



PROCESSOS DE EUTROFIZAÇÃO EM ESTUÁRIOS TROPICAIS DO NORDESTE DO BRASIL: LITORAL SUL DE PERNAMBUCO

Júlio Cesar Cândido da SILVA*¹; Luiz Gustavo de Sales JANNUZZI¹; Rysouaurea Keyla TRAVASSOS¹; Brenno Januário da SILVA²; Matheus Thauam Fernandes de SANTANA¹; Samara Gracciele Lima SARAIVA¹, Liana Moura FURTADO¹, Manuel de Jesus FLORES-MONTES¹

¹ Departamento de Oceanografia – DOCEAN, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Av. Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, 50740-550 Recife, PE, Brazil. E-mails: luiz.jannuzzi@ufpe.br; kkeylatravassos@gmail.com; matheus.thauam@ufpe.br; samara.saraiva@ufpe.br; liana.mfurtado@ufpe.br; manuel@ufpe.br

² Universidade Federal do Rio Grande, Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima - Instituto de Oceanografia. E-mail: brennojanuario@gmail.com

* Corresponding author: Julio.candido@ufpe.br

Resumo

Devido ao rápido crescimento populacional e ocupação de áreas costeiras, os estuários vêm sofrendo pressão antrópica, por meio de atividades como a urbanização e despejo de esgotos não tratados, industriais e domésticos, carcinicultura e agropecuária, reduzindo a qualidade da água e o desenvolvimento de organismos aquáticos, causando o desaparecimento de diversas espécies importantes. Estes lançamentos foram evidenciados nos estuários do Rio Jaboatão, Rio Ipojuca, Rio Sirinhaém e Rio Formoso, no litoral sul do estado de Pernambuco. Visto isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o estado atual da qualidade da água nos diferentes sistemas estuarinos tropicais, observando-se a sazonalidade local, tomando como base a resolução 357/2005 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) e aplicando-se o índice de estado trófico-TRIX. Os estuários estudados e de acordo com o índice TRIX, apresentaram valores acima de 5, indicando um processo de eutrofização contínuo (Rio Jaboatão e Rio Ipojuca), ou de forma intermitente (rios Sirinhaém e Formoso). Em consequência a este processo, os estuários estudados mostraram valores de oxigênio dissolvido (OD) abaixo do que determina a resolução CONAMA 357, como por exemplo, 3,1 mg L⁻¹ no Rio Jaboatão. Portanto, conclui-se que os diferentes tipos de impactos observados para cada sistema estuarino diminuem a qualidade da água ao longo do ano.

Palavras-Chave: Urbanização costeira, Pressão antrópica, Índice TRIX, Qualidade da água, Sistemas estuarinos.

Abstract

Due to rapid population growth and occupation of coastal areas, estuaries have been suffering human pressure, through activities such as urbanization and dumping of untreated industrial and domestic sewage, shrimp farming, and agriculture, reducing water quality and the aquatic organism's health, causing the disappearance of several important species. These effluents were evident in the estuaries of the Jaboatão River, Ipojuca River, Sirinhaém River, and Formoso River, on the south coast of the Pernambuco State. Given this, the aim of this work was to evaluate the current state of water quality in different tropical estuarine systems, observing local seasonality, taking as a basis resolution 357/2005 of CONAMA (National Council for the Environment) and applying the trophic state index-TRIX. The estuaries studied and according to the TRIX index, presented values above 5, indicating a continuous eutrophication process (Rio Jaboatão and Rio Ipojuca), or intermittently (Sirinhaém and Formoso rivers). As a result of this process, the estuaries studied showed dissolved oxygen (DO) values below what determines the CONAMA 357 resolution, for example, 3.1 mg L⁻¹ in the Jaboatão River. Therefore, it is concluded that the different environmental impacts observed for each estuarine system reduce water quality throughout the year.

Keywords: Coastal urbanization, Anthropogenic pressure, TRIX index, Water quality, Estuarine systems.

Introduction

Os estuários são ecossistemas costeiros que apresentam um contato contínuo ou periódico com regiões marinhas, e uma grande relevância ecológica e socioeconômica pela importância que possui na manutenção de muitas espécies, tais como, peixes, mamíferos, aves e entre outros organismos que dependem deste ambiente para viver, alimentar-se e reproduzir-se (Nanni, 2005). Sua localização é uma posição chave para a ciclagem dos nutrientes. Além disso, são nessas localidades onde estão presentes os manguezais, um ecossistema dinâmico que fornece importantes serviços ecossistêmicos (e.g. proteção a linha de costa, berçário para organismos marinhos e pesca de subsistência) (Araújo et al., 2018). Contudo, com o desenvolvimento urbano, crescimento populacional e a expansão agrícola, os estuários vêm sofrendo impactos antrópicos recorrentes, que podem levar à eutrofização dos ambientes estuarinos (Andrews et al., 2008).

A eutrofização é a proliferação excessiva de organismos da comunidade primária, como microalgas, macroalgas e plantas aquáticas, resultado do processo de input de nutrientes nos ambientes aquáticos, principalmente de origem antrópica, ocasionando a redução do oxigênio dissolvido (OD) no local (Barreto et al., 2013) e conseqüentemente na perda da qualidade da água. Dentre os impactos antrópicos que causam a eutrofização em estuários, podemos citar o despejo de efluentes domésticos e industriais não tratados, como esgoto e fertilizantes usados nas atividades agrícolas, principalmente em monoculturas, como a da cana-de-açúcar (Tailadart et al., 2020).

Além da eutrofização, os estuários também estão susceptíveis à redução da vazão fluvial ocasionada pela construção de barragens, que causa uma maior intrusão de água salina, resultando em uma mudança na composição faunística e florística do local devido a variação de salinidade, podendo causar um declínio dos recursos pesqueiros locais (Genz et al., 2008). Por fim, os estuários vêm perdendo uma grande área de ecossistemas de manguezal por conta de atividades econômicas como a carcinicultura, hotelaria, turismo e agropecuária (Rocha et al., 2001).

No Brasil, para estabelecer a manutenção da qualidade ambiental em um sistema estuarino, são seguidas as diretrizes de classificação dos corpos de água, enquadradas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, na resolução 357/05 (Eschrique et al., 2011). Além do CONAMA, outra forma de avaliar a qualidade de um corpo hídrico é utilizando índices tróficos, como o TRIX, que é amplamente utilizado em sistemas costeiros como um medidor do estado trófico local, se baseando em parâmetros abióticos e bióticos (e.g. nitrogênio inorgânico dissolvido, fósforo inorgânico dissolvido, saturação do oxigênio dissolvido e o teor de clorofila-a) (Noriega et al., 2019; Sá et al., 2021).

Dito isso, buscamos avaliar a qualidade ambiental de quatro diferentes sistemas estuarinos tropicais de acordo com os períodos sazonais, estes estuários estão localizados na costa de Pernambuco, nordeste do Brasil, tomando como base a resolução CONAMA 357/2005 e o índice TRIX. As regiões estudadas possuem diferentes problemáticas e importâncias socioeconômicas, como por exemplo a proximidade a grandes aglomerados urbanos, complexo portuário e inúmeras zonas de engenho, com plantio da monocultura da cana-de-açúcar, além da alta demanda turística anual. Portanto, hipotetiza-se que devido à proximidade dos estuários a diversas fontes de contaminação estes encontram-se sob eutrofização.

Métodos

Área de estudo

O rio Jaboatão (RJ) tem uma bacia hidrográfica de 442 km², com uma densidade populacional de 2.716,1 habitantes por km² e uma vazão, próximo à foz, de 13,84 m³/s, onde recebe a contribuição do rio Pirapama, que é um afluente importante do complexo estuarino do rio Jaboatão. O complexo estuarino do rio Ipojuca (RI), por sua vez, possui uma bacia hidrográfica de 3.435 km²; densidade populacional de 180,6 habitantes por km² e uma vazão de 9 m³/s. Já o estuário do rio Sirinhaém (RS) tem uma bacia hidrográfica com 2.091 km², uma densidade populacional de 124,3 habitantes por km² e uma vazão de 9 m³/s. Por fim, o estuário do Rio Formoso (RF), que faz parte da bacia hidrográfica dos rios Sirinhaém e Una, apresenta uma extensão de 12 km e uma vazão de 6,1 m³/s. A densidade populacional no seu entorno é de 103,5 habitantes por km² (Figura 1).

