



CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

Análise de metais e avaliação da citogenotoxicidade da água do Delta do Rio Jacuí, Rio Grande do Sul

Metal analysis and cytogenotoxicity assessment of the Jacuí River Delta water, Rio Grande do Sul

Luciano Basso da Silva¹, Daniele de Souza Barbosa Fogaça Reis², Davi da Cunha Morales³, Simone Caterina Kapusta⁴, Juliana Schmitt de Nonohay⁵

RESUMO

O Delta do Rio Jacuí é impactado por atividades industriais, urbanas e agrícolas. Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar a presença de metais e a citogenotoxicidade da água em dois pontos do Delta do Jacuí. Amostras de água foram coletadas, em dois períodos diferentes, em dois pontos localizados na Ilha do Pavão. Os metais analisados foram alumínio, cádmio, chumbo, cobre, cromo total, manganês, níquel e zinco. A citogenotoxicidade foi avaliada em células de raízes de *Allium cepa*, após exposição dos bulbos às amostras de água e ao controle negativo, por 48h. Os metais detectados foram alumínio e cádmio em concentrações acima do limite e zinco em acordo com a legislação. Índice mitótico e frequência de micronúcleos nas células de cebola não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Foi observado aumento significativo na frequência de anormalidades cromossômicas nas cebolas expostas a uma das amostras de água. Os resultados sugerem contaminação permanente da água por alumínio, variação temporal para cádmio e variação espacial para zinco, bem como variação espaço-temporal na contaminação genotóxica da água do Delta do Jacuí na região da Ilha do Pavão.

Palavras-chave: Qualidade da água; bioensaios; ecotoxicologia.

ABSTRACT

*The Jacuí River Delta is impacted by industrial, urban, and agricultural activities. In this context, the objective of this study was to evaluate the presence of metals and the cytogenotoxicity of water at two points in the Jacuí Delta. Water samples were collected, in two different periods, at two points located in Ilha do Pavão. Analyzed metals were aluminum, cadmium, lead, copper, total chromium, manganese, nickel, and zinc. Cytogenotoxicity was evaluated in *Allium cepa* root cells, after exposing the bulbs to water samples and negative control, for 48 hours. Metals*

¹ E-mail: lucianosilva@feevale.br

² E-mail: danidsbfr@gmail.com

³ E-mail: davicunhamorales@gmail.com

⁴ E-mail: simone.kapusta@poa.ifrs.edu.br

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS, Campus Porto Alegre/RS – Brasil. E-mail: juliana.nonohay@poa.ifrs.edu.br



detected were aluminum and cadmium in concentrations above the limit, and zinc in conformity with legislation. Mitotic index and frequency of micronuclei in onion cells showed no significant differences between treatments. A significant increase in the frequency of chromosomal abnormalities was observed in onions exposed to one of the water samples. Results suggest permanent contamination of water by aluminum, temporal variation for cadmium and spatial variation for zinc, as well as spatio-temporal variation in the genotoxic contamination of water in the Delta do Jacuí in the region of Ilha do Pavão.

Keywords: Water quality; bioassays; ecotoxicology.

1. INTRODUÇÃO

As atividades humanas ao longo dos corpos d'água levam ao lançamento de diversos poluentes, como agrotóxicos, metais, medicamentos e matéria orgânica. (RAMBO *et al.*, 2017). Entre estes contaminantes, os metais apresentam lenta degradação em condições naturais, alto potencial de bioacumulação, biomagnificação e toxicidade nas cadeias alimentares. (TANG *et al.*, 2013). A contaminação de ecossistemas aquáticos com metais contribui para a deterioração da qualidade da água e coloca em risco a vida aquática e o ecossistema. (BENSON *et al.*, 2018). Portanto, há a necessidade de monitorar, avaliar seus efeitos e fornecer soluções para a melhoria da qualidade da água. (KAUR *et al.*, 2021).

O dano ao DNA é um efeito comum de muitos poluentes ambientais (CHATTERJEE *et al.*, 2017), incluindo os metais. (MATOS *et al.*, 2017). Os biomarcadores de genotoxicidade detectam estes danos ao DNA, os quais são fator de risco inicial na geração de efeitos carcinogênicos, bem como de defeitos de desenvolvimento e reprodutivos nos organismos. (OHE *et al.*, 2004).

