

de Ingeniería
y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

<http://www.journals.unam.mx/index.php/aidis>

DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2025.18.3>

Vol. 18, No. 3
Diciembre 2025

ISSN 0718-378X

Editado por:





ISSN 0718-378X

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

Temática y alcance

La Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica es una publicación electrónica cuatrimestral coeditada por AIDIS y el Instituto de Ingeniería UNAM. Publica contribuciones originales de calidad y actualidad evaluadas por pares, dentro de su área de competencia. Se presentan trabajos que abarcan aspectos relacionados con el conocimiento científico y práctico, tanto tecnológico como de gestión, dentro del área de Ingeniería y Ciencias Ambientales en Latinoamérica.

El enfoque es multidisciplinario, buscando contribuir en forma directa a la generación de conocimiento, al desarrollo de tecnologías y a un mejor desempeño profesional. Entre los temas cubiertos por la revista están los siguientes: agua potable, calidad de agua, aguas residuales, residuos sólidos, energía, contaminación, reciclaje, cambio climático, salud ambiental, nuevas tecnologías, ética, educación, legislación y política ambiental, gestión ambiental, sostenibilidad y participación social, entre otros.

Cada edición muestra los trabajos que derivan del arbitraje académico estricto de carácter internacional. También se publican números especiales de temas particulares que fueron presentados en los diversos Congresos Interamericanos realizados por la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) y que en forma adicional fueron sometidos al proceso de revisión interno de la revista.

Editor en Jefe

Dr. Germán Buitrón Méndez,
Instituto de Ingeniería, UNAM

Entidad editora

Instituto de Ingeniería, UNAM
Ciudad Universitaria, Coyoacán, México D.F., C.P. 04360
Teléfono: (52) (55) 56-23-36-00; Fax: (52) (55)
56-16-28-94

Información Legal

La Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica es una publicación electrónica cuatrimestral, editada en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

Reservas de derechos al uso exclusivo:
04-2011-011413271800-203

ISSN

0718-378X

Coordinadora editorial y Secretaría técnica

Biól. Blanca P. Gamboa Rocha
Instituto de Ingeniería, UNAM, México

Administrador de la plataforma (OJS)

Biól. Blanca P. Gamboa Rocha
Instituto de Ingeniería, UNAM, México

Contacto

revista_aidis@pumas.iingen.unam.mx (Principal)
revista.aidis@gmail.com



ISSN 0718-378X

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

Directorio

Junta editorial

Dra. Rosa María Ramírez Zamora

Directora del Instituto de Ingeniería, UNAM. México

Dr. Germán Buitrón Méndez

Editor en Jefe, Instituto de Ingeniería, UNAM. México

Dr. Rolando Chamy Maggi

Presidente de AIDIS. Chile

Consejo editorial

Dr. Adalberto Noyola Robles

Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Prof. André Bezerra dos Santos

Universidade Federal do Ceará, Brasil.

Prof. Cleverson V. Andreoli

Instituto Superior de Administração e Economia, FGV, Brasil.

Dr. Darci Campani

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Dr. David Jeison Núñez

Universidad de la Frontera, Chile.

Dr. Diógenes Hernández Espinoza

Universidad de Talca, Chile.

Dr. Eric Houbron

Universidad Veracruzana, México.

Prof. Eugenio Foresti

Universidade de São Paulo, Brasil.

Dra. Fabiana Passos

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Dr. Francisco Cervantes Carrillo

Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Dra. Gabriela Moeller Chávez

Universidad Politécnica de Morelos, México.

Dr. Germán Buitrón Méndez

Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Dr. Iván Moreno Andrade

Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Prof. Léo Heller

Fundação Oswaldo Cruz, Brasil.

Dr. Manuel Salvador Rodríguez Susa

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Dr. Marcel Szanto Narea

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Prof. Marcelo Zaiat

Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil.

Dra. Mirna Argueta Iria

Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados, Honduras.

Dr. Quetzalcoatl Hernández Escobedo

Escuela Nacional de Estudios Superiores Juriquilla, UNAM, México.

Prof. Rafael Bastos

Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

Dr. Raúl Muñoz

Universidad de Valladolid, España.