Os pontos foram selecionados e denominados conforme o gradiente salino, classificando-os em estuário superior (RJ1, RI1, RS1 e RF1), estuário médio (RJ2, RI2 e RF2) exceto no estuário do Rio Sirinhaém e estuário inferior (RJ3, RI3, RS3 e RF3).

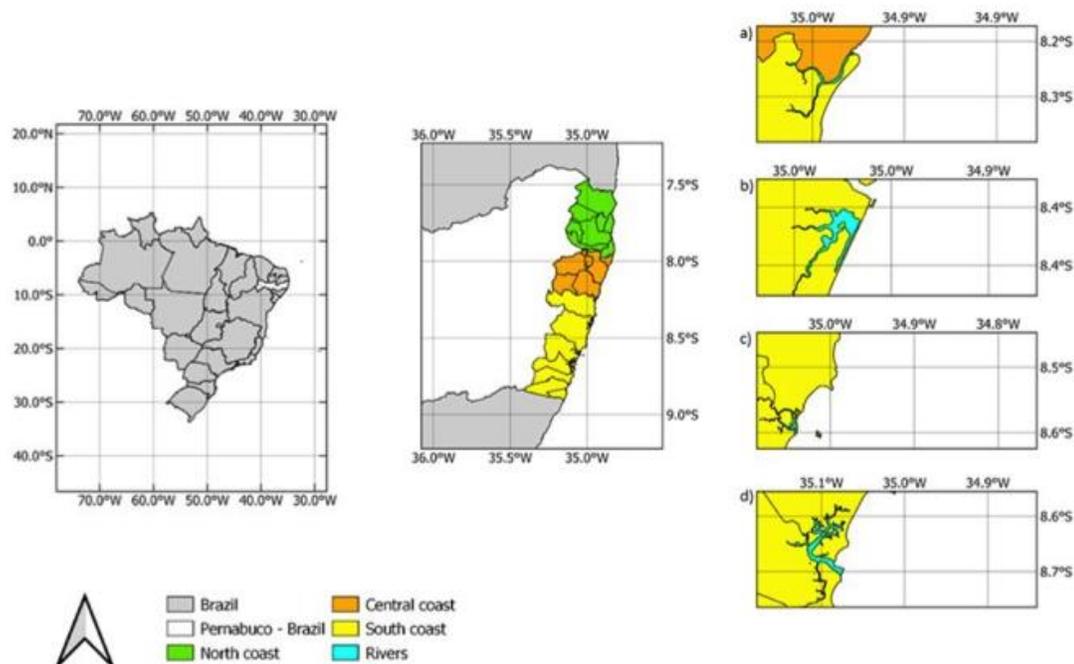


Figura 1. Mapa da área de estudo. a) Rio Jaboatão b) Rio Ipojuca c) Rio Sirinhaém e d) Rio Formoso. Fonte: Os autores (2023).

Metodologia de Coletas das Amostras e Medições *In Situ*

Foram realizadas duas campanhas de amostragem, uma em março e outra em julho de 2021. Amostras de água superficial foram coletadas levando-se em consideração o ciclo da maré, com coletas realizadas tanto na baixa-mar, quanto na preamar. Todas as amostras foram coletadas em recipientes previamente descontaminados com HCl 5%, e ambientalizados no momento da coleta.

No total, 44 amostras foram colhidas, transportadas para laboratório e congeladas até o momento de análise. Dados de parâmetros físicos e químicos, tais como, pH, oxigênio dissolvido, saturação de oxigênio dissolvido, temperatura e salinidade foram aferidos *in situ* com o auxílio de uma sonda multiparâmetros (modelo AK88).

Determinação do material particulado em suspensão e análise de nutrientes

No laboratório, as amostras foram filtradas para determinação do material particulado em suspensão, de acordo com Baumgarten *et al.* (1996). A fração dissolvida (< 0,47 µm) de cada amostra, foi destinada para análise e quantificação das concentrações de nutrientes seguindo as respectivas metodologias, para o nitrito (NO₂⁻) e o nitrato (NO₃⁻) Garcia-Robledo *et al.* (2014).

Para a amônia (NH₃ + NH₄⁺) foi empregada a metodologia descrita por Bower *et al.* (1980). O nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) foi calculado a partir do somatório das frações nitrogenadas (NID = [NO₂⁻] + [NO₃⁻] + [NH₃ + NH₄⁺]). Por fim, o fósforo inorgânico dissolvido (PID) e o silicato (Si(OH)₄) foram analisadas conforme a metodologia descrita por Grasshoff *et al.* (1983).

Clorofila-a

Os dados de clorofila-a foram obtidos através da reanálise do projeto Estudos sobre o ciclo do Carbono Inorgânico Dissolvido em áreas costeiras do Nordeste e Norte do Brasil e sua relação com os processos de acidificação oceânica (DICAM). O banco de dados do DICAM nos forneceu informações da clorofila-a no ano de 2019, nos quatro sistemas estuarinos, nos mesmos pontos da desembocadura (RJ3, IP3, RS3 e RF3) dos estuários e em períodos semelhantes.

Índice Trix

O índice que mede o estado trófico dos sistemas estuarinos segundo a metodologia (Vollenweider, 1998), classifica a qualidade da água utilizando-se de quatro variáveis, são elas: clorofila-a (Chl-a), saturação de oxigênio dissolvido (OD%), concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) e concentração de fósforo inorgânico dissolvido (PID).

$$TRIX = \log (Chl - a * OD\% * NID * PID) + k/m$$

Onde:

- Chl-a é a concentração de clorofila a expressa em mg/mm³ ;
- OD% é o valor total de saturação de oxigênio dissolvido no corpo hídrico;
- NID é o somatório dos compostos nitrogenados $\Sigma[NH^3 + NH_4 +] + [NO_2 -] + [NO_3 -]$, em mgL⁻¹;
- PID é o fósforo inorgânico dissolvido expresso em mg L⁻¹;
- k = 1,5 e m = 1,2 são constantes com valores introduzidos para que se ajuste o valor limite mais baixo

do índice e a extensão da escala trófica, relacionando-os a 10 unidades TRIX (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação do índice TRIX

VALOR	ESTADO TRÓFICO	QUALIDADE DA ÁGUA
0 - 4	Oligotrófico	Alta qualidade
4 - 5	Mesotrófico	Boa qualidade

5 - 6	Eutrófico	Baixa qualidade
6 - 10	Hipereutrófico	Pobre

Estatística

Foi utilizado o software Excel para realização dos cálculos estatísticos e elaboração dos gráficos, onde o tratamento de dados foi a aplicação da estatística descritiva (máximo, mínimo, média e desvio padrão). A análise dos componentes principais (PCA) permite que um conjunto de dados com várias variáveis sejam reduzidas sem que haja perda da informação dos dados, isso é atestado pela variabilidade da amostra. Para estas análises foi utilizado o software estatístico R (versão 4.1.1) e do Rstudio (versão 1.4.1717).

O teste estatístico Shapiro-wilk foi realizado para testar a normalidade dos dados e para as análises de correlação foi utilizado da correlação de Spearman, através do software estatístico SPSS.

Resultados e discussão

Pluviosidade

A precipitação anual foi obtida com dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC (2021), representados na figura 2.

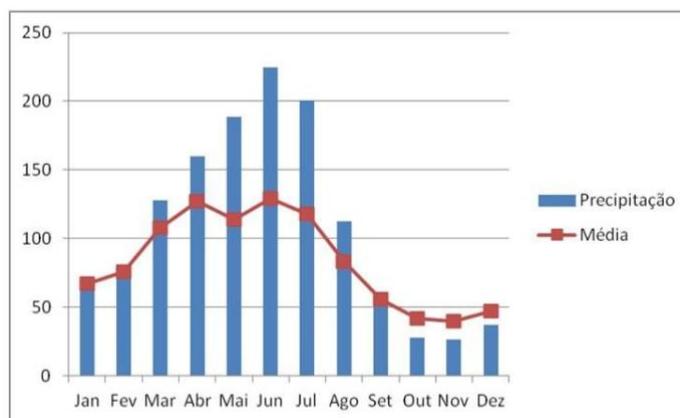


Figure 2. Precipitação mensal de 2021 e média dos últimos 30 anos em mm por mês do ano Fonte: <https://www.apac-homo.pe.gov.br/climatologia/519-climatologia>.

