

O ENQUADRAMENTO DE CORPOS HÍDRICOS COMO INDICADOR DE RESILIÊNCIA DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS FRENTE A EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS: EVIDÊNCIAS DA INUNDAÇÃO HISTÓRICA DE 2024 NO LAGO GUAÍBA

Luana Morais da Rosa – luanamorais.r@gmail.com – Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH),
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Lúcia Ribeiro Rodrigues – luciarrodrigues@gmail.com – IPH, UFRGS

Louidi Lauer Alborno – louidi.lauer@ufrgs.br – IPH, UFRGS

Salatiel Wohlmuth Da Silva – salatiel.silva@ufrgs.br – IPH, UFRGS

Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho – fernando.magalhaes@ufrgs.br – IPH, UFRGS

Resumo: Os ecossistemas aquáticos fornecem serviços essenciais, como abastecimento de água, manutenção da biodiversidade, produção primária e usos recreativos. No Brasil, um dos principais instrumentos de gestão dos recursos hídricos é o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005. As inundações representam fortes perturbações nos ecossistemas aquáticos e seus serviços ecossistêmicos, impactando substancialmente várias regiões do mundo, incluindo o Estado do Rio Grande do Sul (RS). Dessa forma, o presente estudo avaliou os impactos da inundação extrema ocorrida em maio de 2024 sobre a qualidade da água e os serviços ecossistêmicos do Lago Guaíba (Porto Alegre, RS). Foram coletadas amostras em 90 pontos durante o evento, com posterior seleção de 22 locais para monitoramento contínuo ao longo de sete campanhas (C1–C7), abrangendo variáveis físico-químicas, microbiológicas e metais. A qualidade da água foi interpretada com base no enquadramento da Resolução CONAMA nº 357/2005. Os resultados indicaram forte degradação da qualidade da água e comprometimento dos serviços ecossistêmicos aquáticos durante o pico da inundação, com elevação de turbidez, cor, fósforo total, *E. coli*, nitrogênio amoniacal e metais, frequentemente acima dos limites das classes 2 e 3 da Resolução. No período pós-evento, observou-se recuperação parcial do enquadramento para diversos parâmetros, embora contaminantes como mercúrio e indicadores microbiológicos tenham permanecido elevados ou apresentado piora nas campanhas finais, sugerindo efeitos persistentes. Os resultados evidenciaram a utilidade do enquadramento legal como ferramenta integrada para avaliar impactos ambientais e subsidiar a gestão da qualidade da água em eventos hidrológicos extremos.

Palavras-chave: Serviços de regulação, Serviços de provisão, Mudanças climáticas, Autodepuração, Desastres climáticos.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

USING WATER BODY CLASSIFICATION TO ASSESS AQUATIC ECOSYSTEM RESILIENCE TO EXTREME HYDROLOGICAL EVENTS: EVIDENCE FROM THE HISTORIC 2024 FLOOD IN LAKE GUAÍBA

Luana Morais da Rosa – luanamorais.r@gmail.com – Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH),
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Lúcia Ribeiro Rodrigues – luciarrodrigues@gmail.com – IPH, UFRGS

Louidi Lauer Albornoz – louidi.lauer@ufrgs.br – IPH, UFRGS

Salatiel Wohlmuth Da Silva – salatiel.silva@ufrgs.br – IPH, UFRGS

Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho – fernando.magalhaes@ufrgs.br – IPH, UFRGS

Abstract: Aquatic ecosystems provide essential services, including water supply, biodiversity maintenance, primary production, and recreational uses. In Brazil, one of the main water resources management instruments is the classification of water bodies into use classes, established by CONAMA Resolution No. 357/2005. Floods represent major disturbances to aquatic ecosystems and the ecosystem services they provide, substantially affecting regions worldwide, including the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. Therefore, this study evaluated the impacts of the extreme flood that occurred in May 2024 on water quality and ecosystem services in Lake Guaíba (Porto Alegre, RS). Water samples were collected at 90 sites during the flood event, and 22 locations were subsequently selected for continuous monitoring over seven sampling campaigns (C1–C7), encompassing physicochemical, microbiological, and metal-related variables. Water quality was assessed based on the classification framework established by CONAMA Resolution No. 357/2005. The results indicated severe water quality degradation and impairment of aquatic ecosystem services during the flood peak, with marked increases in turbidity, color, total phosphorus, *E. coli*, ammoniacal nitrogen, and metals, frequently exceeding the limits established for Classes 2 and 3 of the Resolution. During the post-event period, a partial recovery in water quality classification was observed for several parameters. However, contaminants such as mercury and microbiological indicators remained at elevated levels or worsened in the final monitoring campaigns, suggesting persistent impacts. The findings highlight the usefulness of the legal classification framework as an integrated tool for assessing environmental impacts and supporting water quality management under extreme hydrological events.

Keywords: Regulating services, Provisioning services, Climate change, Self-purification, Climate-related disasters.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

1. INTRODUÇÃO

Os serviços ecossistêmicos são geralmente definidos como “benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas” (MEA, 2005). O conceito de serviços ecossistêmicos é relevante para conectar as pessoas à natureza, enfatizando o papel fundamental do funcionamento do ecossistema e da biodiversidade em sustentar os múltiplos benefícios fornecidos aos seres humanos, possibilitando uma gestão melhorada e mais sustentável dos ecossistemas (GRIZZETTI *et al.*, 2016). Seguindo a classificação dos serviços ecossistêmicos proposta nos relatórios da Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2005), quatro categorias principais são distinguidas: (1) serviços de suporte (produção primária, formação do solo), (2) serviços reguladores (regulação da água, qualidade da água, regulação de doenças, regulação do clima), (3) serviços de fornecimento (água potável, suprimento de alimentos) e (4) serviços culturais (valor estético, recreação e turismo).