Dr. Rolando Chamy Maggi

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Dra. Sonia Arriaga

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Portal de revistas
científicas y arbitradas
de la UNAM

Índice. Tabla de Contenido

Vol. 18, No. 3

Sección editorial. Información del número

Información legal y directorio

English abstracts

Lista de revisores 2025

Artículos completos

1. Metodologías e índices de segurança hídrica: uma revisão sistemática da aplicação em bacias e na indústria 267-285
Methodologies and indices: a systematic review of their application in basins and industry
[Jussara Ferreira-Santos, Renan Rodrigues Campos da Silva, Celso Bandeira de Melo Ribeiro](#)
2. Modelagem matemática do tratamento de dejetos bovino por biodigestão anaerobia 286-302
Mathematical modeling of bovine manure treatment by anaerobic digestion
[Vitheli de Oliveira Ocampos, Gabriela Pereira de Assis, Izabel Melz Fleck, Leandro Fleck](#)
3. Emissões de carbono e energia incorporada em projetos de edificações: empreendimento Porto Privilege em Salvador-Bahia 303-331|
Carbon emissions and embodied energy in buildings: Porto Privilege project in Salvador-Bahia
[Ângela Márcia Andrade Silva, José Célio Silveira Andrade, Isabelle Barbosa de Brito](#)
4. Spatio-temporal variability of dissolved oxygen in a large tropical semi-arid reservoir 332-352
[Tharcia Priscilla de Paiva Batista Matos, Alexandre Cunha Costa](#)
5. Alternativas de reúso de águas cinzas após tratamento químico 353-370
Alternatives for reusing gray water after chemical treatment
[Ranyere do Nascimento Lôbo, Rui Felipe de Miranda Rios, Jéssica Paula Oliveira Rodrigues, Marcelo Mendes Pedroza, Claudia da Silva Aguiar Rezende, Elaine da Cunha Silva Paz](#)

6. Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales El Gavilán y su impacto sobre la percepción de olores de los habitantes de Manta, provincia de Manabí, Ecuador. 371-384

Evaluation of the El Gavilán wastewater treatment plant and its impact on the odor perception of the residents of Manta, Manabí province, Ecuador

Hugo Miguel Cobeña Navarrete, Carlos Ricardo Delgado Villafuerte, Johnny Manuel Navarrete Álava, Francisco Javier Velásquez Intríago, Nancy T. Hernández de Guerrero, Randi J. Guerrero-Ríos

7. Projeto-piloto para estruturação da rede mineira de logística reversa 385-413

Pilot project for structuring the Minas Gerais' Reverse Logistics network

Mônica de Abreu Azevedo, Nina Rosa Fernandes Diniz, João Victor Alves Gomes Silva, Diego da Silva Marques

8. Um estudo de caso sobre a percepção de servidores em uma instituição pública da área da saúde acerca de suas atitudes ambientais 414-435

A case study about perception of employees in a public health institution about their environmental behavior

Ana Carolina Teles de Aquino, Otávio Augusto Antunes Dias, Fabiana Cristina Lima Barbosa, Valdir Lamim-Guedes, Marcos Paulo Gomes Mol

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

METODOLOGIAS E ÍNDICES DE SEGURANÇA HÍDRICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA APLICAÇÃO EM BACIAS E NA INDÚSTRIA

Jussara Ferreira-Santos¹
Renan Rodrigues Campos da Silva¹
* Celso Bandeira de Melo Ribeiro¹

METHODOLOGIES AND WATER SECURITY INDICES: A SYSTEMATIC REVIEW OF THEIR APPLICATION IN BASINS AND INDUSTRY

Recibido el 23 de abril de 2024. Aceptado el 22 de abril de 2025

Abstract

Water scarcity, intensified by climate change and population growth, represents a global challenge that directly affects water security and makes the industrial sector vulnerable due to its high demand for water in operational processes. This article presents a systematic review conducted according to the PRISMA methodology and the PICO strategy, aiming to identify and analyze methodologies used for water security assessment in different territorial and sectoral contexts, with emphasis on contributions and gaps related to the industrial sector. Several approaches for assessing water security, risk, and vulnerability were identified, notably multi-criteria methods such as AHP and its variations (FAHP, BWM, Delphi, entropy), fuzzy models (FCE), conceptual frameworks such as DPSIR and PSER, grey forecasting, and decision support systems (DSS). Many of these methodologies have been applied to the construction of indices and indicators for urban and rural water security analysis, water stress assessment, and water resources sustainability. The analysis of 26 studies revealed both established and emerging methods, often combined with analytical and geospatial tools to enhance the accuracy and applicability of results. Although the literature search explicitly included the term "industry," few direct applications were found, revealing a significant gap in the use of these methodologies in the sector. Nevertheless, the identified methods provide a robust basis for future adaptations capable of supporting diagnosis, forecasting, and strategic decision-making in industrial contexts and in territories under increasing water stress.

Keywords: multicriteria analysis, water resources, industrial sector, hydrographic basin, systematic review.

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.

* Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora. Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Martelos, Juiz de Fora, Minas Gerais. 36036-330. Brasil. Email: celso.bandeira@ufjf.edu.br

Resumo

A escassez hídrica, intensificada pelas mudanças climáticas e pelo crescimento populacional, representa um desafio global que afeta diretamente a segurança hídrica e, em particular, torna o setor industrial vulnerável devido à elevada demanda por água em seus processos. Este artigo apresenta uma revisão sistemática conduzida segundo a metodologia PRISMA e a estratégia PICO, com o objetivo de identificar e analisar as metodologias utilizadas para avaliação da segurança hídrica em diferentes contextos territoriais e setoriais, enfatizando as contribuições e lacunas relacionadas ao setor industrial. Foram identificadas diversas abordagens para avaliação da segurança hídrica, risco e vulnerabilidade, com destaque para métodos multicritério como AHP e suas variações (FAHP, BWM, Delphi, entropia), modelos fuzzy (FCE), estruturas conceituais como DPSIR e PSER, previsão cinza e sistemas de apoio à decisão (DSS). Muitas dessas metodologias foram aplicadas à construção de índices e indicadores voltados à análise de segurança hídrica urbana e rural, à avaliação de estresse hídrico e à sustentabilidade dos recursos hídricos. A análise de 26 estudos evidenciou tanto métodos consolidados quanto emergentes, frequentemente combinados com ferramentas analíticas e geoespaciais para aprimorar a precisão e a aplicabilidade dos resultados. Embora a busca bibliográfica tenha incluído explicitamente o termo “indústria”, poucas aplicações diretas foram encontradas, revelando uma lacuna significativa no uso dessas metodologias no setor. Ainda assim, os métodos identificados oferecem bases robustas para adaptações futuras, capazes de apoiar diagnósticos, previsões e decisões estratégicas em contextos industriais e em territórios sob crescente pressão hídrica.

Palavras-chave: análise multicritério, recursos hídricos, indústria, bacia hidrográfica, revisão sistemática.

Introdução

A gestão sustentável dos recursos hídricos é fundamental para o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental nos níveis local, regional e global. A falta de acesso à água em quantidade e qualidade adequadas pode gerar implicações socioeconômicas e ambientais severas, incluindo reduções expressivas no Produto Interno Bruto (PIB) (Hope *et al.*, 2012). A água é um recurso imprescindível para diversas cadeias produtivas, como a agricultura e a indústria, que dependem de sua disponibilidade para manter operações estáveis e competitivas.

A escassez de água, intensificada por mudanças climáticas e pelo crescimento populacional, representa um risco crescente à sustentabilidade das atividades industriais e à gestão de bacias hidrográficas. O aumento do estresse hídrico e a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos ampliam a vulnerabilidade de setores estratégicos, reforçando a necessidade de processos eficientes de gestão e estratégias de segurança hídrica.

As indústrias, grandes consumidoras de água, enfrentam desafios não apenas quanto ao suprimento direto, mas também em relação à previsibilidade hídrica nos territórios onde atuam (Fayer *et al.*, 2018). Nesta conjuntura, surgem metodologias específicas para avaliar a segurança hídrica, propor soluções e orientar a gestão integrada dos recursos. A avaliação nesse setor exige abordagens capazes de lidar com incertezas, integrar múltiplas dimensões e subsidiar tomadas de decisão em diferentes escalas.

Diversas propostas metodológicas combinam técnicas multicritério, lógica fuzzy, sensoriamento remoto, indicadores de desempenho e modelos de apoio à decisão. No campo da avaliação e gestão de recursos hídricos, há priorização de metodologias que abrangem índices, indicadores, avaliações de risco e de vulnerabilidade à escassez de água, além da gestão integrada. As principais técnicas identificadas incluem o processo de hierarquia analítica difusa AHP e suas variações, muitas vezes associado à matriz SWOT (Chitsaz e Azarnivand, 2017), e modelos fuzzy, como o FCE (Liu *et al.*, 2017), Fuzzy BWM-TOPSIS e Fuzzy BWM-AHP (Tu *et al.*, 2020). Essas abordagens frequentemente incorporam elementos locais (disponibilidade de água, variabilidade temporal e espacial, sazonalidade e qualidade), bem como projeções de demandas futuras e impactos das mudanças climáticas.

Diante desse cenário, a revisão sistemática se apresenta como uma ferramenta para compreender os sistemas de gestão de segurança hídrica e de análises de risco em contextos de indisponibilidade hídrica. Essa análise pode direcionar intervenções mais precisas e contribuir para o aprimoramento da gestão hídrica, especialmente no setor industrial.