Com base nisso, nota-se que o período com maior precipitação ocorreu entre março e agosto, com chuvas acima da média histórica, enquanto que os meses entre setembro e fevereiro

apresentaram chuvas na média ou abaixo dos valores observados historicamente. Os meses que foram realizadas nossas coletas foram nos meses de março e junho, ambos apresentaram chuva acima da média, sendo junho o mês mais chuvoso do ano de 2021.

Após coleta de amostras e análises laboratoriais executadas obteve-se os seguintes resultados apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Resultados obtidos para os parâmetros hidrológicos durante os períodos de baixa-mar e preamar, nas porções do estuário superior, estuário médio e estuário inferior.

Estuário	Maré	Porção	Salinidade		Temperatura (°C)		MPS (mg.L-1)		Sat. OD (%)	
			Março	Junho	Março	Junho	Março	Junho	Março	Junho
Rio Jaboatão	Baixa-mar	Sup.	1,24	12	26,9	25,9	80,48	63,08	55,62	38,1
		Médio	1,24	0,3	27,2	26,3	99,60	42,00	67,92	40,3
		Infer.	23,7	0,19	28,9	25,3	40,04	23,20	95,73	62,5
	Preamar	Sup.	35	30	28,6	25,8	72,90	74,11	46,11	37,5
		Médio	1,23	0,25	29,7	28,2	52,29	50	139,50	70,2
		Infer.	3,38	0,15	30,4	26,9	67,60	29,27	204,18	96
Rio Ipojuca	Baixa-mar	Sup.	0,17	0,09	28,5	27,3	101,61	38,8	83,23	78
		Médio	4,18	0,08	30,4	25,9	74	56,21	100,54	72,2
		Infer.	27,8	19,1	31,7	29	36,84	133,33	174,65	98
	Preamar	Sup.	26,7	18,1	28,1	25,7	51,20	48,20	76,82	95
		Médio	4,52	0,08	29,2	26	35,00	43,20	155,53	78,6
		Infer.	0,15	0,12	31,2	29,3	74,40	39,18	173,11	108
Rio Sirinhaém	Baixa-mar	Sup.	0,07	0,06	27,4	24,5	136,07	79,17	97,33	87,6
		Infer.	7,67	33,6	28,3	26,4	36	59,35	111,95	67,3
	Preamar	Sup.	0,05	0,07	29,4	24,9	206,74	76,20	91,26	72,6
		Infer.	4,53	31,1	30,8	25,6	64,12	66,67	160,77	84,3
Rio Formoso	Baixa-mar	Sup.	0,06	0,06	25,7	25,2	53,61	85,71	115,29	81,1
		Médio	12,5	33,1	29,4	27,1	174,00	45,87	119,72	54,4
		Infer.	35,2	34,5	31,9	30,2	73,19	62,60	165,03	89,3
	Preamar	Sup.	0,04	0,04	27	25,5	39,23	36,44	111,95	85,4
		Médio	20,4	30,1	30,8	26,6	73,95	90,44	136,66	75,6
		Infer.	30,9	31,6	32,2	27	82,54	74,04	164,18	85,4

Os parâmetros de salinidade e temperatura mantiveram um padrão conservativo, ou seja, não sofreram influência de atividades biológicas. De uma forma geral, os valores de salinidade são alterados de acordo com a mistura das massas d'água e do sistema de evaporação-precipitação do

ciclo da água, o que foi registrado neste estudo e indicado através dos diagramas de dispersão para amostragem dos resultados (figuras 3 - 6), tendo a salinidade como parâmetro que zoneia o estuário longitudinalmente, visto que os valores mais baixos estão localizados nas regiões internas e os mais altos entre a região de mistura e a desembocadura. Nos resultados deste estudo, os valores mínimo de salinidade 0,04 (estuário superior) e máximo 35,2 (estuário inferior) foram observados no Rio Formoso, mostrando uma variação longitudinal da salinidade dentro do ambiente estuarino, com forte presença das águas marinhas mais salinas, e intensos processos de diluição no estuário médio, uma característica observada em todos os estuários estudados e um fato corroborado na literatura em outros sistemas estuarinos tropicais, como em Schettini *et al.* (2016) e Proum *et al.*, (2018).

A temperatura, por sua vez, apresentou variação sazonal em decorrência da taxa de insolação e das estações do ano. O valor máximo de temperatura foi registrado no estuário inferior do Rio Formoso, no mês de março, de 32,2 °C, já o valor mínimo deu-se no estuário superior do Rio Sirinhaém, em junho, possuindo assinatura térmica de 24,5 °C. Variações longitudinais dos valores da temperatura superficial da água podem ser causadas tanto pela sazonalidade, quanto pela profundidade dos estuários avaliados, semelhante ao visto por Lima e Galvani (2018) e Santos (2013).

Tanto a salinidade quanto a temperatura foram parâmetros ambientais de grande importância, interferindo na solubilidade dos gases na água (Deng *et al.*, 2018), e desta forma, interferiram na concentração e saturação do oxigênio dissolvido na água (valores esses que serão discutidos mais adiante). Além disso, segundo Carmouze (1994), estes parâmetros influenciam no metabolismo dos organismos aquáticos, alterando processos fisiológicos, o desenvolvimento e até mesmo determinando o processo de zoneamento da fauna e flora dos estuários, fator regido pelas diferentes capacidades de resistência dos organismos de viver em locais com grande variação de salinidade.

Para o MPS, os resultados obtidos indicaram que os pontos internos recebiam e retiveram maiores teores de material particulado, o qual foi também observado por Schettini *et al.*, (2016), no estuário do rio Capibaribe. Os maiores valores chegaram a 206,74 mg L⁻¹ no Rio Sirinhaém, a média \pm desv. padrão para todos os ambientes estudados foi de 63,60 \pm 36,56 mg L⁻¹. O excesso de MPS e conseqüentemente de matéria orgânica também pode alterar o pH do ambiente, comumente tornando-o mais ácido. Collischonn e Dornelles (2013) citam que o pH exerce influência na decomposição de materiais tóxicos e em condições ácidas aumentam a concentração de nutrientes como o nitrogênio amoniacal.

O NO₃⁻ é a fração que representa 91,64% \pm 33,44% do NID calculado, de acordo com a resolução CONAMA 357/2005 os valores para esta fração devem se apresentar abaixo de 0,40 mg

L-1. Os resultados neste trabalho demonstraram que os rios Jaboatão (3,9 mg L⁻¹), Rio Ipojuca (2,42 mg L⁻¹), Rio Formoso (2,67 mg L⁻¹) e Rio Sirinhaém (1,39 mg L⁻¹) apresentaram valores excedentes ao determinado pela resolução para um corpo hídrico saudável, o que pode causar intoxicação nos organismos aquáticos, levando-os à morte, como afirma Hannas (2010). Podemos identificar com maior clareza os valores para o NID na figura 3.