Considerando as interações entre misturas químicas complexas presentes nos ambientes aquáticos, as análises convencionais de parâmetros físico-químicos da água não permitem a avaliação de efeitos e riscos à biota. (SILVEIRA *et al.*, 2017). Assim, estudos integrando parâmetros de qualidade da água e bioensaios são fundamentais na avaliação da qualidade da água. As plantas podem apresentar os efeitos tóxicos de contaminantes, mesmo em concentrações muito baixas, e a espécie *Allium cepa* (cebola comum) tem sido amplamente utilizada em estudos de citogenotoxicidade, nos quais são avaliados danos cromossômicos (efeito genotóxico) e distúrbios no ciclo mitótico (efeito citotóxico) induzidos por poluentes. (LEME; MARIN-MORALES, 2009; PAPA *et al.*, 2016).

A Região Hidrográfica do Guaíba, no Estado do Rio Grande do Sul (RS), abrange o território, parcial ou total, de 251 municípios e compreende as bacias que são drenadas para o Lago Guaíba. Sua área é de aproximadamente 85 mil km² e a população estimada em 5,9 milhões de pessoas, o que corresponde a cerca de, respectivamente, 30% da área e 60% da população do RS. Situada na porção nordeste do Estado, essa região hidrográfica é constituída pelas bacias do Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim, Baixo Jacuí, Pardo, Taquari-Antas, Caí, Sinos, Gravataí e Lago Guaíba. (FEPAM, 2020).



As águas dos rios Gravataí, Sinos, Caí e Jacuí desembocam no Delta do Jacuí, formando o Lago Guaíba. (FEPAM, 2022). O Parque Estadual Delta do Jacuí (PEDJ) é uma Unidade de Conservação de proteção integral, que foi criada em 1976, abrangendo áreas da capital Porto Alegre, bem como de sua região metropolitana. Em 2005 foi criada a Área de Proteção Ambiental Estadual Delta do Jacuí (APAEDJ), englobando o Parque Estadual Delta do Jacuí em seus limites. Os ambientes protegidos da APAEDJ são relevantes para a conservação da flora e fauna, incluindo espécies raras, endêmicas e ameaçadas, e representam oportunidades de lazer, recreação, educação e pesquisa científica. (SEMA, 2022). Os principais impactos ambientais se devem aos lançamentos de esgotos e efluentes industriais, principalmente dos ramos de metalurgia, celulose e produtos alimentares. (FEPAM, 2022).

Alguns estudos evidenciaram a contaminação no Lago Guaíba, por meio da análise da presença de vírus e coliformes na água (MAURER *et al.*, 2015), danos no DNA de moluscos (VILELLA *et al.*, 2007) e em mosca das frutas (DO AMARAL *et al.*, 2006). Com relação às análises químicas, De Andrade *et al.* (2019) observaram altas concentrações de Zn, Cu, Cr, e Ni no sedimento do Lago Guaíba e atribuem estes resultados a atividades industriais, despejo de esgoto e intenso tráfego de veículos. Perin *et al.* (2021) detectaram a presença de 15 produtos farmacêuticos e 25 agrotóxicos em amostras de água do Lago Guaíba, evidenciado a contaminação urbana e rural. No Delta do Jacuí, De Andrade *et al.* (2018) observaram que a contaminação por metais (como Zn, Cu, Pb, Cr, Ni e Hg), no sedimento dos rios Caí, Sinos e Gravataí, afeta negativamente a qualidade ambiental do Canal Navegantes (localizado no Delta do Jacuí) e do Lago Guaíba. Considerando a importância do Delta do Jacuí, este ecossistema carece de estudos ecotoxicológicos que identifiquem os possíveis efeitos da contaminação aquática sobre os organismos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a presença de metais e a citogenotoxicidade da água, em dois pontos do Delta do Rio Jacuí.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O Parque Estadual Delta do Jacuí é uma área protegida localizada na região centro-leste do estado do Rio Grande do Sul (29°53', 30°03' S; 51°28', 51°13' W) e tem uma área superior a 21.000 hectares, incluindo terras continentais e 30 ilhas. (OLIVEIRA, 2002). As coletas foram realizadas na Ilha do Pavão, por possuir uma de suas margens em contato com o Canal Navegantes (Figura 1A), sendo selecionados dois pontos em margens opostas da ilha (Figura 1B). O Ponto 1 está localizado na margem da ilha voltada para o Canal Navegantes, o qual sofre influência direta do rio Gravataí, do transporte fluvial de cargas e da urbanização intensa de Porto Alegre. A margem da ilha onde está localizado o Ponto 2 sofre maior contribuição das águas do rio Jacuí, possui pouco movimento de barcos e é utilizada para recreação e atividades esportivas.