Isso posto, o presente trabalho possui como objetivo identificar e analisar as metodologias utilizadas para a avaliação da segurança hídrica em diferentes contextos territoriais e setoriais, enfatizando as contribuições e lacunas relacionadas ao setor industrial, com base em uma revisão sistemática estruturada segundo a metodologia PRISMA e a estratégia PICO.

Metodologia

A revisão foi conduzida segundo as diretrizes do PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que asseguram transparência, reprodutibilidade e rigor na seleção, triagem e inclusão de estudos. Para a formulação da pergunta científica, adotou-se a estratégia PICO (População, Intervenção, Comparador e Resultado), amplamente utilizada para estruturar questões de pesquisa de forma objetiva e consistente, evitando formulações vagas que possam comprometer a qualidade das conclusões (Donato e Donato, 2019).

A aplicação da estratégia PICO permitiu delimitar o escopo da revisão, considerando: População (P): indústrias e territórios sob pressão hídrica, sujeitos a cenários de escassez; Intervenção (I): implementação de sistemas e metodologias para gestão da segurança hídrica e avaliação de risco; Comparador (C): diferentes abordagens metodológicas e suas combinações; Resultado (O): capacidade das metodologias de apoiar o diagnóstico, a previsão e a gestão integrada dos recursos hídricos, com potencial de aplicação no contexto industrial. Com base nesses elementos, formulou-se a pergunta central da pesquisa: “Quais metodologias de gestão da segurança hídrica e de análise de risco (I) são aplicadas em indústrias e territórios sob escassez de água (P) para apoiar o diagnóstico, a previsão e o direcionamento de intervenções na gestão de bacias hidrográficas (O), considerando diferentes abordagens metodológicas (C)?”

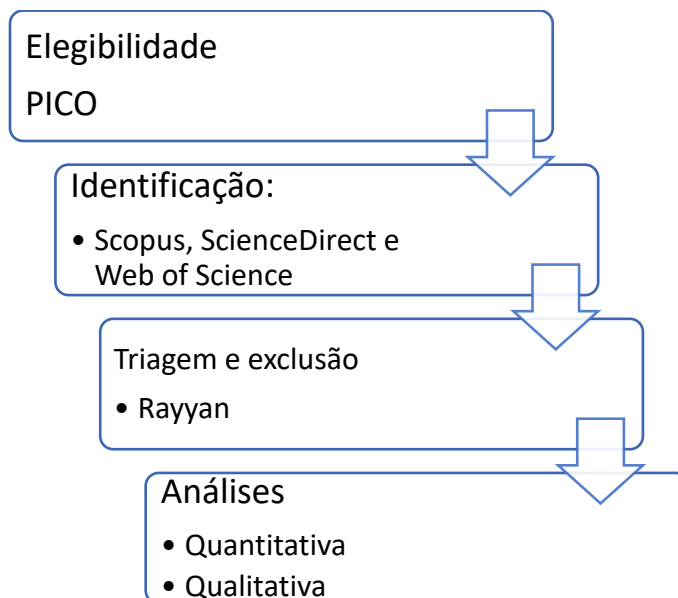


Figura 1. Fluxograma metodológico

Entre os critérios de elegibilidade foram incluídos os que abordavam a segurança hídrica em indústrias afetadas por indisponibilidade, utilizavam sistemas de gestão de segurança ou análises de risco para a previsibilidade e o direcionamento de intervenções. A inclusão considerou estudos que permitissem mensurar e avaliar através de índices e indicadores, ou apresentassem mapeamentos de bacias hidrográficas sobre a perspectiva da segurança e disponibilidade hídrica e previsibilidade. Não foram aplicadas restrições de idioma e data. Os critérios de exclusão dos estudos consideraram aqueles não disponíveis eletronicamente, outras revisões sistemáticas e capítulos de livros. Além disso, avaliou-se a não recepção aos critérios definidos e, portanto, não aderência à temática, como os direcionados à segurança alimentar, energia, saúde ambiental e monitoramento de metais pesados.

As buscas foram realizadas nas bases Scopus, ScienceDirect e Web of Science, utilizando palavras-chave estruturadas: ("industry") AND ("water availability" OR "surface water" OR "groundwater") AND ("risk management" OR "risk analysis" OR "water resources management") AND ("water security" OR "water shortage"). Foram realizadas adequações de acordo com os mecanismos, campos de busca individuais e aplicação de filtros de maneira a selecionar apenas artigos acadêmicos. A seleção foi realizada por meio do software Rayyan (Ouzzani *et al.*, 2016), e os resultados foram organizados conforme pode ser visualizado através do fluxograma PRISMA 2020 com o mapeamento do número de registros identificados, incluídos e excluídos trazido na Figura 2.