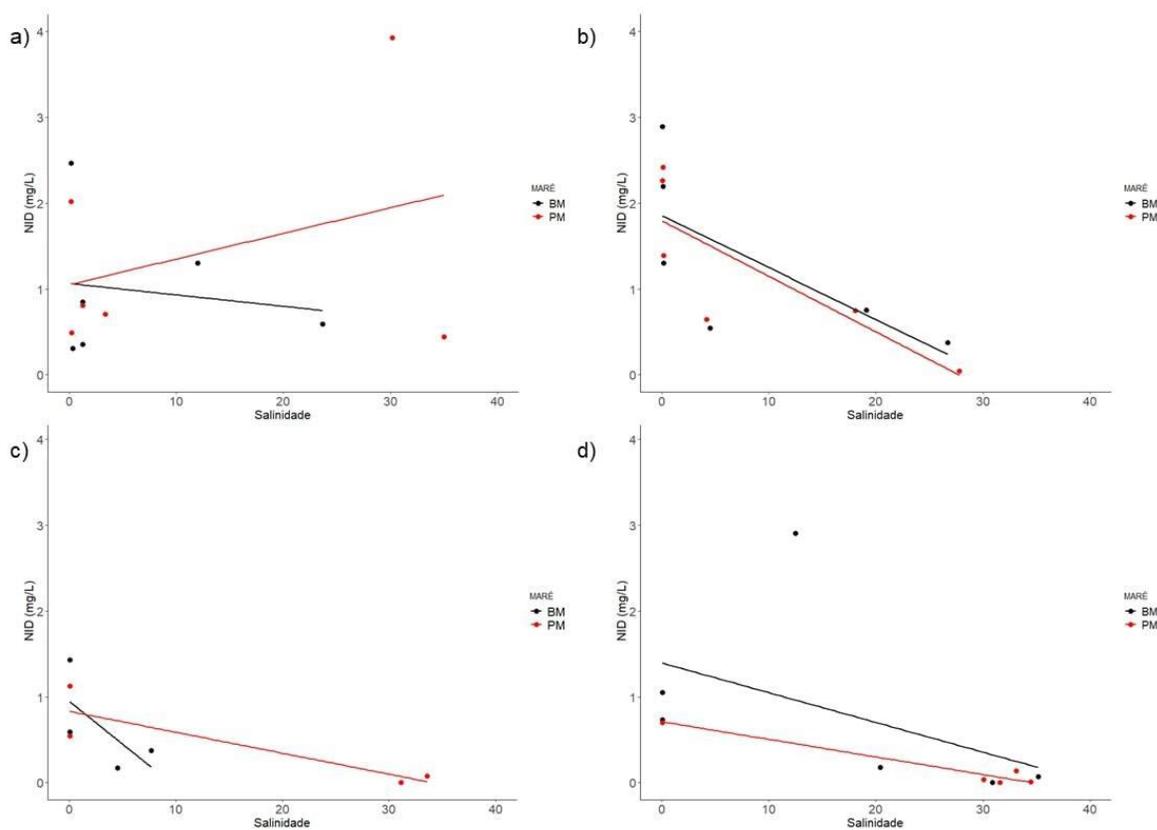


Figura 3. Nitrogênio inorgânico dissolvido nos estuários dos rios a) Jaboatão, b) Ipojuca, c) Sirinhaém e d) Formoso em mgL⁻¹.

O silicato, por sua vez, tem sua origem na dissolução do solo, proveniente dos processos de intemperismo e erosão. Valores significativos desse nutriente são encontrados em regiões estuarinas pela proximidade com as fontes terrígenas que ele possui. Entretanto, esse teor pode ser potencializado, mediante a destruição da mata ciliar para construção de residências civis, uso da terra para a agricultura, empreendimentos hoteleiros e entre outras possibilidades (Bastos, 2014), todas estas variantes foram detectadas nos estuários estudados. Na natureza, o silicato apresenta-se como um importante nutriente assimilado principalmente por organismos fitoplanctônicos (e.g. silicoflagelados e diatomáceas) e desta forma elevando a produção primária

nas localidades (Rezende *et al.*, 2006; Wu; Chou, 2003; Fraser; Wilcox, 1981). Os resultados neste trabalho destacam os valores máximos quantificados nos rios Jaboatão (8,94 mg L⁻¹), Rio Ipojuca (6,05 mg L⁻¹), Rio Formoso (5,83 mg L⁻¹) e Rio Sirinhaém (1,82 mg L⁻¹). O que mostra como esse nutriente pode auxiliar na elevação do índice tróficos nos estuários estudados (Figura 4).

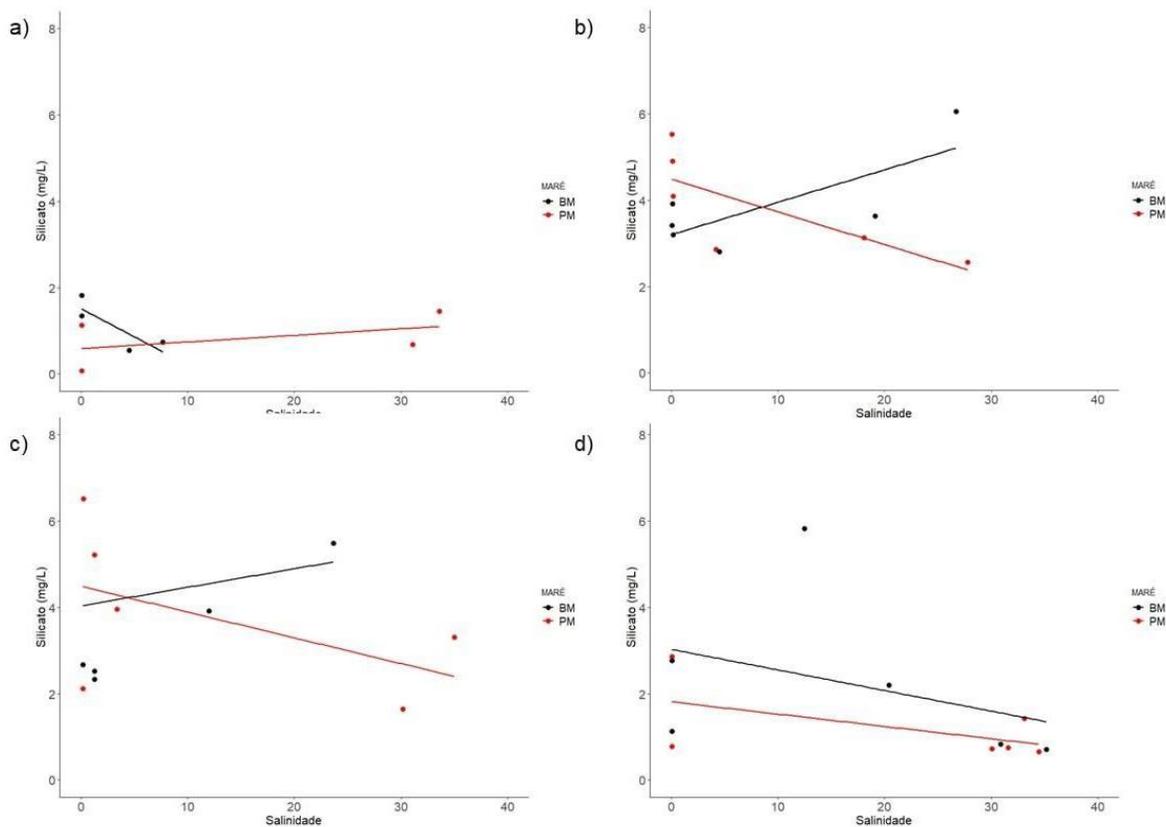


Figure 4. Silicato nos estuários dos rios a) Jaboatão, b) Ipojuca, c) Sirinhaém e d) Formoso em mgL-1.

O fósforo inorgânico dissolvido é utilizado como um indicador ambiental, pois além de suas fontes naturais para o meio ambiente, como o solo (Gaspar, 2009), o incremento desse nutriente, vindo através do esgoto urbano ou de seu uso na agricultura (Marins *et al.*, 2011), são exemplos de fontes externas que potencializam o aumento do nível trófico nos ambientes aquáticos (Eschrique, 2007). Para as localidades estudadas foram destacados os valores máximos nos rios Jaboatão (1,25 mg L⁻¹), Rio Ipojuca (0,17 mg L⁻¹), Rio Formoso (0,8 mg L⁻¹) e Rio Sirinhaém (0,15 mg L⁻¹). Foi observado o derrame de esgoto urbano sem prévio tratamento em todos os estuários avaliados e mais evidenciado no estuário do Rio Jaboatão, vemos os níveis de PID expressos na figura 5.

