	0	0,6793
	08.12.2013	6,435	316,66	4,67	135,381	0,73958	0	2,5796
	01.02.2014	6,2496667	41,76	4,95	10,9874	0,79588	0,001	0,2025
	08.03.2014	5,795	29,83	4,32	5,0335	0,72908	0,0037	0,124
	21.04.2014	5,6326667	23,66	4,82	4,8644	0,57628	0,0026	0,1056
	12.07.2014	6,027	37,2	5,84	6,0485	0,48468	0	0,1043
	03.08.2014	5,2303333	25,65	5,8	7,8835875	0,70474	0,00275	0,17695
14.09.2014	5,488	32,3	5,56	6,542375	1,0563	0,0007	0,211	
B	28.10.2013	6,6566667	122,46	5,43	144,1859	2,73028	0	0,2008
	08.12.2013	6,5613333	423,33	5,43	208,2485	0,71578	0	3,7506
	01.02.2014	6,4433333	52	4,07	14,785	1,02878	0,0032	0,3878
	08.03.2014	5,9326667	32,4	5,45	4,8514	0,78718	0,0049	0,1298
	21.04.2014	5,7503333	25,66	5,71	6,6344	0,72118	0,0057	0,111
	12.07.2014	6,0913333	30,06	4,91	7,8464	0	0	0,1249
	03.08.2014	5,3371667	26,983333	5,7416667	6,0204375	0,80384	0,001	0,14595
14.09.2014	5,558	33,2	5,47	6,702175	1,1511	0,0018	0,2178	
C	28.10.2013	6,7043333	107,4	5,78	38,0262	0,59178	0	0,7145
	08.12.2013	6,3466667	273,33	4,98	126,3724	0,69618	0	2,4487
	01.02.2014	6,337	48,43	4,91	12,0918	0,92298	0,0007	0,2194
	08.03.2014	5,7443333	27,6	5,95	4,828	0,66098	0,0052	0,1299
	21.04.2014	5,7326667	22,36	5,47	4,2748	0,56008	0,0025	0,1011
	12.07.2014	5,9186667	23,03	5,65	6,9336	0,41858	0,0003	0,1403
	03.08.2014	5,3835	26,75	6,2783333	5,4915875	0,76579	0,0015	0,08955
14.09.2014	5,7096667	31	5,38	6,439475	1,0073	0,0019	0,2118	

PONTOS	DATA	pH	Cond	OD	cloreto (CL ⁻)	nitrito (NO ₂ ⁻)	amônio (NH ₄ ⁺)	sódio (Na ⁺)
D	28.10.2013	6,613	91,23	4,443	31,8659	0,39168	0	0,6565
	08.12.2013	5,501	173,33	4,063	59,8919	0,56218	0	0,8509
	01.02.2014	6,3423333	40	4,843	9,6333	0,72988	0,0014	0,2113
	08.03.2014	5,7746667	23,83	4,56	4,7954	0,50318	0,0044	0,1123
	21.04.2014	5,5663333	17,53	4,75	3,1551	0,27898	0,003	0,0736
	12.07.2014	5,753	20,93	5,45	4,2154	0,36388	0,0013	0,0995
	03.08.2014	5,3736667	25,616667	6,3166667	5,3776875	0,57229	0,0018	0,08995
	14.09.2014	5,264	25,8	5,74	5,141475	0,8659	0,0016	0,1749
E	28.10.2013	6,7306667	134,13	5,46	50,7419	0,54898	0	1,0643
	08.12.2013	6,2973333	166,66	4,6866	61,3919	0,50858	0	1,1132
	01.02.2014	6,448	40,66	4,23	8,9967	0,67138	0	0,214
	08.03.2014	5,9716667	36,13	4,6	6,2477	0,45838	0,0069	0,1815
	21.04.2014	5,8066667	23,73	4,9	4,5204	0,29758	0,0011	0,1068
	12.07.2014	5,7553333	21,53	5,1	6,2817	0,42468	0,0002	0,1139
	03.08.2014	5,2465	27,966667	5,075	5,4342375	0,52694	0,00115	0,0958
	14.09.2014	5,4176667	28,4	5,87	5,677875	0,8309	0,0012	0,2027
F	28.10.2013	6,523	139,76	3,943	40,211333	0,5108133	0	0,66308
	08.12.2013	6,160	280	4,1833	110,2758	0,44398	0	1,9635
	01.02.2014	6,272	52,73	4,13	11,8328	0,58698	0,0014	0,2818
	08.03.2014	5,8896667	35,33	4,77	5,9345	0,44598	0,0042	0,1645
	21.04.2014	5,7586667	26,56	4,86	5,2092	0,28718	0,004	0,1348
	12.07.2014	5,8813333	27,6	5,13	6,26512	0,338364	0,00036	0,11658
	03.08.2014	5,3885	30,55	5,44	5,8033375	0,49514	0,001	0,0918
	14.09.2014	5,603	36,8	4,97	7,106275	0,6765	0,0064	0,2664

Fonte: os autores.

Referências

ALVES, I. C. C.; EL-ROBRINI, M.; SANTOS, M. L. S.; MONTEIRO, S. M.; BARBOSA, L. P. F.; GUIMARÃES, J. T. F. Qualidade das águas superficiais e avaliação do estado trófico do rio Arari (Ilha de Marajó, norte do Brasil). *Acta Amazonica*, Manaus, v. 42, n. 1, p. 115 – 124, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672012000100014>

ARAÚJO JR. A. C. R. Planejamento urbano-ambiental na cidade de Belém (PA): reflexões sobre o PROMABEN. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, Paraná, v. 27, p. 179 – 192. 2013.