Figura 1 – A. Delta do Rio Jacuí mostrando os principais afluentes e a ilha do Pavão, onde foram realizadas as coletas de água.
B. Localização dos pontos de coleta na Ilha do Pavão.



Fonte: Modificado de Google Maps.

2.1. COLETAS DE ÁGUA E ANÁLISE DE METAIS

Amostras de água dos dois pontos foram coletadas em garrafas de vidro esterilizadas, nos meses de julho e novembro de 2018, armazenadas em recipiente térmico e transportadas para os laboratórios para a realização dos bioensaios com cebola e análise de metais.

As análises dos metais foram realizadas de acordo com as metodologias descritas em *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), em uma Central Analítica certificada pela FEPAM. Os metais analisados e os respectivos limites de quantificação (em mg/L) foram: alumínio (0,823), cádmio (0,004), chumbo (0,102), cobre (0,013), cromo total (0,182), manganês (0,059), níquel (0,031) e zinco (0,01).

2.2. BIOENSAIOS COM CEBOLAS

Bulbos pequenos de *A. cepa* foram adquiridos comercialmente. Primeiramente, as cebolas foram lavadas, as raízes secas foram retiradas e o meristema radicular foi submerso, durante 24h, em um recipiente contendo aproximadamente 50mL de água de abastecimento público, para estimular o crescimento de raízes. Após este período, sete bulbos de cebola foram expostos para cada amostra de água, durante 48h. Além disso, manteve-se um grupo controle negativo tratado com água de abastecimento público.



Após a exposição, de 8 a 10 raízes foram removidas de cada bulbo e fixadas em solução etanol:ácido acético (3:1, v/v) em microtubos, sendo mantidas a 4°C por 24 horas. Posteriormente estas raízes foram lavadas em água destilada, transferidas para microtubos contendo etanol 70% e armazenadas em geladeira até a confecção das lâminas. Foram preparadas sete lâminas para cada tratamento, uma para cada bulbo de cebola. Para a preparação das lâminas foram utilizadas as pontas de duas raízes de cada bulbo, as quais foram lavadas em água destilada e submetidas à hidrólise ácida com solução de ácido clorídrico (HCl) 5N, durante 15 minutos em temperatura ambiente. Após, foram novamente lavadas em água destilada, coradas com solução deorceína acética 1%, durante 15 minutos em lâminas de microscopia, com posterior esmagamento.

As lâminas foram analisadas sob microscopia de luz para parâmetros citogenéticos de citotoxicidade e genotoxicidade. O índice mitótico (IM) foi determinado para avaliar o efeito citotóxico e foi calculado como o número de células em divisão encontrado em 1.000 células analisadas. Para avaliar a genotoxicidade, para cada bulbo de cebola foram analisadas cerca de 200 células em anáfase-telófase, para determinar a frequência de anormalidades cromossômicas (AN), como pontes e quebras cromossômicas e cromossomos retardatários. O segundo parâmetro de genotoxicidade foi a frequência de micronúcleos (MN), estimada a partir da análise de 1.000 células interfásicas para cada bulbo. Todas as lâminas foram codificadas e examinadas em teste cego por dois observadores treinados.