Os ecossistemas aquáticos fornecem serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo o abastecimento de água, a manutenção da biodiversidade, a produção primária e oportunidades para recreação e turismo (TALBOT *et al.*, 2018). No Brasil, a gestão desses recursos é orientada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), que visa assegurar a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas para as atuais e futuras gerações. Entre seus instrumentos de gestão, destaca-se o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso, regulamentado pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece metas de qualidade da água de acordo com os usos preponderantes (BRASIL, 2005). As águas doces são classificadas em cinco categorias, desde a Classe Especial, destinada aos usos mais exigentes e à proteção da vida aquática, até a Classe 4, voltada a usos menos restritivos, como navegação e harmonia paisagística. Dessa forma, a avaliação da qualidade da água em relação aos padrões estabelecidos para cada classe constitui uma ferramenta essencial para verificar o comprometimento dos usos previstos e dos serviços ecossistêmicos associados.

As inundações representam fortes perturbações nos ecossistemas aquáticos e nos serviços que eles fornecem (TALBOT *et al.*, 2018). Sua frequência e intensidade têm aumentado nas últimas décadas e tendem a se intensificar com as mudanças climáticas, resultando em eventos de precipitação mais extremos em várias regiões do mundo (IPCC, 2021; EEA, 2019). Eventos extremos de inundações comprometem a qualidade da água ao promoverem a dispersão de contaminantes químicos, biológicos e físicos, além de intensificarem o carreamento de esgoto bruto e sedimentos para os corpos hídricos (LIM & FOO, 2021). Além disso, condições climáticas extremas podem sobrecarregar e danificar os sistemas de abastecimento, tratamento e distribuição de água potável, causando interrupções no serviço, comprometendo o controle da qualidade da água e aumentando o risco de contaminação dos recursos hídricos e da ocorrência de doenças de veiculação hídrica, com importantes repercussões para a saúde pública (BARBETTA *et al.*, 2022; BEKKELUND *et al.*, 2025).

Nos últimos anos, o Estado do Rio Grande do Sul (RS) tem sofrido com secas e inundações cada vez mais frequentes (VIEIRA *et al.*, 2022). As recentes enchentes, que devastaram o Estado em maio de 2024, representam uma crise de proporções históricas, afetando 478 municípios, o que representa mais de 90% do Estado. Segundo a Defesa Civil do RS (dados de agosto de 2025), mais de dois milhões de pessoas foram afetadas, com 185 óbitos confirmados e 23 pessoas desaparecidas. O comprometimento da infraestrutura sanitária durante esses desastres leva à contaminação das águas da enchente, de fontes de água e alimentos, por fezes e urina de roedores, representando sérios riscos à

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

saúde ao facilitar a disseminação de doenças como hepatite A, febre tifoide e leptospirose (MARTINS-FILHO *et al.*, 2024).

O monitoramento abrangente das perdas de ecossistemas e seus serviços relacionados a desastres é essencial para o planejamento de estratégias e medidas sustentáveis dos riscos relacionados a desastres (WALZ *et al.*, 2021). Muitos estudos avaliam os efeitos de perturbações nos serviços ecossistêmicos, mas a maioria desses estudos se concentra em sistemas terrestres, urbanos e florestais, enquanto poucos analisam os serviços ecossistêmicos aquáticos (GRIZZETTI *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2025). Além disso, os efeitos específicos das inundações sobre os ecossistemas aquáticos e os serviços associados ainda necessitam de maior atenção (TALBOT *et al.*, 2018). A inundação de maio de 2024 no Rio Grande do Sul representa um evento hidrológico sem precedentes na história recente do Brasil, tanto pela magnitude da precipitação quanto pela extensão espacial dos impactos, sendo considerada um exemplo dos eventos extremos cuja frequência e intensidade tendem a aumentar em cenários de mudanças climáticas (COLLISCHONN *et al.*, 2025). Nesse contexto, o objetivo do estudo é de compreender os efeitos da inundação sobre a qualidade da água e os serviços ecossistêmicos, constituindo um passo fundamental para subsidiar estratégias de adaptação, gestão de riscos e planejamento dos recursos hídricos.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O Lago Guaíba (29°55'-30°24' S; 51°01'-51°20' W) está localizado na área geográfica da Depressão Central no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 1). Com área de 496 km², estende-se do município de Porto Alegre até a Laguna dos Patos, que se conecta com o Oceano Atlântico. As principais atividades industriais ao redor do lago estão no ramo de metalurgia, indústria de celulose e produção de alimentos, com predominância do setor agrícola na margem direita e uso intenso para irrigação de arroz na margem esquerda (GIORA *et al.*, 2022). O sistema é alimentado pelos rios Jacuí (84,6%), Sinos (7,5%), Caí (5,2%) e Gravataí (2,7%), e recebe as águas dos córregos localizados em suas margens. Sua bacia hidrográfica cobre o equivalente a 30% do território do Estado, cujos rios que a compõem contribuem para os impactos ambientais negativos no lago (PERIN *et al.*, 2021). A economia e os usos do solo da região estão relacionados ao descarte de grandes volumes de esgoto doméstico, favorecendo a potencial contaminação por elementos químicos, pesticidas e carga orgânica do sistema (DE ANDRADE *et al.*, 2019). De acordo com o Painel de Indicadores de 2024 do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA, 2024), Porto Alegre apresenta cobertura de 100% no abastecimento de água potável, enquanto 91,76% da população é atendida por serviços de coleta de esgoto. No entanto, apenas 72,35% do esgoto coletado recebe tratamento.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700