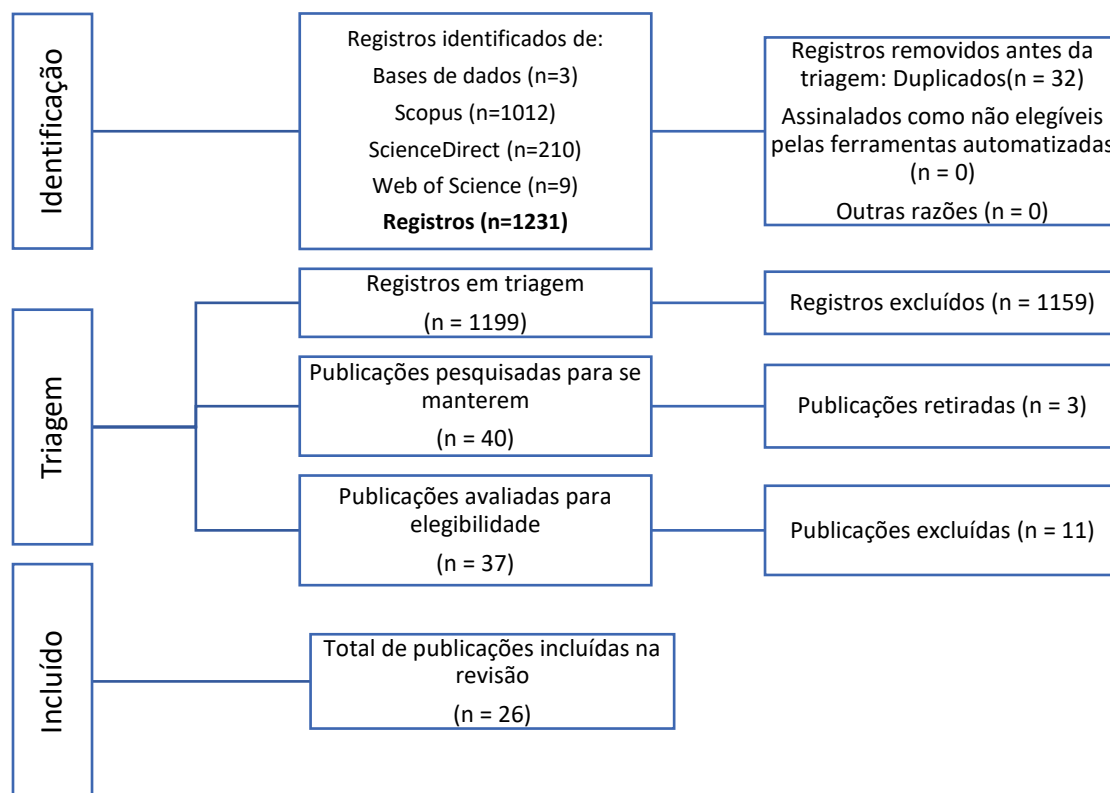


Figura 2. Fluxograma PRISMA 2020 para a identificação dos estudos através de bases de dados e registros

Resultados e discussão

Análise quantitativa

A pesquisa realizada nas bases de dados resultou em 1231 artigos encontrados, distribuídos entre Scopus (1012), ScienceDirect (210) e Web of Science (9). Após a inserção no software Rayyan, 32 artigos foram identificados como duplicatas e excluídos. O balanço final indicou que, dos 1199 documentos restantes, 1159 artigos (96.7%) foram excluídos por falta de aderência ao objeto de estudo, enquanto 40 (3.3%) foram pré-selecionados. Dessa forma, através da leitura completa dos 40 pré-selecionados, destes, 26 foram efetivamente incluídos para a síntese qualitativa e análise de seus resultados.

A análise do mapa de ocorrência de palavras-chave (Figura 3) dos 26 artigos selecionados demonstra uma forte correlação com a pergunta científica, confirmando a assertividade da estratégia de busca. Um achado notável é a alta frequência de estudos focados na China. O que sugere que o país é um importante centro de pesquisa sobre segurança hídrica, impulsionado pela alta demanda de água resultante do crescimento populacional, da expansão econômica e das mudanças nos padrões de consumo (Chen *et al.*, 2017).