2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O Teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para avaliar a distribuição normal dos resultados dos bioensaios com *A. cepa*, e o teste de Levene foi usado para analisar a homogeneidade de variâncias. Para realizar comparações do índice mitótico e da frequência de anormalidades cromossômicas, entre as amostras de água dos pontos de coleta e do grupo controle, foi utilizada a análise de variância (ANOVA), seguida do Teste de Tukey quando apropriado. A frequência de micronúcleos foi comparada por meio do Teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn. Os testes foram realizados no *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) 24.0, considerando um nível de significância de $p \leq 0,05$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da análise de metais nas amostras de água. Dos sete metais analisados, somente alumínio, cádmio e zinco foram detectados. Nos dois pontos e nos dois períodos de coleta as concentrações de alumínio estavam acima do permitido pela legislação brasileira. Cádmio foi detectado nos dois pontos da Ilha do Pavão somente na coleta de novembro e com valores acima do permitido. Zinco foi detectado nas duas coletas somente no Ponto 1, com valores abaixo do limite.



Tabela 1 – Resultados da análise de metais em amostras de água de dois pontos da Ilha do Pavão coletadas em julho e novembro de 2018.

Metal (mg/L)	Ponto 1 (julho)	Ponto 2 (julho)	Ponto 1 (novembro)	Ponto 2 (novembro)	CONAMA* (Classe 1)
Alumínio	1,111	1	1,627	1,567	0,1
Cádmio	< LQ	< LQ	0,005	0,006	0,001
Chumbo	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,01
Cobre	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,009
Cromo Total	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,05
Manganês	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,1
Níquel	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,025
Zinco	0,016	< LQ	0,014	< LQ	0,18

< LQ - valor inferior ao limite de quantificação do método utilizado.

* Limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces de Classe 1.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os metais são descartados nos ecossistemas devido a diversas atividades humanas e a poluição por metais está se tornando um problema ambiental em nível global devido aos seus efeitos adversos. (DEBNATH *et al.*, 2021). No presente estudo, chumbo, cobre, cromo total, manganês e níquel não foram detectados em amostras de água destes dois pontos do Delta do Rio Jacuí e zinco foi encontrado abaixo do limite legal (para águas doces de Classe 1, as quais podem ser destinadas à proteção das comunidades aquáticas; BRASIL, 2005), o que pode ser considerado um resultado positivo. Entretanto, as concentrações de alumínio e cádmio estavam acima do permitido, indicando risco para a biota aquática. Cabe destacar que na área de estudo, a Classe atual é 4 e que, conforme o Enquadramento aprovado pela Resolução nº 50 de 2008 do Conselho de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul, pretende-se que essa área passe para Classe 3 (RIO GRANDE DO SUL, 2008) em um prazo de 10 anos. (RIO GRANDE DO SUL, 2017). Se forem considerados os limites para a Classe 3, somente alumínio se encontra acima do permitido no presente estudo. Os metais, quando em excesso, podem causar mutagenicidade, carcinogenicidade e efeitos letais para plantas, animais e seres humanos. (SINGH *et al.*, 2014). Além disso, a presença de metais em amostras ambientais acima do permitido pelos órgãos reguladores ambientais é um forte indicador da emissão de poluentes por atividades antropogênicas (MENDIGUCHIA *et al.*, 2007), principalmente de fontes industriais e agrícolas. (DIXIT *et al.*, 2015).

O fato de zinco ter sido detectado somente no Ponto 1 indica que os locais estudados possuem fontes de contaminação diferentes. O Ponto 1, localizado no Canal Navegantes, além de sofrer influência mais direta do rio Gravataí, é mais afetado pelo transporte fluvial de cargas e por efluentes urbanos de Porto Alegre do que o Ponto 2. Variação espacial na contaminação pode ocorrer devido a diferenças nas fontes pontuais e difusas de descargas industriais, agrícolas e urbanas bem como na capacidade de diluição e autodepuração. (BACHETTI *et al.*, 2021). A presença de cádmio em ambos os pontos e somente na coleta de novembro sugere variação



temporal na contaminação das águas do Delta do Jacuí. Variação temporal pode ser causada principalmente por fontes difusas, como escoamento superficial de áreas urbanas e agrícolas. (FU *et al.*, 2020). A presença de alumínio acima do limite em ambos os pontos e nos dois períodos de coleta pode ser indicativo de presença de fontes permanentes de contaminação deste metal (KHAN *et al.*, 2017), o que deve ser esclarecido em estudos futuros.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados das análises citogenéticas realizadas nas células das raízes de cebola. Os valores de índice mitótico e frequência de micronúcleos observados nas cebolas expostas às amostras de água do Delta do Jacuí não foram significativamente diferentes do grupo controle negativo, em ambos os períodos de coleta. Para a frequência de anormalidades cromossômicas não foram observadas diferenças significativas na coleta de julho, entretanto, em novembro o Ponto 2 apresentou frequência significativamente maior do que o Ponto 1 e o grupo controle.