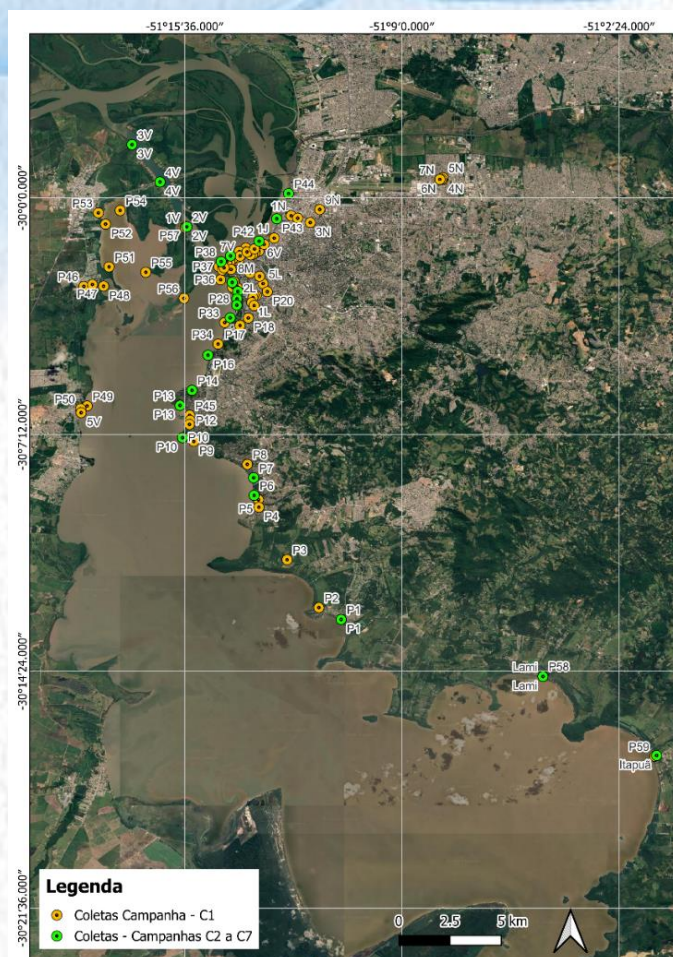


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 1: Lago Guaíba, Porto Alegre (RS) e pontos de amostragem.



2.2. Coleta e análise de dados

Durante a grande enchente que atingiu Porto Alegre em maio de 2024 (Campanha 1 – C1), amostras de água superficial foram coletadas pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Entre 5 e 12 de maio de 2024, foram amostrados 90 locais distintos afetados pela inundação, distribuídos ao longo da orla do Guaíba e em canais urbanos (Figura 1), contemplando 17 variáveis de qualidade da água, dentre as quais foram analisados parâmetros físico-químicos, microbiológicos e metais. Posteriormente, 22 pontos amostrais foram selecionados para seguir no monitoramento após o evento (Figura 1), onde 11 variáveis foram analisadas ao longo de 6 campanhas adicionais de monitoramento (C2-C7) a partir de C1, contemplando o período de 1 ano a partir da enchente. Os 22 locais de monitoramento asseguraram a cobertura espacial dos seis

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs) de Porto Alegre, abrangendo condições de pico da inundação, fases de recessão e condições hidrológicas de referência pós-evento.

Os parâmetros de qualidade da água selecionados neste estudo corresponderam àqueles com padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005). Para cada campanha de amostragem (C1–C7), as amostras foram classificadas de acordo com as classes de enquadramento previstas na Resolução, que variam da Classe Especial à Classe 4, destinada aos usos de navegação e harmonia paisagística. Em seguida, foi calculado o percentual de amostras enquadradas em cada classe para cada variável analisada. Essa abordagem permitiu avaliar qualitativamente o comprometimento da qualidade da água e, conseqüentemente, dos serviços ecossistêmicos aquáticos durante e após a grande inundação de maio de 2024, por meio da comparação dos resultados obtidos com os padrões legais de enquadramento (BRASIL, 2005). Os parâmetros físico-químicos, microbiológicos e de metais foram quantificados utilizando as metodologias resumidas na Tabela 1 (APHA, 2017).

Tabela 1: Métodos e equipamentos utilizados para a análise dos parâmetros físico-químicos, microbiológicos e de metais.

Variável	Unidade	Método	Equipamento
pH	-	SMEWW* 2310	Digimed DM-22
Turbidez	NTU	SMEWW* 2130	Turbidímetro Hach 2100N
Cor	UH	SMEWW* 2120	AKSO Cor max
Fósforo Total (PT)	mg. L ⁻¹	SMEWW* 4500	-
Cloreto	mg. L ⁻¹	SMEWW* 4500	-
Fluoreto	mg. L ⁻¹	SMEWW* 4500	-
Nitrito	mg. L ⁻¹	SMEWW* 4500	-
Nitrato	mg. L ⁻¹	SMEWW* 4500	-
Sulfato	mg. L ⁻¹	SMEWW* 4500	-
Alumínio (Al)	mg. L ⁻¹	SMEWW* 3120	Agilent Technologies 5110 ICP-OES
Níquel (Ni)	mg. L ⁻¹	SMEWW* 3120	"
Chumbo (Pb)	mg. L ⁻¹	SMEWW* 3120	"
Zinco (Zn)	mg. L ⁻¹	SMEWW* 3120	"
Arsênio (As)	mg. L ⁻¹	SMEWW* 3120	"
Mercúrio (Hg)	mg. L ⁻¹	SMEWW* 3120	"
Nitrogênio amoniacal (N-NH ₃)	mg. L ⁻¹	Metodologia adaptada de SMEWW* 4500-NH ₃ ⁺	-
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	Colilert®	-

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pico da enchente, ocorrido em maio de 2024 em Porto Alegre, foi caracterizado por elevada turbidez, atingindo um valor médio de 112,3 NTU e máximo de 475 NTU (Tabela 2), ultrapassando o limite máximo de 100 NTU estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos enquadrados na Classe 3. De forma semelhante, os valores de cor excederam o limite de 75 mg Pt. L⁻¹ previsto para essa mesma classe, que representa o último nível de enquadramento em que os corpos de água podem ser destinados ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado. A partir da Classe 4, os usos permitidos tornam-se menos restritivos, restringindo-se à navegação e à harmonia paisagística.