Figura 3. Palabras-clave extraídas del Rayyan de los 26 artículos incluidos

A análise qualitativa dos artigos focou em coletar dados sobre as metodologias, índices, variáveis, ferramentas e dimensões de análise utilizadas. As dimensões consideradas nos estudos incluíram aspectos naturais (clima, disponibilidade hídrica), estruturais (sistemas de captação e distribuição), econômicos (custos, impactos financeiros), sociais (qualidade de vida, saúde) e de governança (políticas de gestão). Esta seção apresenta uma análise aprofundada das metodologias identificadas, agrupadas por suas abordagens principais, avaliando suas contribuições, limitações e potencial de aplicação em contextos industriais.

Para apresentar os resultados e dados extraídos dos artigos, foi utilizado um quadro de termos técnicos (Tabela 1), e um quadro resumo (Tabela 2) com intuito de familiarizar o leitor às principais metodologias empregadas apresentadas após as tabelas.

Tabela 1. Termos Técnicos extraídos dos artigos selecionados

Sigla	Termo
AHP	Analytical Hierarchy Process
BWM	Best Worst Method
SWOT	Strengths–Weaknesses–Opportunities–Threats
FCE	Fuzzy comprehensive evaluation
TOPSIS	Technique for order preference by similarity to ideal solution
VIC	Variable infiltration capacity
WDI	Water depletion index
DPSIR	Driving forces pressures states impacts responses
KPI	Key performance indicators
PSO-PEE	Projection pursuit model based on particle swarm optimization
PSER	Press - Status - Effect - Response

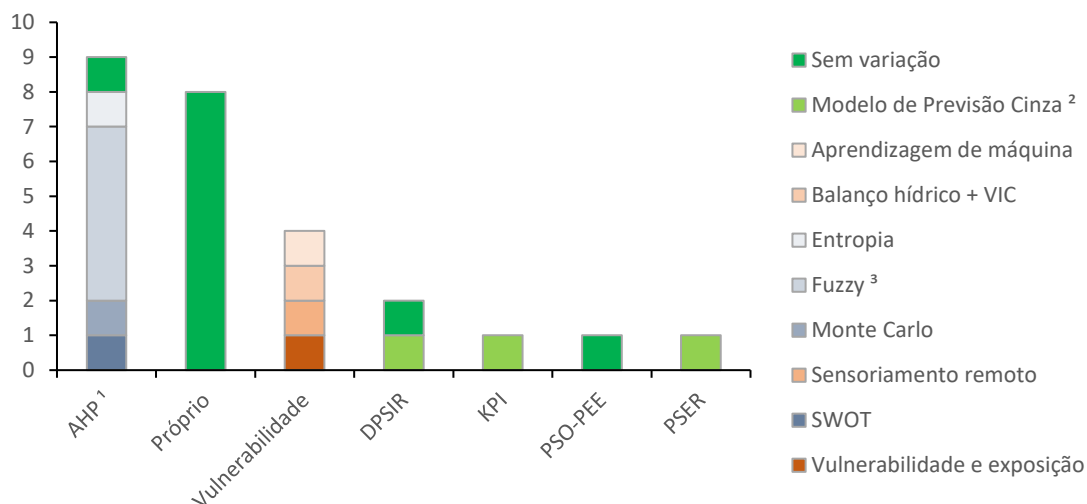
Tabela 2. Resumo dos artigos selecionados

Título	Autores	Produto	Metodologia	Variação	Área de estudo	Dimensão
Water Scarcity Management in Arid Regions Based on an Extended Multiple Criteria Technique	Chitsaz e Azarnivand (2017)	Estratégias para a mitigação da escassez hídrica	AHP; BWM	SWOT	Bacia/cidade	Natural, social e econômico
A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins	Pandey <i>et al.</i> (2011)	Índice de capacidade adaptativa	AHP	-	Bacia do Rio Bagmati, Nepal	Natural, estrutural, econômico e social
Fuzzy AHP integrated with GIS analyses for drought risk assessment: A case study from Upper Phetchaburi River Basin, Thailand	Wijitkosum e Sriburi (2019)	Avaliação de risco de seca	AHP	Fuzzy	Bacia do Alto Rio Phetchaburi, Tailândia	Natural e social
Water resources stress assessment and risk early warning—a case of Hebei Province China	Liu <i>et al.</i> (2017)	Índice de estresse hídrico	AHP	Fuzzy	Província de Hebei, China	Natural, econômico e social
Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin	Safavi, Golmohammadi e Sandoval-solis (2016)	Índice de Sustentabilidade dos Recursos Hídricos	AHP	Fuzzy	Bacia do rio Zayandehrud, no Irã	Legal, político, ambiental, social e econômico
Water risk assessment in supply chains	Schaefer <i>et al.</i> (2019)	Avaliação do risco hídrico	AHP	Monte Carlo	Global, empresarial	Natural e econômico
Regional water resources security evaluation based on a hybrid fuzzy BWM-TOPSIS method	Tu <i>et al.</i> (2020)	Avaliação dos níveis de segurança hídrica	AHP; TOPSIS	Fuzzy + BWM	Macro: Seis regiões no norte da China	Natural e social
Spatial differentiation and driving mechanism of rural water security in typical “engineering water depletion” of karst mountainous area - A lesson of Guizhou, China	Zhou <i>et al.</i> (2021)	Índice de segurança hídrica rural	AHP	Entropia	Província de Guizhou, China	Natural, estrutural, econômico e social
Sustainability assessment of water management at river basin level: Concept, methodology and application	Shafiei <i>et al.</i> (2022)	Avaliação da Sustentabilidade (AS)	AHP	Fuzzy + Delphi	Bacia de Mashhad, Irã	Técnico, ambiental, econômico e social