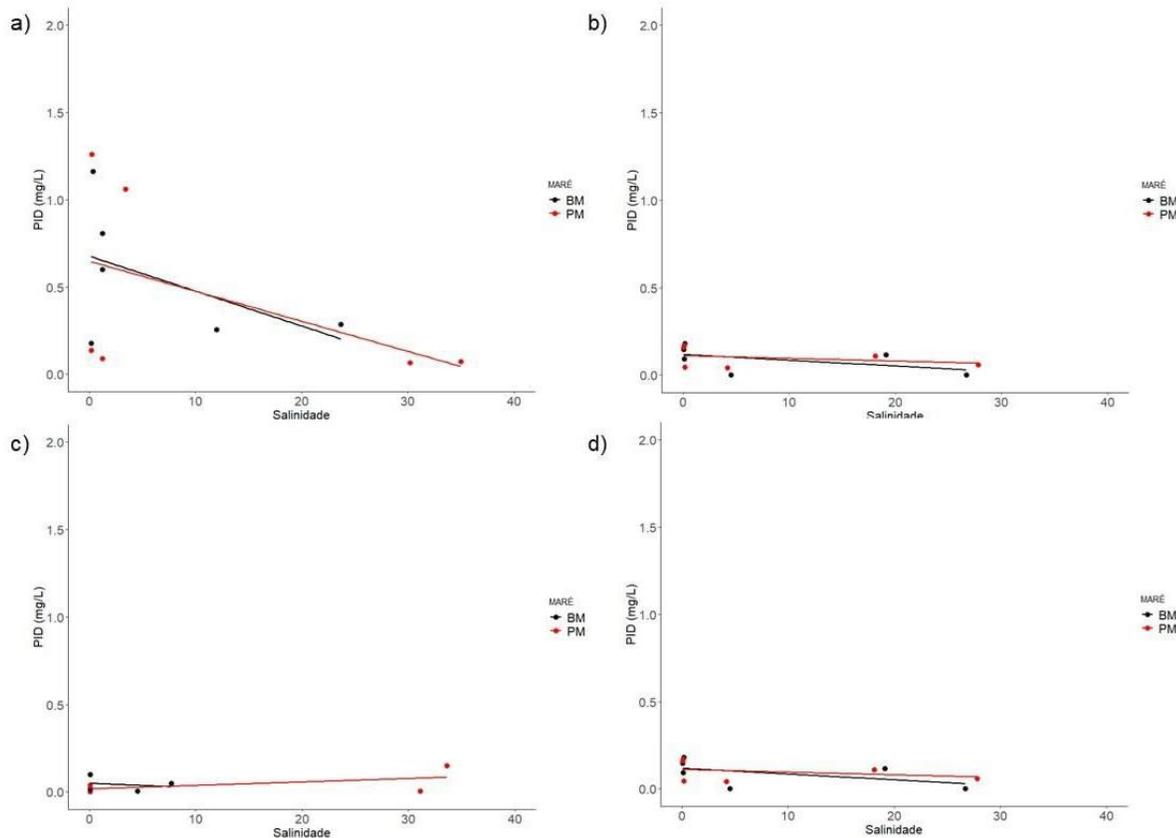


Figure 5. Fósforo inorgânico dissolvido nos estuários dos rios a) Jaboatão, b) Ipojuca, c) Sirinhaém e d) Formoso em mgL-1.

Em uma visualização comparativa entre os estuários, os maiores valores foram encontrados no estuário do Rio Jaboatão, sendo de 3,26 mg L⁻¹ (NID), 8,94 mg L⁻¹ (Silicato) e 1,26 mg L⁻¹ (PID). Em contraponto, os mínimos valores foram observados nos estuários que distam da região metropolitana do Recife, Rio Sirinhaém e Rio Formoso, estes valores mínimos podem chegar a zero nos pontos das desembocaduras, dependendo da sazonalidade e da mudança do estado da maré.

Expressivos valores dos nutrientes inorgânicos dissolvidos nos sistemas aquáticos levam a proliferação de organismos heterótrofos, resultando na depleção dos valores da concentração e da saturação do OD (Araújo *et al.*, 2007). Os níveis de saturação do oxigênio dissolvido em cada sistema estuarino podem ser vistos na figura 6.

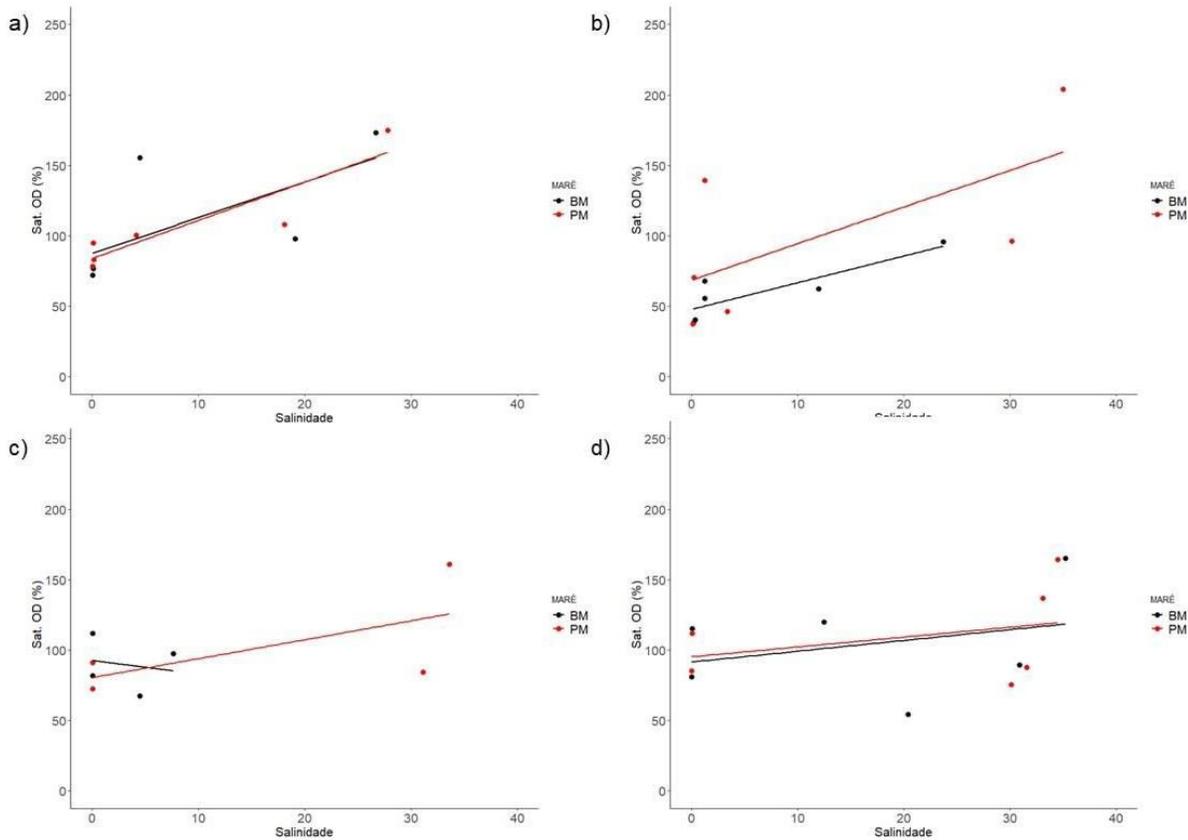


Figure 6. Saturação do oxigênio dissolvido (%) nos estuários dos rios a) Jaboatão, b) Ipojuca, c) Sirinhaém e d) Formoso.

Com relação a saturação do oxigênio dissolvido e os níveis de concentração de OD na água, há uma tendência observada, onde a região da desembocadura é mais oxigenada pela influência que recebe das águas oligotróficas e oxigenadas vindas da região marinha (Yin *et al.*, 2004) (tabela 2). Por outro lado, os pontos internos nos estuários médios e superiores foi onde detectaram-se os menores valores, destacando-se o mínimo de OD no Rio Jaboatão, com uma concentração de 3,1 mgL⁻¹ e saturação de 37,5% de OD. A resolução CONAMA 357/2005 indica que os níveis de OD em águas salobras do tipo 1 não devem estar abaixo de 5 mg L⁻¹. Os rios Ipojuca (3,9 mg L⁻¹) e Formoso (4,3 mg L⁻¹) também apresentaram valores abaixo do mínimo que é indicado pelo CONAMA. Águas com baixa concentração e saturação de OD dificultam a vida na água e podem acarretar na mortandade de organismos aquáticos.

Foi observado que a Chl-a indicou os seguintes valores para o Rio Jaboatão, máximo 30,58 mg mm³ e mínimo 7,59 mg mm³, no Rio Ipojuca, máximo 11,67 mg mm³ e mínimo 2,67 mg mm³, no Rio Formoso, o máximo foi de 4,71 mg mm³ e o mínimo de 3,05 mg mm³ e para o Rio Sirinhaém,

máximo de 3,06 mg mm³ e mínimo de 2,21 mg mm³. Azevedo et al. (2008) cita que, ambientes que apresentam altos teores de OD, disponibilidade de nutrientes dissolvidos e entrada da luz na água, permitem o desenvolvimento das microalgas fitoplanctônicas e o aumento da sua biomassa, podendo ser quantificada na análise de clorofila-a. A biomassa vegetal pode ser aumentada quando há o input de nutrientes de origem antrópica (Braga et al., 2000), podendo assim justificar a biomassa elevada do Rio Jaboatão.