A concentração de fósforo total atingiu valor máximo de 11,9 mg. L⁻¹ e média de 1,03 mg. L⁻¹, enquanto o limite estabelecido para ambientes lênticos enquadrados na Classe 3 é de 0,05 mg. L⁻¹. Entre os metais avaliados, alumínio foi o que apresentou maior excedência em relação ao limite da Resolução para a Classe 3 (0,2 mg. L⁻¹), registrando concentração média de 3,49 mg. L⁻¹ e máxima de 12,15 mg. L⁻¹ (Tabela 2). Em relação à *Escherichia coli* (*E. coli*), a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece que, para usos que incluem o abastecimento humano, o limite de 4.000 coliformes termotolerantes (ou *E. coli*) por 100 mL não deve ser excedido em 80% ou mais de, no mínimo, seis amostras coletadas ao longo de um ano, com periodicidade bimestral (BRASIL, 2005). Durante o período da enchente, a concentração média de *E. coli* foi superior a 8.000 NMP/100 mL, atingindo um pico de 104.611 NMP/100 mL (Tabela 2).

Tabela 2: Valores mínimos, máximos, média e desvio padrão (DP) dos parâmetros de qualidade da água monitorados durante o evento de inundação de 2024 no Lago Guaíba em Porto Alegre, RS.

	Mínimo	Máximo	Média	DP
pH	5.52	9.45	7.26	0.83
Turbidez	21.4	475.0	112.3	81.9
Cor	8.0	378.0	143.8	83.2
Fósforo total	0.01	11.91	1.03	2.18
Fluoreto	0.10	0.40	0.15	0.06
Cloreto	1.20	218.90	30.94	38.42
Nitrito	0.00	6.00	0.71	0.91
Nitrato	0.00	19.60	5.06	4.25
Sulfato	1.50	98.00	14.47	13.95
Alumínio	0.01	12.15	3.49	2.92
Níquel	0.01	0.06	0.03	0.01
Chumbo	0.00	0.00	0.00	0.00
Zinco	0.00	0.34	0.08	0.07
Arsênio	0.02	1.02	0.06	0.14
Mercúrio	0.01	0.03	0.01	0.01
Nitrogênio amoniacal	0.2	45.7	11.6	11.7
<i>E. coli</i>	0.0	104611.0	8235.7	22186.2

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



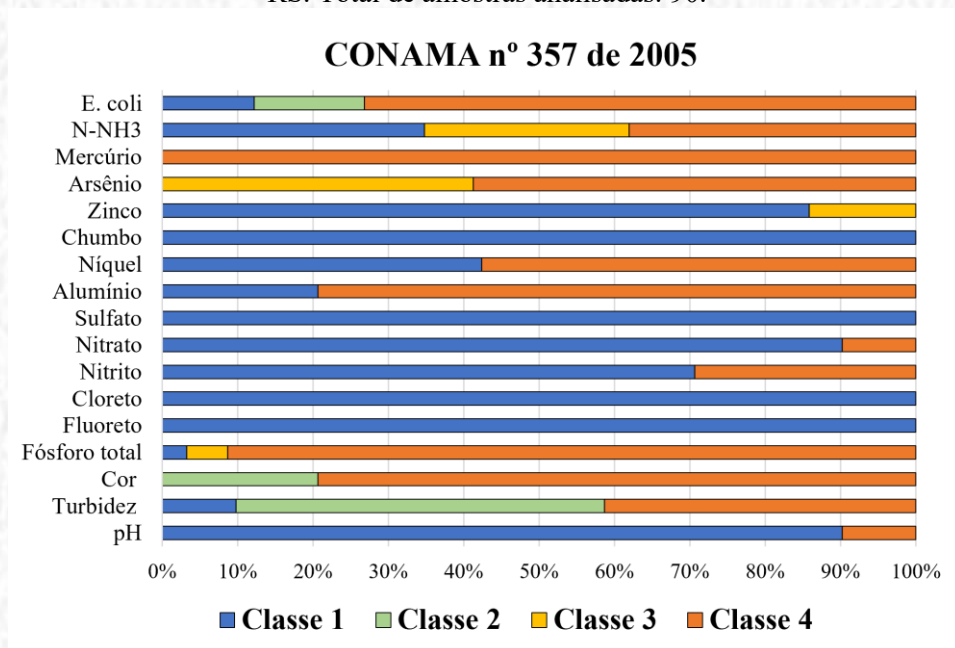
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Os resultados evidenciaram que, entre as 17 variáveis analisadas durante o evento de inundação, nove apresentaram maior comprometimento da qualidade da água: turbidez, cor, fósforo total, *E. coli*, nitrogênio amoniacal (N-NH_3) e os metais alumínio, níquel, arsênio e mercúrio (Figura 2). Dentre essas, foram enquadradas como classe 4, podendo ser destinadas apenas para fins menos nobres como navegação e harmonia paisagística: 100% das amostras analisadas para mercúrio; mais de 90% das amostras analisadas para fósforo total; 80% das amostras referentes a cor e alumínio; mais de 70% das amostras de *E. coli* e mais da metade das amostras referentes a arsênio e níquel. Além disso, aproximadamente 40% das amostras apresentaram enquadramento incompatível com usos destinados ao abastecimento humano em relação à turbidez e ao nitrogênio amoniacal.