Título	Autores	Producto	Metodología	Variación	Área de estudio	Dimensión
Flexibility and intensity of global water use	Qin <i>et al.</i> (2019)	Índice de estresse hídrico	Próprio	Escassez, flexibilidade e variabilidade	6 continentes	Natural e social
Drivers of spatial and temporal variability of streamflow in the Incomati River basin	Saraiva Okello <i>et al.</i> (2015)	Indicadores de alteração hidrológica de vazão	Próprio	Indicadores de Alteração Hidrológica (AIH)	Bacia do rio Incomati, sul da África	Natural e social
Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China	Zhang <i>et al.</i> (2021)	Índice de segurança hídrica	Próprio	VIC e Método dos Detectores Geográficos	Bacia do rio Weihe, China	Natural, social e econômico
Can there be water scarcity with abundance of water? Analyzing water stress during a severe drought in Finland	Ahopelto <i>et al.</i> (2019)	Índice de depleção de água	Próprio	WDI	Finlândia	Natural
Spatiotemporal analysis of water resources system vulnerability in the Lancang River Basin, China	Gui, Chen e He (2021)	Índice de vulnerabilidade hídrica	Próprio	Sensibilidade, exposição, perigo e adaptabilidade	Bacia do Rio Lancang, China	Natural, econômico e social
China's water risk assessment and industrial source analysis based on the localization of WWF water risk assessment tools	Xiao, Gao e Su (2019)	Avaliação de risco hídrico	Próprio	Riscos físicos, riscos regulatórios e riscos de reputação	China	Natural e social
Perspectives of current and future urban water security in Iran	Alavijeh <i>et al.</i> (2021)	Índice de segurança hídrica urbana	Próprio	Previsão de vazão	Irã	Natural, estrutural, econômico e social
The growing water crisis in Central Asia and the driving forces behind it	Wang <i>et al.</i> (2022)	Índice de estresse hídrico (IAMS)	Próprio	Oferta e demanda de água (WSI) e poluição da água	Ásia Central	Ambiental/natural, econômico e social

Título	Autores	Producto	Metodología	Variação	Área de estudo	Dimensão
The vulnerability of thermoelectric power generation to water scarcity in China: Current status and future scenarios for power planning and climate change	Zheng <i>et al.</i> (2016)	Vulnerabilidade à escassez de água	Vulnerabilidade	Balanço hídrico + VIC	Unidades Administrativas de Bacias Hidrográficas Chinesas	Natural e estrutural
Assessing vulnerability to natural hazards: Impact-based method and application to drought in Washington state	Fontaine e Steinemann (2009)	Método de avaliação de vulnerabilidade VAM	Vulnerabilidade	Vulnerabilidade e exposição	Subsetores de Washington, EUA	-
New approach of water quantity vulnerability assessment using satellite images and GIS-based model: An application to a case study in Vietnam	Nguyen <i>et al.</i> (2020)	Índice de vulnerabilidade hídrica	Vulnerabilidade	Sensoriamento remoto	Provinciais e regiões do Vietnã	Natural, econômico e social
Risk assessment of water resource shortages in the Aksu River basin of northwest China under climate change	Yang <i>et al.</i> (2022)	Risco de seca	Vulnerabilidade	Aprendizagem de máquina	Bacia do Rio Aksu, China	Natural, estrutural, econômico e social
Measuring water security: A vital step for climate change adaptation	Babel <i>et al.</i> (2020)	Índice de Segurança Hídrica (WSI)	DPSIR	-	Cidade de Bangkok, Tailândia	Natural, estrutural, econômico e político
Comprehensive Evaluation Model for Urban Water Security: A Case Study in Dongguan, China	Cao <i>et al.</i> (2022)	Índice de segurança hídrica urbana	DPSIR	Modelo de Previsão Cinza	Dongguan, China	Natural, estrutural, econômico e social
Prediction of water security level for achieving sustainable development objectives in Saskatchewan, Canada: Implications for resource conservation in developed economies	Aalirezai <i>et al.</i> (2021)	Nível de segurança hídrica	KPI	Modelo de Previsão Cinza	Bacias de Saskatchewan, Canadá	Social e político
Development and utilization of water resources and assessment of water security in Central Asia	Wang <i>et al.</i> (2020)	Avaliação da segurança hídrica	PSO-PEE	-	Países da Ásia Central	Natural, estrutural, econômico e social
Influencing indicators and quantitative assessment of water resources security in karst region based on PSER model-the case of Guizhou	Zhou <i>et al.</i> (2019)	Avaliação da segurança hídrica	PSER	Modelo de Previsão Cinza + TOPSIS	Guizhou, China	Natural, estrutural, econômico e social