O índice TRIX indicou que o estuário do Rio Jaboatão encontrou-se em estado de hipereutrofização independente do período avaliado. Já o Rio Ipojuca mostrou valores que indicam o estado de eutrofização (Junho) a hipereutrofização (Março), podendo ser justificado pela menor precipitação no mês de março e conseqüentemente com menor fluxo fluvial para o ambiente. Enquanto que os rios Sirinhaém e Formoso apresentaram valores de mesotrófico a eutrófico em março e com características oligotróficas no mês de junho. A figura 7 nos mostra detalhadamente o estado trófico em cada estuário de acordo com o ciclo da maré.

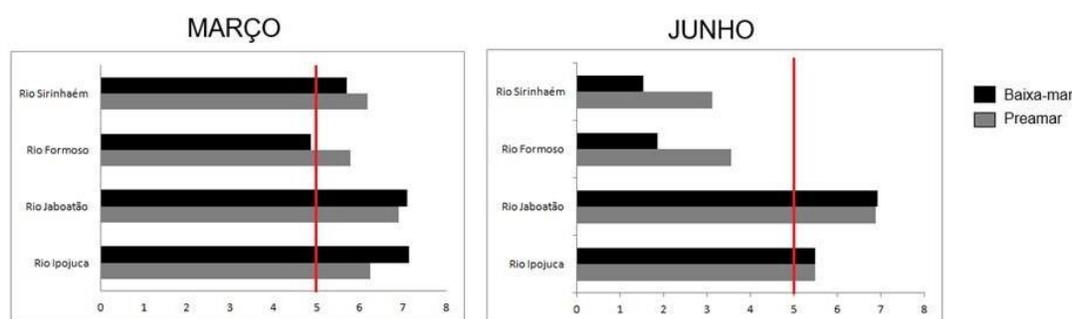


Figura 7. Índice trófico TRIX nos estuários do Rio Jaboatão, Rio Ipojuca, Rio Sirinhaém e Rio Formoso, onde a linha vermelha indica a eutrofização.

Como visto, é possível inferir que os quatro sistemas estuarinos estão sob influência de ações antrópicas, destacando-se os rios Jaboatão, que pela alta densidade populacional em áreas circunvizinhas, o derrame de esgoto urbano, o represamento das águas do rio, problemáticas também evidenciadas por Noriega (2005), elevando o estresse para esses ambientes. Já o rio Ipojuca sofre com o derrame de dejetos agrícolas, urbanos e industriais, e a supressão da desembocadura do complexo estuarino para a construção dos molhes do porto de SUAPE (Batista; Flores-Montes, 2013). Com isso, justifica-se a baixa qualidade da água encontrada nesses estuários, com maior quantitativo de nutrientes e menor oxigenação da água.

Os estuários dos rios Sirinhaém e Formoso estão localizados dentro de áreas de preservação ambiental, mas que mesmo assim, em determinada parte do ano podem apresentar níveis tróficos

elevados e baixa qualidade da água. O índice TRIX diz que a má qualidade da água não é permanente, podemos justificar isso pelos processo de moenda da cana-de-açúcar e o escoamento do vinhoto para as águas dos rios no litoral sul pernambucano, fato que também foi elencado por Gurgel *et al.* (2022), além do derrame de esgoto urbano, mal uso do solo e outras atividades antrópicas vistas na região.

É válido ressaltar que os ambientes vêm sofrendo diferentes impactos antrópicos, e através dos resultados obtidos, é possível associar com elevados teores de matéria orgânica alóctone, ou seja lançados ao longo do rio, e autóctone, pela produção intensificada do fitoplâncton. A correlação entre os parâmetros da água e suas inferências são ainda mais nítidas quando observada a PCA.

Na análise dos componentes principais (PCA) foi possível observar que as duas primeiras componentes juntas (PC1 e PC2) explicaram 59,1% da variância nos resultados observados. Como podemos identificar na figura 8 com os autovetores e na tabela 3 com os autovalores.

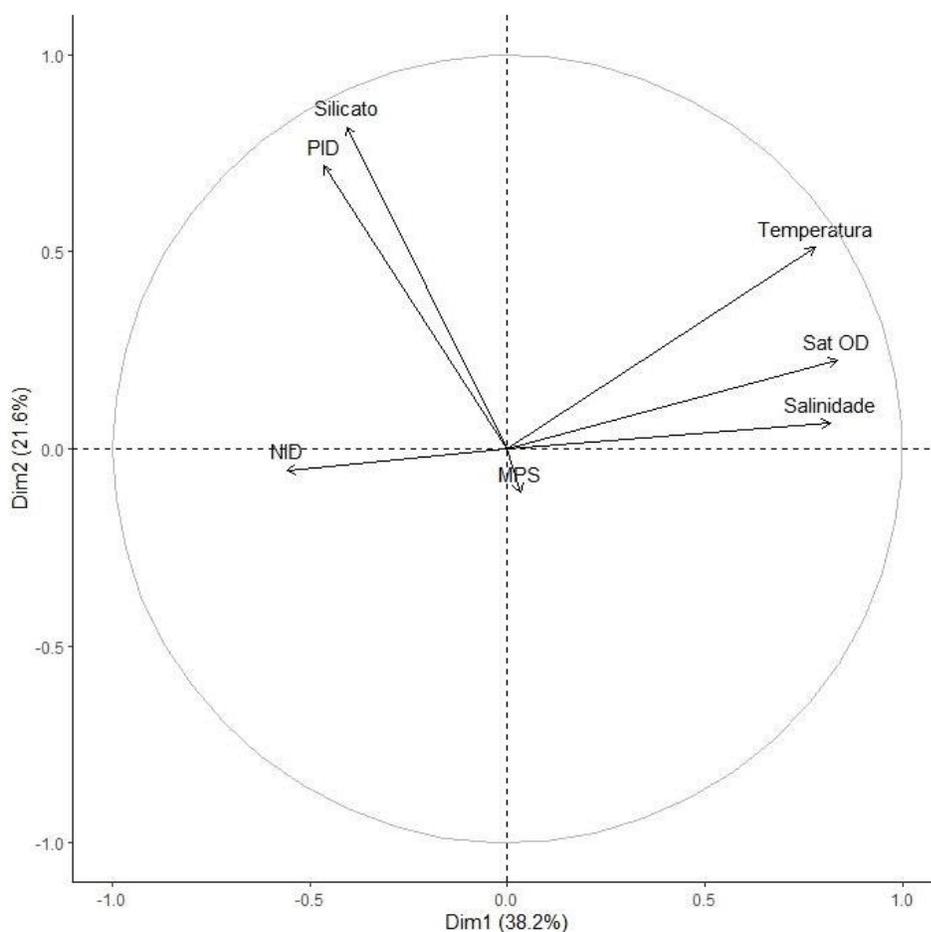


Figura 8. Análise dos componentes principais (PCA).

Tabela 3. Autovalores da análise dos componentes principais (PCA).

	PC1	PC2
Temperatura	0,780	0,511
Salinidade	0,819	0,066
MPS	0,012	-0,074
NID	-0,209	-0,360
Silicato	-0,152	0,540
PID	-0,175	0,474
SAT OD	0,916	0,102

Vemos que parâmetros como a salinidade (0,765), temperatura (0,804) e saturação do OD (0,916), correlacionam-se positivamente, pois quanto mais próximos às regiões das desembocaduras dos sistemas estuarinos, maiores são seus valores. Em contraponto os nutrientes dissolvidos NID, PID e Silicato, mostram que há maiores valores na região interna dos estuários para os nutrientes, semelhantemente observado por Von-Ahn e Filho (2014) e Noriega *et al.* (2005) em estudos em região estuarina, isso indica uma influência de fontes de matéria orgânica tanto de origem natural quanto antrópica, aumentando assim as concentrações dos nutrientes disponíveis no corpo hídrico.