Figura 2: Porcentagem de amostras referentes a cada classe de uso pretendido determinada pelo enquadramento da Resolução CONAMA nº 357 de 2005, para cada um dos 17 parâmetros de qualidade da água monitorados durante a inundação extrema de 2024 no Lago Guaíba, Porto Alegre, RS. Total de amostras analisadas: 90.



A análise do enquadramento das variáveis nas campanhas realizadas após o período da enchente (C2 a C7), abrangendo um ano de monitoramento, demonstrou melhora na classificação da maior parte das variáveis analisadas. Turbidez, cor, fósforo total e zinco, por exemplo, evidenciaram uma recuperação expressiva da qualidade da água do Guaíba (Figura 3). O nitrogênio amoniacal também apresentou melhora evidente no enquadramento entre as campanhas C2 e C7, em comparação com a C1 (Figura 3). O arsênio apresentou melhora na classificação entre as campanhas C4 e C6, porém voltou a registrar cerca de metade das amostras enquadradas na Classe 4 na última campanha de monitoramento (C7). O mesmo comportamento foi observado para o níquel, embora em menor proporção. *E. coli*

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



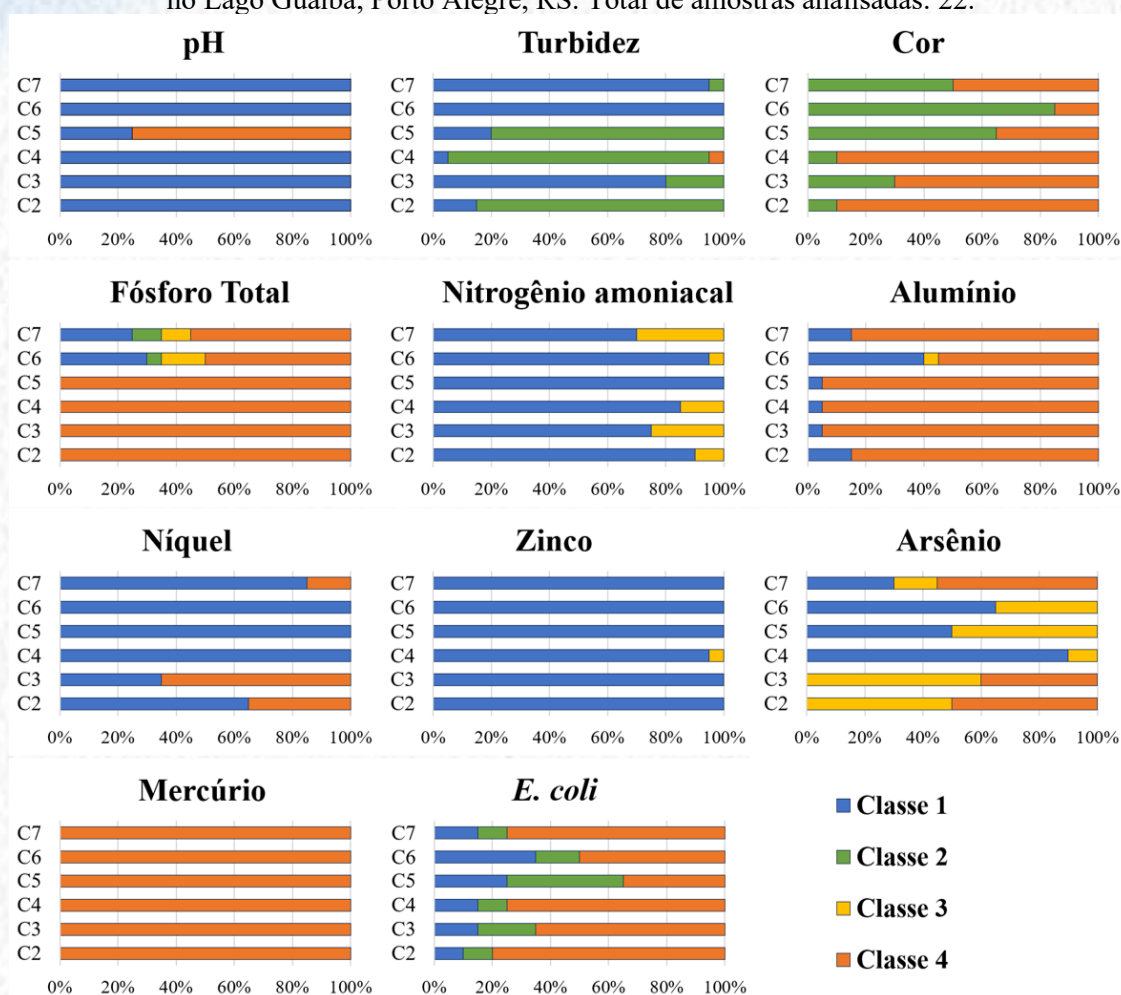
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

apresentou melhora no enquadramento nas campanhas C5 e C6, mas houve um aumento considerável na proporção de amostras classificadas na Classe 4 em C7, ultrapassando 70% das amostras analisadas. O alumínio manteve mais de 80% das amostras enquadradas na Classe 4 em praticamente todas as campanhas, com exceção de C6, quando essa proporção foi inferior a 70%. O pH não apresentou comprometimento relevante das condições de qualidade, exceto na campanha C5. Em contrapartida, o mercúrio permaneceu acima dos limites estabelecidos para a Classe 3 em todas as campanhas de monitoramento (Figura 3).