BRAZ, V. N.; MELLO, V. S. A. Estudo temporal da qualidade da água do rio Guamá. Belém-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., Campo Grande. *Anais...* Campo Grande: [S.I.], 2005.

BRITO, J. G.; ALVES, L. F.; ESPÍRITO SANTO, H. M. V. Seasonal and spatial variations in limnological conditions of a floodplain lake (Lak e Catalão) connected to

both the Solimões and Negro Rivers, Central Amazonia. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 44, n. 1, p. 121 – 134, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672014000100012>

FERREIRA, S. J. F.; MIRANDA, S. A. F.; MARQUES FILHO, A. O.; SILVA, C. C. Efeito da pressão antrópica sobre igarapés na Reserva Florestal Adolpho Ducke, área de floresta na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 4, p. 533 – 540, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672012000400011>

GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D.; ELESBON, A. A. A.; RIBEIRO, C. B. M.; MATOS, A. T.; SOARES, J. H. P. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 558 – 563, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000500012>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 10 ago 2015.

INMET. **Normais Climatológicas (1961-1990)**. Brasília: INMET, 1992.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**, Brasília, 2014. Disponível em: <www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 28 out. 2014.

LOBATO, T. C.; HAUSER-DAVIS, R. A.; OLIVEIRA, T. F.; SILVEIRA, A. M.; SILVA, H. A. N.; TAVARES, M. R. M.; SARAIVA, A. C. F. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. **Journal of Hydrology**, v. 522, n. 1, p. 674 – 683, 2015. doi: 10.17080/1676-5664/btcc.v13n1p43-54

LV, Y.; HUANG, G.; SUN, W. A solution to the water resources crisis in wetlands: Development of a scenario-based modeling approach with uncertain features. **Science of The Total Environment**, v. 442, n., p. 515 – 526, 2013. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.028

MANGAS, A. P.; SILVA, A. C.; FERREIRA, S. C. G.; PALHETA, G. D. A.; MELO, N. F. A. C. Ictioplâncton da baía do Guajará e do estuário do rio Pará, ilha do Marajó, Pará, Brasil. **Boletim Técnico Científico do CEPNOR**, v. 13, n. 1, p. 43 – 54, 2013. doi: 10.17080/1676-5664/btcc.v13n1p43-54

MELO, Y. P. C. **Caracterização da ictiofauna durante o período seco, na baía do Guajará e baía do Marajó**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aquática e Pesca) – Universidade Federal do Pará, Centro de Ciências Biológicas, Belém, PA, 2009.

MENDES, A. C.; SILVA, C. A.; FRAZÃO, E. Levantamento batimétrico da baía de Guajará – Belém/PA. In: WORKSHOP TÉCNICO-CIENTÍFICO DO

PROJETO PETRORISCO, 3., 2004, Belém. Workshop Técnico-Científico do Projeto PETRORISCO, 3 – CDROM, 2004.

PINTO, A. G. N.; HORBE, A. M. C.; SILVA, M. S. R.; MIRANDA, S. A. F.; PASCOALOTO, D.; SANTOS, H. M. C. Efeitos da ação antrópica sobre a hidrogeoquímica do rio Negro na orla de Manaus/AM. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 3, p. 627 – 638, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000300018>

RUGGIERI, N.; CASTELLANO, M.; CAPELLO, M.; MAGGI, S.; POVERO, P. Seasonal and spatial variability of water quality parameters in the Porto of Genoa, Italy, from 2000 to 2007. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 1, p. 340 – 349, 2011. [doi:10.1016/j.marpolbul.2010.10.006](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.10.006)

SANTOS, S. N.; LAFON, J. N.; CORRÊA, J. A. M.; BABINSKI, M.; DIAS, F. F.; TADDEI, M. H. T. Distribuição e assinatura isotópica de Pb em sedimentos de fundo da foz do rio Guamá e da baía do Guajará (Belém – Pará). **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 249 – 256, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422012000200004>.

SANTOS, M. L. S.; BORDALO, A. O.; PEREIRA, J. A. R.; CHIRA, P. A.; ALVES, I. C. C.; SODRÉ, S. S. V. Influência da expansão urbana na qualidade da água em reservatório da região Amazônica (Belém, Pará). **Boletim Técnico Científico do CEPNOR**, Belém, v. 13, n. 1, p. 15 – 22, 2013. <http://dx.doi.org/10.17080/1676-5664/btcc.v13n1p15-22>.

SCHALLENBERGER, B. H. **A atividade pesqueira nas ilhas do entorno de Belém**. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aquática e Pesqueira) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Biológicas, Belém, PA, 2010.

SIQUEIRA, G. W.; APRILE, F.; MIGUÉIS, A. M. Diagnóstico da qualidade da água do rio Parauapebas (Pará – Brasil). **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 3, p. 413 – 422, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672012000300014>.

VASCONCELOS, V. M. M.; SOUZA, C. F. Caracterização dos parâmetros de qualidade da água do manancial Utinga, Belém, PA, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 6, n. 2, p. 305 – 324, 2011. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.202>.