O teste de normalidade shapiro-wilk mostrou que o conjunto de dados não apresenta normalidade, com um $p < 0,05$, por isso, utilizou-se de um teste de correlação não paramétrico, a correlação de Spearman, que corroborou com o que foi observado na PCA. Destaca-se mais uma vez a alta correlação entre os parâmetros Salinidade, temperatura, MPS e Saturação de OD, e a correlação negativa com os nutrientes dissolvidos na coluna de água, primando a correspondência existente entre salinidade e temperatura com os compostos nitrogenados, que foi altamente significativa (Figura 9).

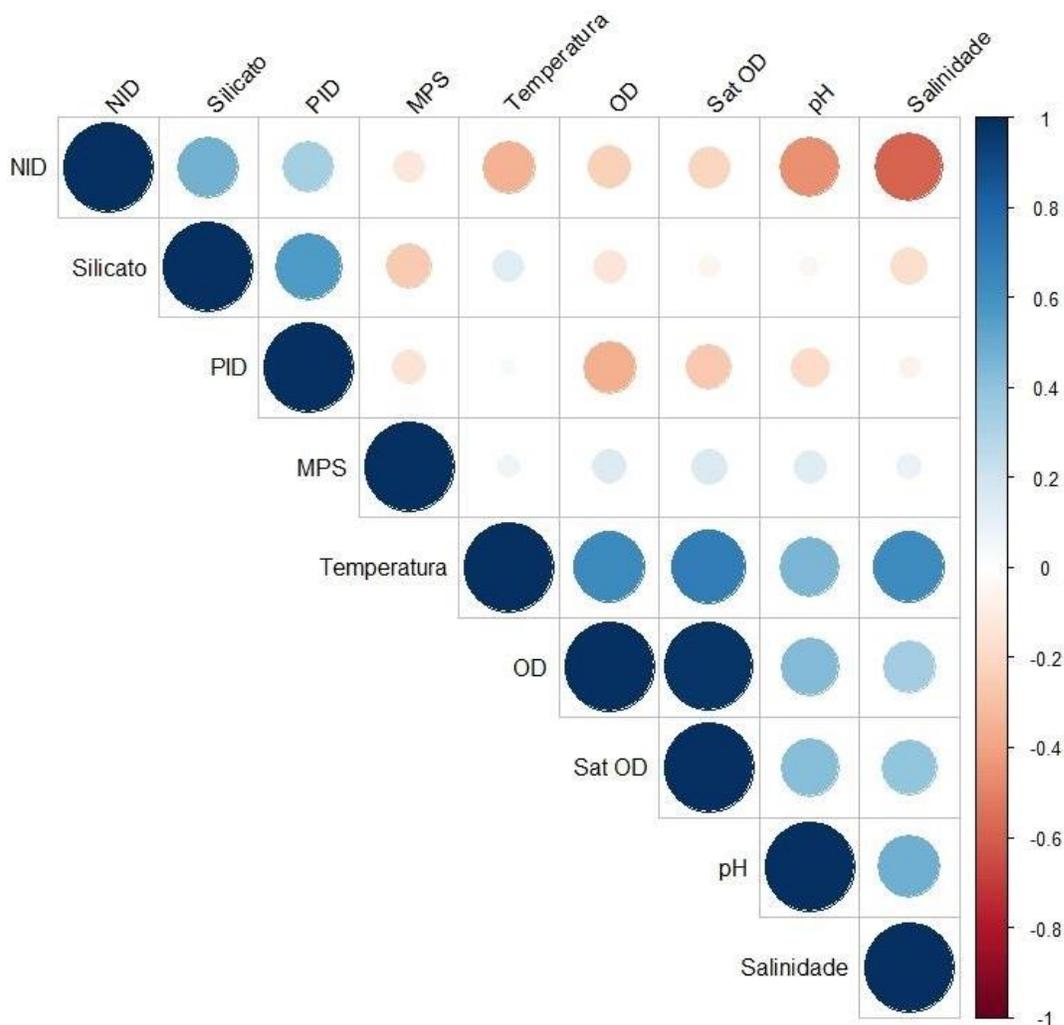


Figure 9. Gráfico de correlação de Spearman.

Conclusão

Nossos resultados destacam diferenças substanciais nos impactos experimentados pelos sistemas estuarinos do Rio Jaboatão e do Rio Ipojuca, contrastando com os Rios Formoso e Sirinhaém, apesar da proximidade geográfica entre eles. Essas diferenças estão intrinsecamente relacionadas à utilização e ocupação do solo, à geomorfologia específica de cada região e à diluição dos efluentes antropogênicos.

No caso do Rio Jaboatão, observa-se que sofre impactos diretos devido à alta densidade populacional que reside nas proximidades de seu sistema estuarino. Por outro lado, o Rio Ipojuca enfrenta impactos ao longo de todo o seu curso, resultantes de atividades industriais, agrícolas e dos resíduos provenientes do esgoto urbano. Ressalta-se que, mesmo os estuários localizados em

áreas de proteção ambiental, como o Rio Sirinhaém e o Rio Formoso, também apresentam pontos de impactos causados por práticas agrícolas, industriais e ecoturismo.

Os resultados obtidos a partir do índice TRIX, juntamente com os valores de referência estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005, indicam que esses estuários, principalmente o Rio Jaboatão e Rio Ipojuca, estão submetidos a processos intensos de eutrofização, tanto de forma contínua quanto intermitente, dependendo da funcionalidade da bacia hidrográfica. Esse processo exerce impactos significativos na flora e fauna estuarina, devido à elevada carga de nutrientes e MPS, resultando em águas com menores teores de oxigênio dissolvido. Isso, por sua vez, evidencia uma considerável presença de matéria orgânica e, conseqüentemente, compromete a qualidade da água nos ambientes analisados.

Agradecimentos

Agradecemos ao projeto Estudos sobre o ciclo do Carbono Inorgânico Dissolvido em áreas costeiras do Nordeste e Norte do Brasil e sua relação com os processos de acidificação oceânica (DICAM), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Laboratório de Oceanografia Química (LOQuim), pelo apoio logístico e financeiro.

Referências

- Andrews, J. E.; Samways, G.; Shimmield, G. B (2008). Historical storage budgets of organic carbon, nutrient and contaminant elements in saltmarsh sediments: Biogeochemical context for managed realignment, Humber Estuary, UK. *Science of The Total Environment*, v. 405, n. 1-3, p. 1-13.
- APAC. Agência Pernambucana da Água e do Clima. Disponível em: <<https://www.apac-homo.pe.gov.br/climatologia/519-climatologia>>. (Acesso em: 21 nov. 2021).
- Araújo, V. S. de, Santos, J. P. dos, & Araújo, A. L. C. (2007). MONITORAMENTO DAS ÁGUAS DO RIO MOSSORÓ/RN, NO PERÍODO DE ABRIL/2005 A JULHO/2006. *HOLOS*, 1, 4-41. <https://doi.org/10.15628/holos.2007.4>
- Araújo, L. S.; Mafalda Jr., P. O.; Moreira, I. T. A (2018). Avaliação de HPAs nos manguezais dos Estuários dos Rios São Paulo e Jaguaripe, Bahia de Todos os Santos, Bahia. *Rev. Bras. Gest. Amb. Sustent.* [online]. v. 5, n. 10, p. 599-606. ISSN 2359-1412. DOI: 10.21438/rbgas.051014. (Acesso em: 2023-28-12).