Figura 3: Porcentagem de amostras referentes a cada classe de uso determinada pelo enquadramento da Resolução CONAMA nº 357/2005, para cada um dos 11 parâmetros de qualidade da água monitorados ao longo de 6 campanhas (C2-C7) após o evento da grande inundação de 2024 no Lago Guaíba, Porto Alegre, RS. Total de amostras analisadas: 22.



Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Quando interpretados com base nos padrões ambientais definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para a classificação dos corpos d'água (BRASIL, 2005), os resultados obtidos indicam um expressivo comprometimento da qualidade da água e dos serviços ecossistêmicos aquáticos durante o evento de inundação. Nesse período, observou-se um aumento acentuado da turbidez e da cor da água, além dos nutrientes, metais e concentrações de *E. coli*, com valores que ultrapassaram significativamente os limites estabelecidos para as classes 2 e 3 da referida resolução, evidenciando uma deterioração temporária da qualidade da água associada às condições hidrológicas extremas.

As alterações observadas na qualidade da água comprometem diretamente os serviços ecossistêmicos de regulação, especialmente aqueles relacionados à manutenção da qualidade da água e à capacidade de autodepuração dos ecossistemas aquáticos. A capacidade natural de autodepuração dos ecossistemas contribui para melhorar a qualidade da água por meio da absorção, redução e eliminação de poluentes. Trata-se do processo pelo qual um corpo hídrico, após ser poluído, recupera suas condições e características anteriores à poluição por meio da ação combinada de processos físicos (como diluição e sedimentação), químicos (como oxidação e fotólise) e biológicos (como o metabolismo de animais, plantas e microrganismos) (XIAO *et al.*, 2023).

O aumento da turbidez reduz a penetração de luz na coluna d'água, limitando a produção primária e alterando processos fundamentais, como a fotossíntese e a ciclagem de nutrientes (DU *et al.*, 2022; LUNT & SMEE, 2020). Da mesma forma, as concentrações elevadas de fósforo total representam um importante fator de degradação da qualidade da água. O enriquecimento por nutrientes favorece processos de eutrofização, aumentando a produtividade primária, mas também promovendo florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, redução da biodiversidade e alterações na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Esses processos frequentemente resultam em problemas de gosto, odor e produção de toxinas, comprometendo tanto a integridade ecológica quanto os usos múltiplos dos recursos hídricos (DODDS *et al.*, 2013; FENG *et al.*, 2023).

Entre os fatores de maior relevância para a saúde pública destaca-se a contaminação fecal, reconhecida como o principal risco microbiológico associado às águas destinadas ao consumo humano e ao uso recreativo (HOLCOMB & STEWART, 2020). A introdução de esgoto doméstico e o escoamento superficial durante eventos hidrológicos extremos favorecem o transporte de bactérias, vírus e protozoários patogênicos, aumentando o risco de doenças de veiculação hídrica e prolongando o tempo de recuperação da qualidade da água (PASQUALOTTO *et al.*, 2025).

Dessa forma, a qualidade da água constitui o principal pré-requisito e, provavelmente, o atributo mais mensurável e comparável da saúde ecológica dos ecossistemas de água doce. Sua degradação compromete não apenas a integridade ecológica desses ambientes, mas também a disponibilidade de água para uso humano, uma vez que reduz a parcela do recurso apta a usos de maior valor, como o abastecimento de água potável (BOGARDI *et al.*, 2020). Nesse sentido, a degradação dos serviços ecossistêmicos de regulação repercute diretamente sobre os serviços de provisão ou fornecimento, especialmente o abastecimento público de água.

A redução da capacidade natural de depuração do ecossistema aumenta a dependência de tratamentos convencionais e avançados para remoção de sedimentos, matéria orgânica, compostos responsáveis por gosto e odor, além de metabólitos produzidos por florações de cianobactérias (KHAN *et al.*, 2015; PRICE & HEBERLING, 2018). Além disso, a deterioração da qualidade da água bruta

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

eleva significativamente os custos operacionais das estações de tratamento e pode comprometer a segurança do abastecimento em eventos extremos (KHAN *et al.*, 2015).

Além dos impactos sobre os serviços de regulação e provisão, a deterioração da qualidade da água compromete também os serviços ecossistêmicos culturais. A perda da transparência da água, o aumento da coloração e a contaminação microbiológica reduzem o valor estético dos corpos hídricos, restringem atividades recreativas e turísticas e diminuem os benefícios sociais proporcionados pelos ecossistemas aquáticos (MEA, 2005). Estudos recentes demonstram que eventos extremos de inundação podem provocar perdas significativas desses serviços ecossistêmicos, especialmente em bacias hidrográficas urbanizadas, onde a elevada carga de poluentes intensifica e prolonga os impactos ambientais (SOUZA *et al.*, 2025; TALBOT *et al.*, 2018).

No presente estudo, observou-se uma melhora gradual das condições de qualidade da água nas campanhas C5 a C7. Esse período foi caracterizado por reduções expressivas nas concentrações de fósforo total e de metais, como zinco e níquel, além de uma diminuição acentuada dos valores de turbidez e cor, indicando um processo de recuperação parcial do sistema. Assim, aproximadamente um ano após a ocorrência da inundação, as condições observadas diferiam substancialmente daquelas registradas durante o pico do evento hidrológico extremo.

Apesar dessa tendência geral de recuperação, alguns parâmetros apresentaram comportamento distinto. Na campanha C7, correspondente ao último monitoramento realizado, as concentrações de mercúrio permaneceram acima dos limites estabelecidos para águas destinadas ao abastecimento humano, enquanto níquel e arsênio apresentaram piora em seu enquadramento. Da mesma forma, variáveis associadas à contaminação por esgoto doméstico, como nitrogênio amoniacal (N-NH_3) e *E. coli*, também registraram deterioração na classificação da qualidade da água. Esses resultados podem estar relacionados ao efeito de concentração, fenômeno em que a redução dos níveis de água diminui a capacidade de diluição dos corpos hídricos, favorecendo o acúmulo de contaminantes orgânicos e inorgânicos (GRAHAM *et al.*, 2024). Em ambientes urbanos, esse processo pode ser intensificado pela persistência de poluentes transportados durante as inundações, incluindo efluentes sanitários, resíduos industriais e materiais acumulados, gerando implicações de longo prazo para a qualidade da água e a saúde pública (MANTOVANI *et al.*, 2025).