Tabela 2 – Índice mitótico (IM em %), frequência de micronúcleos (MN por 1.000 células) e frequência de anormalidades cromossômicas (AC em %) observados em células de raízes de *A. cepa* do grupo controle e após exposição a amostras de água dos dois pontos do Delta do Rio Jacuí. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão.

Período de coleta	Tratamento	IM	MN	AC
Julho	Controle	11,83 \pm 1,82	0 \pm 0	6,24 \pm 3,69
	Ponto 1	10,26 \pm 1,46	0,29 \pm 0,49	16,14 \pm 13,29
	Ponto 2	11,47 \pm 3,11	1,29 \pm 2,36	11,19 \pm 9,84
	p*	0,41	0,22	0,17
Novembro	Controle	10,29 \pm 2,15	0 \pm 0	3,57 \pm 2,76 ^a
	Ponto 1	10,94 \pm 2,52	0,14 \pm 0,38	4,38 \pm 2,23 ^a
	Ponto 2	11,83 \pm 2,50	0,71 \pm 1,25	8,29 \pm 2,78 ^b
	p*	0,49	0,2	0,007

* Valor p da ANOVA; quando $p \leq 0,05$ as médias com letras minúsculas diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos no mesmo período de coleta.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os bioensaios são capazes de caracterizar os efeitos de contaminantes ambientais causados por exposição crônica e/ou aguda, sem o conhecimento prévio dos componentes químicos presentes na água. (OHE *et al.*, 2004). Nos bioensaios com cebola, a redução significativa do índice mitótico nas raízes indica citotoxicidade (LEME; MARIN-MORALES, 2009), a qual não foi observada no presente estudo. Da mesma forma, as amostras de água não induziram aumento nas frequências de micronúcleos, indicando ausência de genotoxicidade. (LEME; MARIN-MORALES, 2009; PATHIRATNE *et al.* 2015). Porém, para o segundo parâmetro de genotoxicidade estudado houve diferenças significativa. Na coleta de novembro a frequência de anormalidades cromossômicas (AC) observada no Ponto 2 foi significativamente maior do que no Ponto 1 e grupo controle. As AC são caracterizadas por alterações na



estrutura cromossômica ou no número total de cromossomos que podem ocorrer tanto espontaneamente quanto como resultado da exposição a agentes físicos ou químicos. (LEME; MARIN-MORALES, 2009; PATHIRATNE *et al.*, 2015; PAPA *et al.*, 2016). As diferenças de padrões de resposta observadas entre micronúcleos e anormalidades cromossômicas podem ser devido às defasagens de tempo associadas aos diferentes mecanismos desses danos citogenéticos. (DUSMAN *et al.*, 2014).

O estudo de AC em células do meristema apical da raiz de *A. cepa* é aceito pelo Programa Internacional de Bioensaios de Plantas para monitoramento ou teste de genotoxicidade de poluentes ambientais. (STOYANOV *et al.*, 2018). Portanto, as diferenças de resultados para AC observadas no presente estudo, tanto entre períodos como entre pontos de coleta, indicam variação espaço-temporal de contaminantes genotóxicos na água do Delta do Jacuí. Este tipo de variação na genotoxicidade também foi observado em outros locais. (GOSWAMI *et al.*, 2016; FALCÃO *et al.*, 2020). Danos no DNA da biota aquática podem estar associados à redução do crescimento, desenvolvimento anormal, carcinogênese e diminuição da sobrevivência. (LEE; STEINERT, 2003).