- Azevedo, A.C.D.; Feitosa, F.A.N.; Koenig, N. L. (2008), Distribuição espacial e temporal da biomassa fitoplanctônica e variáveis ambientais no Golfão Maranhense, Brasil. *Acta bot. bras.* v. 22, p. 870 - 877.
- Barreto, L., Barros, F., Bonomo, P., Rocha, F., & Amorim, J. (2013), Eutrofização em rios brasileiros. *Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia*, v.9, N.16; p. 2165.
- Bastos, A.T.C.C. (2014), Estudo do ciclo biogeoquímico do silício em diferentes sistemas marinhos como ferramenta para identificação de alterações ambientais de origem natural e/ou antrópica. 2014. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Química) - Instituto Oceanográfico, University of São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/D.21.2014.tde-06012015-162251. (Acesso em: 2023-09-21).
- Batista, T.N.F.; Flores-Montes, M.J. ESTADO TRÓFICO DOS ESTUÁRIOS DOS RIOS IPOJUCA E MEREPE – PE (2014). *Tropical Oceanography, Recife*, v. 42, n. especial, p. 22-30.
- Baumgarten, M.G.Z.; Wallner-Kersanach, M.; Niencheski, L.F.H. (1996). *Manual de Análises em Oceanografia Química*, Rio Grande: Ed. FURG, 132p.
- Bower, C. E.; Holm-Hansen, T. (1980), A salicylate-hypochlorite method for determining ammonia in seawater. *Can J. Fish. Aquat. Sci.* v. 37, p. 794-798.
- Braga, E.S.; Bonetti, C.V.D.H.; Burone, L. & Bonetti Filho, J (2000). Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the Baixada Santista estuarine system - Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, V. 40, ed. 2, páginas 165-173.
- Carmouze, J. P (1994). *O metabolismo dos ecossistemas aquáticos: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas*. Editora Edgard Blücher e FAPESP, São Paulo. P. 254.
- Collischonn, W.; Dornelles, F (2013). *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 1. 350 p.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Alterado pela Resolução CONAMA 397/2008. Disponível em: (Acesso em: 10 out. 2021).
- Deng, K.; Lin, Y.; Ning, H.; Liu, W.; Singh, A.; Zhang, G. (2018). Influences of temperature and pressure on CO₂ solubility in saline solutions in simulated oil and gas well environments. *Applied Geochemistry*, v. 99, p. 22–30.

- Eschrique, S. A. (2011), Estudo do Balanço Biogeoquímico dos Nutrientes Dissolvidos Principais como Indicador da Influência Antrópica em Sistemas Estuarinos do Norte e Sudeste do Brasil. 231 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ESTUARINE ECOLOGY. In: Day Jr., John W.; Ya´nez-Arancibia, A.; Kemp, W. Michael; Crump, Byron C (2012), Introduction To Estuarine Ecology. New York, John Wiley & Sons.
- Fraser, T. H.; Wilcox, W. H. Enrichment of a Subtropical Estuary with Nitrogen, Phosphorus and Silica. (1981) Em: NEILSON, B. J.; CRONIN, L. E. (Eds.). Estuaries and Nutrients. Contemporary Issues in Science and Society. Totowa, NJ: Humana Press, p. 481–498.
- García-Robledo, E.; Corzo, A.; Papaspyrou, S. (2014), A fast and direct spectrophotometric method for the sequential determination of nitrate and nitrite at low concentrations in small volumes. *Marine Chemistry*, v. 162, p. 30-36.
- Gaspar, F.L. (2009), Análise de concentração de fósforo em sedimentos nos estuários dos rios Botafogo e Carrapicho, no sistema estuarino do canal de Santa Cruz, Itamaracá/PE. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Genz, F.; Lessa, G. C.; Cirano, M. (2008), Vazão mínima para estuários: um estudo de caso no rio Paraguaçu (BA). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, pág. 73-82.
- Grasshoff, K., Ehrhardt M., Kremling, K. (1983), *Methods of seawater analysis*, 2ed. Verlag Chemie, Weinheim. v. 1, 419p.
- Hannas, B. R., Das, P. C., Li, H.; Leblanc, G. A.(2010). Intracellular conversion of environmental nitrate and nitrite to nitric oxide with resulting developmental toxicity to the crustacean *Daphnia magna*. *PLoS One*, v. 5, n. 8. p. e12453.
- Lima, N. G. B. De; Galvani, E. (2018). Interação dos atributos climáticos nos manguezais do litoral sul de São Paulo e sua relação com os controles climáticos. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia*, n. 36, p. 26.
- Marins, R. V.; Paula Filho, F. J.; Eschrique, S. A.; Lacerda, L. D. (2011). Anthropogenic sources and distribution of phosphorus in sediments from the Jaguaribe River estuary, NE, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, v. 71, p. 673–678.
- Nanni, H. C.; Nanni, S. M.(2005). Preservação dos manguezais e seus reflexos. XII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 7 a 9 nov.

- Noriega, C. D.; Costa, K. M. P.; Feitosa, F. A. N.; Flores-Montes, M. J.; Grego, C. K. S.; Soares, G. S. S.; Silva, H. P. (2005). Distribuição espacial da biomassa fitoplanctônica e sua relação com os sais nutrientes, no sistema estuarino de barra das jangadas (Pernambuco – Brasil). *Arq. Ciên. Mar, Fortaleza*, v. 38, p. 5 - 18.
- Noriega, C.; Araújo, M.; Flores-Montes, M. J.; Araújo, J. (2019). Trophic dynamics (Dissolved Inorganic Nitrogen-DIN and Dissolved Inorganic Phosphorus-DIP) in tropical urban estuarine systems during periods of high and low river discharge rates. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 91, p. e20180244.
- Proum, S.; Santos, J.H.; Lim, L.H.; Marshall, D.J. (2018). Tidal and seasonal variation in carbonate chemistry, pH and salinity for a mineral-acidified tropical estuarine system. *Reg. Stud. Mar. Scien.*, 17, 17–27.
- Rezende, C. E.; Andrade, L.; Suzuki, M. S.; Faro, B. C. M. T. ; Paranhos, R. (2006). Hidroquímica. In: Valentin J.L. (Ed) Características hidrobiológicas da região central da Zona Econômica Exclusiva brasileira (Salvador, BA, ao cabo de São Tomé, RJ). Jean Louis Valentin, organizador. Brasília: Ideal Gráfica e Editora. p. 31 – 60 (Série Documentos REVIZEE/SCORE Central).
- Rocha, G. P.; Evangelista, A. R. ; Paiva, P. C.; Freitas, R. T. F.; Souza, A. F.; Garcia, R. (2001). Digestibilidade e conteúdo de fibra de três gramíneas do gênero *Cynodon*. *Ciênc. agrotec.*, v. 25, n. 2, p. 396-407.
- Sá, A. K. D. S.; Cutrim, M. V. J.; Costa, D. S.; Cavalcanti, L. F.; Ferreira, F. S.,Oliveira, A. L. L.; Serejo, J. H. F. (2021) Algal blooms and trophic state in a tropical estuary blocked by a dam (northeastern Brazil). *Ocean and Coastal Research*, v. 69, p. e21009.
- SANTOS, A.S. (2013). Influência da maré e da sazonalidade na distribuição dos parâmetros abióticos e clorofila a do estuário de Guajará-Mirim Vigia Nordeste Paraense. Dissertação de Mestrado apresentado ao programa de pós-graduação em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais da Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém.
- Schettini, C.A.F.; Miranda, J.B.; Valle-Levinson, A.; Truccolo, E.C.; Domingues, E.C. (2016). The circulation of the lower Capibaribe Estuary (Brazil) and its implications for the transport of scalars. *BRAZ. J. OCEAN.*, 64(3):263-276
- Schettini, C.A.F.; Paiva, B.P.; Batista, R.A.L.; Oliveira Filho, J.C.; Truccolo, E.C. (2016). Observation of an Estuarine Turbidity Maximum in the Highly Impacted Capibaribe Estuary, Brazil. *BRAZ. J. OCEAN.*, v. 64(2), p. 185-190.

- TAILLARDAT, P.; Marchand, C.; Friess, D. A.; Widory, D.; David, F.; Nobuhito, O.; Nakamura, T.; Van Vinh, T.; Thanh-Nho, N.; Ziegler, A. D. (2020). Respective contribution of urban wastewater and mangroves on nutrient dynamics in a tropical estuary during the monsoon season. Elsevier: *Marine Pollution Bulletin*, v. 160, n. 111652.
- Vollenweider, R. A.; Giovanardi, F.; Montanari, G.; Rinaldi, A. (1998). Characterization of the trophic conditions of Marine Coastal Waters with Special Reference in the NW Adriatic Sea: Proposal for a Trophic Scale, Turbidity and Generalized Water Quality Index. *Environmenties*, v. 9, p. 561-570.
- Von-Ahn, C. M. E.; Filho, J.P. (2015). Diagnóstico da qualidade de água ao longo do estuário do rio Itajaí-Açu, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 20 no .2 p. 331 - 342.
- Wu, J.-T.; Chou, T.-L. (2003). Silicate as the limiting nutrient for phytoplankton in a subtropical eutrophic estuary of Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 58, p. 155-162.
- Yin, K.; Lin, Z.; Ke, Z. (2004). Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters. *Continental Shelf Research, Pearl River Estuary Study*. v. 24, n. 16, p. 1935-1948.