Os resultados reforçam os desafios identificados para o setor de saneamento após as enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul, especialmente quanto à necessidade de fortalecer sistemas de monitoramento, infraestrutura resiliente e planejamento integrado entre gestão dos recursos hídricos e saneamento ambiental (MAGALHÃES FILHO *et al.*, 2024). Mais do que um instrumento regulatório destinado ao licenciamento e ao planejamento dos usos da água, o enquadramento mostrou-se um indicador sintético da perda e da recuperação de serviços ecossistêmicos durante eventos extremos. Sob essa perspectiva, o enquadramento pode ser utilizado não apenas para avaliar conformidade legal, mas também como ferramenta de monitoramento da resiliência de ecossistemas aquáticos frente às mudanças climáticas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, os resultados demonstram que a inundação de maio de 2024 provocou uma deterioração expressiva da qualidade da água do Guaíba, comprometendo temporariamente diversos

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

serviços ecossistêmicos associados à regulação, provisão e uso cultural dos recursos hídricos. Embora tenha sido observada uma recuperação gradual de vários parâmetros ao longo do período de monitoramento, a persistência de concentrações elevadas de determinados contaminantes, especialmente mercúrio, bem como a recorrência de indicadores relacionados à contaminação fecal e a alguns metais, evidencia que os efeitos de eventos hidrológicos extremos podem se prolongar muito além da fase aguda da inundação. Nesse contexto, a utilização do enquadramento previsto na Resolução CONAMA nº 357/2005 mostrou-se uma ferramenta particularmente útil para interpretar as alterações na qualidade da água sob a perspectiva dos usos múltiplos dos recursos hídricos. Mais do que indicar não conformidades pontuais de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, o enquadramento permitiu avaliar como essas alterações afetam a capacidade do ecossistema de sustentar serviços essenciais à sociedade, especialmente o abastecimento público.

Diferentes parâmetros apresentam tempos distintos de recuperação, revelando impactos persistentes; esse tipo de avaliação pode servir como ferramenta para monitorar a resiliência de corpos hídricos diante de eventos climáticos extremos. Dessa forma, os resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água após eventos extremos e demonstram o potencial do enquadramento como instrumento integrador para avaliar impactos ambientais, subsidiar a gestão dos recursos hídricos e apoiar estratégias de adaptação frente ao aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos. Eventos extremos não se restringem ao período da inundação, podendo persistir durante meses após o recuo das águas, aspecto frequentemente negligenciado nas avaliações baseadas exclusivamente na fase emergencial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro concedido, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. Os autores também expressam seus agradecimentos ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) pelo suporte técnico e operacional prestado durante as campanhas emergenciais de monitoramento realizadas ao longo da enchente histórica de 2024 no sistema Guaíba.

5. REFERÊNCIAS

- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.
- BARBETTA, S.; BONACCORSI, B.; TSITSIFLI, S.; BOLJAT, I.; ARGIRIS, P.; REBERSKI, J. L.; et al. Assessment of flooding impact on water supply systems: a comprehensive approach based on DSS. **Water Resources Management**, v. 36, n. 14, p. 5443-5459, 2022.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