4. CONCLUSÕES

Considerando a qualidade da água do Delta do Jacuí na área do entorno da Ilha do Pavão, os resultados do presente estudo sugerem contaminação permanente da água por alumínio, variação temporal da contaminação por cádmio e variação espacial para a presença de zinco. Além disso, foi observada variação espaço-temporal na poluição de contaminantes genotóxicos. Apesar do pequeno número de amostras analisadas e da área restrita do Delta do Jacuí que foi estudada, os resultados servem de alerta para a necessidade de monitoramento da qualidade da água e de estudos ecotoxicológicos nessa importante Área de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul.

Apesar de o presente estudo ter avaliado a presença de metais, dado o grande número de compostos presentes na água, nenhum poluente individual ou grupo de contaminantes poderia explicar a toxicidade observada. (MEADOR *et al.*, 2018). A genotoxicidade observada é o efeito conjunto de uma mistura química complexa, na qual os contaminantes podem ter efeitos antagônicos, neutros ou sinérgicos; mas pouco se sabe sobre seus efeitos conjuntos. (ARISTI *et al.*, 2016). Assim, os bioensaios podem detectar os efeitos da mistura de todos os produtos químicos ativos em uma amostra, incluindo produtos de transformação e produtos químicos desconhecidos. (NEALE *et al.*, 2020; GOLOVKO *et al.*, 2021).

5. REFERÊNCIAS

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Edited by E. W. Rice, R. B. Baird, A. Washington: American Public Health Association, 2012.



- ARISTI, I.; CASELLAS, M.; ELOSEGI, A.; INSA, S.; PETROVIC, M.; SABATER, S.; ACUÑA, V. Nutrients versus emerging contaminants-Or a dynamic match between subsidy and stress effects on stream biofilms. **Environmental Pollution**, v.212, p.208-215, 2016.
- BENSON, N. U.; ADEAPO, A. E.; FRED-AHMADU, O. H.; WILLIAMS, A. B.; UDOSEN, E. D.; AYEJUYO, O. O.; OLAJIRE, A. A. New ecological risk indices for evaluating heavy metals contamination in aquatic sediment: a case study of the Gulf of Guinea. **Regional Studies in Marine Science**, v.18, p.44-56, 2018.
- BACHETTI, R. A.; URSELER, N.; MORGANTE, V.; DAMILANO, G.; PORPORATTO, C.; AGOSTINI, E.; MORGANTE, C. Monitoring of atrazine pollution and its spatial-seasonal variation on surface water sources of an agricultural river basin. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.106, n.6, p.929-935, 2021.
- BRASIL. **Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005**. Brasília: Conselho Nacional de Meio Ambiente, 2005.
- CHATTERJEE, N.; WALKER, G. C. Mechanisms of DNA damage, repair, and mutagenesis. **Environmental and Molecular Mutagenesis**, v.58, n.5, p.235-263, 2017.
- DEBNATH, A.; SINGH, P. K.; CHANDRA SHARMA, Y. Metallic contamination of global river sediments and latest developments for their remediation. **Journal of Environmental Management**, v.298, p.113378, 2021.
- DE ANDRADE, L. C.; COELHO, F. F.; HASSAN, S. M.; MORRIS, L. A.; DE OLIVEIRA CAMARGO, F. A. Sediment pollution in an urban water supply lake in southern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.191, n.1, p.12, 2019.
- DE ANDRADE, L. C.; ANDRADE, R. R.; CAMARGO, F. A. O. The historical influence of tributaries on the water and sediment of Jacuí's Delta, Southern Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v.13, n.2, 2018.
- DIXIT, R.; MALAVIYA, D.; PANDIYAN, K.; SINGH, U. B.; SAHU, A.; SHUKLA, R.; PAUL, D. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. **Sustainability**, v.7, p.2189-2212, 2015.
- DO AMARAL, V. S.; SINIGAGLIA, M.; REGULY, M. L.; DE ANDRADE, H. H. Genetic toxicity in surface water from Guaíba Hydrographic Region under the influence of industrial, urban and agricultural sewage in the Drosophila wing-spot test. **Environmental Pollution**, v.139, n.3, p.469-76, 2006.
- DUSMAN, E.; LUZZA, M.; SAVEGNAGO, L.; LAUXEN, D.; VICENTINI, V. E. P.; TONIAL, I. V.; SAUER, T. P. *Allium cepa* L. as a bioindicator to measure cytotoxicity of surface water of the Quatorze River, located in Francisco Beltrão, Paraná, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.186, n.3, p. 1793-1800, 2014.
- FALCÃO, C. B. R.; PINHEIRO, M. A. A.; TORRES, R. A.; ADAM, M. L. Spatial-temporal genome damaging in the blue crab *Cardisoma guanhumi* as ecological indicators for monitoring tropical estuaries. **Marine Pollution Bulletin**, v.156, p.111232, 2020.



FEPAM. **Qualidade ambiental:** região hidrográfica do Guaíba. Porto Alegre: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler – RS, 2022a.

FEPAM. **Relatório da qualidade da água superficial do Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler – RS, 2022b.

FU, D.; WU, X.; CHEN, Y.; YI, Z. Spatial variation and source apportionment of surface water pollution in the Tuo River, China, using multivariate statistical techniques. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.192, n.12, p.745, 2020.

GOLOVKO, O.; ÖRN, S.; SÖRENGÅRD, M.; FRIEBERG, K.; NASSAZZI, W.; LAI, F. Y.; AHRENS, L. Occurrence and removal of chemicals of emerging concern in wastewater treatment plants and their impact on receiving water systems. **Science of the Total Environment**, v.754, p.142122, 2021.

GOSWAMI, P.; OHURA, T.; GURUGE, K. S.; YOSHIOKA, M.; YAMANAKA, N.; AKIBA, M.; MUNUSWAMY, N. Spatio-temporal distribution, source, and genotoxic potential of polycyclic aromatic hydrocarbons in estuarine and riverine sediments from southern India. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.130, p.113-23, 2016.

KAUR, J.; KAUR, V.; PAKADE, Y. B.; KATNORIA, J. K. A study on water quality monitoring of Buddha Nullah, Ludhiana, Punjab (India). **Environmental Geochemistry and Health**, v.43, p.2699-2722, 2021.

KHAN, M. Y. A.; GANI, K. M.; CHAKRAPANI, G. J. Spatial and temporal variations of physicochemical and heavy metal pollution in Ramganga River: a tributary of River Ganges, India. **Environmental Earth Sciences**, v.76, p.231, 2017.

LEE, R. F.; STEINERT, S. Use of the single cell gel electrophoresis/comet assay for detecting DNA damage in aquatic (marine and freshwater) animals. **Mutation Research**, v.544, p.43-64, 2003.

LEME, D. M.; MARIN-MORALES, M. A. Allium cepa test in environmental monitoring: a review on its application. **Mutation Research**, v.682, p.71-81, 2009.

MATOS, L. A.; CUNHA, A. C. S.; SOUSA, A. A.; MARANHÃO, J. P. R.; SANTOS, N. R. S.; GONÇALVES, M. M. C.; DANTAS, S. M. M. M.; SOUSA, J. M. C. E.; PERON, A. P.; SILVA, F. C. C. D.; ALENCAR, M. V. O. B.; ISLAM, M. T.; AGUIAR, R. P. S.; MELO-CAVALCANTE, A. A. C.; BONECKER, C. C.; JUNIOR, H. F. J. The influence of heavy metals on toxicogenic damage in a Brazilian tropical river. **Chemosphere**, v.185, p.852-859, 2017.

MEADOR, J. P.; YEH, A.; GALLAGHER, E. P. Adverse metabolic effects in fish exposed to contaminants of emerging concern in the field and laboratory. **Environmental Pollution**, v.236, p.850-861, 2018.

MENDIGUCHIA, C.; MORENO, C.; GARCIA-VARGAS, M. Evaluation of natural and anthropogenic influences on the Guadalquivir River (Spain) by dissolved heavy metals and nutrients. **Chemosphere**, v.69, p.1509-1517, 2007.



NEALE, P. A.; O'BRIEN, J. W.; GLAUCH, L.; KÖNIG, M.; KRAUSS, M.; MUELLER, J. F.; TSCHARKE, B.; ESCHER, B. I. Wastewater treatment efficacy evaluated with in vitro bioassays. **Water Research**, v.9, p.100072, 2020.