- BEKKELUND, A.; LANGLETE, P.; NORDHEIM, C. F.; ZIESLER, T. A.; MADSLIEN, E. H.; HYLLESTAD, S. Extreme weather and drinking water safety: impacts of the 2023 flood Hans in Norway. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 270, p. 114677, 2025.
- BOGARDI, J. J.; LEENTVAAR, J.; SEBESVÁRI, Z. Biologia Futura: integrating freshwater ecosystem health in water resources management. **Biologia Futura**, v. 71, n. 4, p. 337-358, 2020.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br>. Acesso em: 25 jun. 2026.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; POSSANTTI, I.; DORNELLES, F.; PAIVA, R.; MEDEIROS, M. S.; MICHEL, G. P.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; MORAES, S. R.; MARCUZZO, F. F. N.; MICHEL, R. D. L.; BESKOW, T. L. C.; BESKOW, S.; FERNANDES, E. H. L.; SANTOS, L. L.; RUHOFF, A.; KOBİYAMA, M.; COLLARES, G. L.; BUFFON, F.; DUARTE, E.; LIMA, S.; MEIRELLES, F. S. C.; PICCILLI, D. G. A. The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, e1, 2025.
- DE ANDRADE, L. C. D.; RODRIGUES, L. R.; ANDREAZZA, R.; CAMARGO, F. A. D. O. Lago Guaíba: uma análise histórico-cultural da poluição hídrica em Porto Alegre, RS, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, p. 229-237, 2019.
- DEFESA CIVIL. Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 19 ago. 2025. Disponível em: <https://sosenchentes.rs.gov.br/situacao-nos-municipios>. Acesso em: 30 set. 2025.
- DODDS, W. K.; PERKIN, J. S.; GERKEN, J. E. Human impact on freshwater ecosystem services: a global perspective. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 16, p. 9061-9068, 2013.
- DU, Y.; ZHANG, X.; LI, J.; CHEN, L.; WANG, Q. Total suspended solids characterization and management implications for lakes in East China. **Science of The Total Environment**, v. 806, p. 151374, 2022.
- FENG, W.; LIU, X.; ZHANG, Y.; LI, H. Chemical composition, sources, and ecological effect of organic phosphorus in water ecosystems: a review. **Carbon Research**, v. 2, n. 1, p. 1-20, 2023.
- GIORA, J.; SILVA, A. C. T.; CAVALHEIRO, L. W.; WINGERT, J. M.; FIALHO, C. B. Long-term aquatic biomonitoring in a Southern Brazil urban center: the Guaíba Lake fish community structure through the years. **Environmental Biology of Fishes**, v. 105, n. 5, p. 605-622, 2022.
- GRAHAM, D. J.; BIERKENS, M. F.; VAN VLIET, M. T. Impacts of droughts and heatwaves on river water quality worldwide. **Journal of Hydrology**, v. 629, art. 130590, 2024.
- GRIZZETTI, B.; LANZANOVA, D.; LIQUETE, C.; REYNAUD, A.; CARDOSO, A. C. Assessing water ecosystem services for water resource management. **Environmental Science & Policy**, v. 61, p. 194-203, 2016.
- HOLCOMB, D. A.; STEWART, J. R. Microbial indicators of fecal pollution: recent progress and challenges in assessing water quality. **Current Environmental Health Reports**, v. 7, n. 3, p. 311-324, 2020.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2021. European Environment Agency (EEA). 2019. The European Environment State and Outlook 2020. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- KHAN, S. J.; DEERE, D.; LEUSCH, F. D.; HUMPAGE, A.; JENKINS, M.; CUNLIFFE, D. Extreme weather events: should drinking water quality management systems adapt to changing risk profiles? **Water Research**, v. 85, p. 124-136, 2015.
- LIM, K. Y.; FOO, K. Y. Hazard identification and risk assessment of the organic, inorganic and microbial contaminants in surface water after a high-magnitude flood event. **Environment International**, v. 157, p. 106851, 2021.
- LUNT, J.; SMEE, D. L. Turbidity alters estuarine biodiversity and species composition. **ICES Journal of Marine Science**, v. 77, p. 379-387, 2020.
- MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; MENDES, A. T.; SANTOS, G. R.; BENETTI, A. D.; DORNELLES, F. Enchentes e inundações no Rio Grande do Sul em 2024: impactos e desafios para a gestão integrada de políticas públicas no saneamento básico. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 33, p. 23-32, 2024.
- MANTOVANI, J. R.; ALCÂNTARA, E.; BAIÃO, C. F.; PAMPUCH, L.; CURTARELLI, M. P.; RIBEIRO, J. V. M.; GUIMARÃES, Y. C.; LONDE, L.; MASSI, K.; MARENGO, J.; NOBRE, C. A.; ASSIREU, A. T.; BORTOLOZO, C. A.; SIMÕES, S. J.; TOMASELLA, J.; MORAES, O. L. L.; PARK, E. Unprecedented flooding in Porto Alegre Metropolitan Region (Southern Brazil) in May 2024: Causes, risks, and impacts. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 160, 2025.
- MARTINS-FILHO, P. R.; CRODA, J.; ARAÚJO, A. A. D. S.; CORREIA, D.; QUINTANS-JÚNIOR, L. J. Catastrophic floods in Rio Grande do Sul, Brazil: the need for public health responses to potential infectious disease outbreaks. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, v. 57, p. e00603-2024, 2024.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). **Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.
- PASQUALOTTO, A. C.; VIECELI, T.; WÜRDIG RICHE, C. V.; DE CARVALHO HESSEL DIAS, V. M.; BALLALAI, I.; CUNHA, J.; et al. Floods and infectious diseases: public health lessons from the 2024 southern Brazil disaster. **Clinical Microbiology Reviews**, v. 38, p. e00165-24, 2025.
- PERIN, M.; DALLEGRAVE, A.; BARNET, L. S.; MENEGHINI, L. Z.; 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.
- PRICE, J. I.; HEBERLING, M. T. The effects of source water quality on drinking water treatment costs: a review and synthesis of empirical literature. **Ecological Economics**, v. 151, p. 195-209, 2018.
- SINISA – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO. Painel de Indicadores 2024. Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/>. Acesso em: 05 jan. 2026.

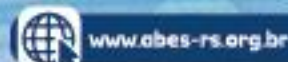
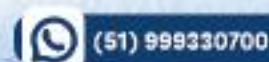
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



- SOUSA, M. C.; MARTINS, R.; SIMÕES, N. E.; FEIO, M. J. Ecosystem services of urban rivers: a systematic review. **Aquatic Sciences**, v. 87, n. 1, art. 1, 2025.
- TALBOT, C. J.; BENNETT, E. M.; CASSELL, K.; HANES, D. M.; MINOR, E. C.; PAERL, H.; RAYMOND, P. A.; VARGAS, R.; VIDON, P. G.; WOLLHEIM, W.; XENOPOULOS, M. A. The impact of flooding on aquatic ecosystem services. **Biogeochemistry**, v. 141, p. 439-461, 2018.
- VIEIRA, S.; MIGLIAVACCA, D.; QUEVEDO, D. Analysis of hydrological extremes in the Guaíba hydrographic region: an application of extreme values theory. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v. 57, p. 239-255, 2022.
- WALZ, Y.; JANZEN, S.; NARVAEZ, L.; ORTIZ-VARGAS, A.; WOELKI, J.; DOSWALD, N.; SEBESVARI, Z. Disaster-related losses of ecosystems and their services: why and how do losses matter for disaster risk reduction? **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 63, p. 102425, 2021.
- XIAO, C.; CHEN, J.; CHEN, D.; CHEN, R.; SONG, X. Mechanism of sinuosity effect on self-purification capacity of rivers. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 52, p. 112184-112193, 2023.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br