OHE, T.; WATANABE, T.; WAKABAYASHI, K. Mutagens in surface waters: a review. **Mutation Research**, v.567, p.109-149, 2004.

MAURER, C. P.; SIMONETTI, A. B.; STAGGEMEIER, R.; RIGOTTO, C.; HEINZELMANN, L. S.; SPILKI, F. R. Adenovirus, enterovirus and thermotolerant coliforms in recreational waters from Lake Guaíba beaches, Porto Alegre, Brazil. **Journal of Water and Health**, v.13, n.4, p.1123-1129, 2015.

OLIVEIRA, M. L. A. A. Conhecendo o Parque. In: Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul (Ed.). **Natureza em revista: Delta do Jacuí**. Porto Alegre: Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul, 2002. p.12-19.

PAPA, M.; CERETTI, E.; VIOLA, G. C.; FERETTI, D.; ZERBINI, I.; MAZZOLENI, G.; STEIMBERG, N.; PEDRAZZANI, R.; BERTANZA, G. The assessment of WWTP performance: Towards a jigsaw puzzle evaluation? **Chemosphere**, v.145, p.291-300, 2016.

PATHIRATNE, A.; HEMACHANDRA, C. K.; DE SILVA, N. Efficacy of Allium cepa test system for screening cytotoxicity and genotoxicity of industrial effluents originated from different industrial activities. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.187, n.12, p.730, 2015.

PERIN, M.; DALLEGRAVE, A.; SUCHECKI BARNET, L.; ZANCHETTI MENEGHINI, L.; DE ARAÚJO GOMES, A.; PIZZOLATO, T. M. Pharmaceuticals, pesticides and metals/metalloids in Lake Guaíba in Southern Brazil: Spatial and temporal evaluation and a chemometrics approach. **Science of the Total Environment**, v.793, p.148561, 2021.

RAMBO, C. L.; ZANOTELLI, P.; DALEGRAVE, D.; DE NEZ, D.; SZCZEPANIK, J.; CARAZEK, F.; FRANSCESCON, F.; ROSEMBERG, D. B.; SIEBEL, A. M.; MAGRO, J. D. Hydropower reservoirs: cytotoxic and genotoxic assessment using the Allium cepa root model. **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, p.8759-8768, 2017.

RIO GRANDE DO SUL. **Resolução nº 50 de 2008**. Aprova o enquadramento das águas das bacias hidrográficas dos rios Caí, Pardo, Tramandaí e do Lago Guaíba. Porto Alegre: Conselho de Recursos Hídricos, 2008.

RIO GRANDE DO SUL. **Revista do Plano da Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba**. Porto Alegre: Comitê da Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba, 2017.

SEMA. **Parque Estadual Delta do Jacuí**. Porto Alegre: Secretaria do meio ambiente e infraestrutura do Estado do Rio grande do Sul, 2022.

SILVEIRA, M. A. D.; RIBEIRO, D. L.; VIEIRA, G. M.; DEMARCO, N. R.; D'ARCE, L. P. G. Direct and indirect anthropogenic contamination in water sources: evaluation of chromosomal stability and cytotoxicity using the Allium cepa test. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.100, p.216-220, 2017.



STOYANOV, I. Y.; VASILEVA, P. L.; POPOVA, T. P.; SLAVOVA, B. N. The effects of lead and cadmium on cell division and chromosomal structure in *Allium cepa* test system in vivo. **Ecologia Balkanica**, v.10, p.73-81, 2018.

TANG, W.; ZHAO, Y.; WANG, C.; SHAN, B.; CUI, J. Heavy metal contamination of overlying waters and bed sediments of Haihe basin in China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.98, p.317-323, 2013.

VILLELA, I. V.; DE OLIVEIRA, I. M.; SILVEIRA, J. C.; DIAS, J. F.; HENRIQUES, J. A.; DA SILVA, J. Assessment of environmental stress by the micronucleus and comet assays on *Limnoperna fortunei* exposed to Guaíba hydrographic region samples (Brazil) under laboratory conditions. **Mutation Research**, v.628, n.2, p.76-86, 2007.

Submetido em: **11/08/2022**

Aceito em: **05/12/2022**