O gráfico demonstrando as diferentes metodologias e variações observadas na presente revisão sistemática pode ser visualizada através da Figura 4.



¹ Comparado com o TOPSIS em Tu et al. (2020) e com BWM em Chitsaz e Azarnivand (2017). ² Aplicado junto ao TOPSIS em Zhou et al. (2019). ³ Aplicado junto ao Delphi em Shafiei et al. (2022) e ao BWM em Tu et al. (2020). Sem variação equivale à metodologia sem associações de outras técnicas*

Figura 4. Gráfico de colunas empilhadas de metodologias e variações observadas.

Analytical Hierarchy Process - AHP

A Análise Hierárquica de Processos (AHP) foi uma das metodologias mais prevalentes, destacando-se uma clara evolução no seu uso. Dos 26 artigos triados sobre o tema, nove deles utilizaram a metodologia de Análise Hierárquica de Processos (AHP), representando cerca de 35% dos estudos selecionados entre os quais foi identificada uma alta variabilidade na abordagem de aplicação da metodologia. Isto porque, embora seja uma técnica robusta para a tomada de decisões multicritério (MCA), sua aplicação isolada, dependente de julgamentos de especialistas, possui limitações significativas para refletir adequadamente incertezas e subjetividades (Safavi et al., 2016; Wijitkosum & Sriburi, 2019). Essa fragilidade incentivou a literatura a buscar combinações com outras técnicas para mitigar suas desvantagens.

Uma das tendências mais notáveis é a integração do AHP com o Método Melhor-Pior (BWM). O estudo de Chitsaz e Azarnivand (2017) comparou o AHP isolado com o BWM-SWOT e demonstrou que o BWM oferece resultados superiores em termos de consistência e confiabilidade. Essa

abordagem, que prioriza estratégias de mitigação da escassez hídrica com base em múltiplos critérios de risco, destaca um caminho promissor para aprimorar a tomada de decisões. Outra variação, o BWM-TOPSIS, utilizada por Tu *et al.* (2020), reforça essa evolução, permitindo uma avaliação mais precisa ao derivar pesos dos indicadores de forma comparativa, superando a limitação do AHP de atribuir pesos de forma menos objetiva.

A combinação do AHP com a Lógica Fuzzy (FAHP) foi outra abordagem recorrente. Exemplos de Wijtkosum e Sriburi (2019) e Safavi *et al.* (2016) demonstram como o FAHP é eficaz ao lidar com a imprecisão e a subjetividade inerentes às avaliações complexas de segurança hídrica. Safavi *et al.* (2016) é particularmente relevante para o contexto industrial, pois utilizou o FAHP para avaliar a sustentabilidade hídrica em bacias, estabelecendo hierarquias que consideram explicitamente aspectos industriais, agrícolas e municipais. A integração com o Sistema de Informações Geográficas (GIS), como no trabalho de Wijtkosum e Sriburi (2019), fortalece essa abordagem ao permitir a visualização espacial dos riscos de seca.

Outras combinações sofisticadas incluem a simulação de Monte Carlo (MCAHP), aplicada por Schaefer *et al.* (2019). Esta técnica avança a AHP ao incorporar incerteza e oferecer uma interpretação probabilística dos resultados, calculando intervalos de confiança para os pesos. Esse método é de grande utilidade para medir riscos hídricos em locais de alta demanda de água, como em áreas com forte presença industrial. Por fim, o estudo de Zhou *et al.* (2021) e Shafiei *et al.* (2022) exemplificam a integração do AHP com o Método da Entropia e o método Delphi. Essas abordagens buscam aumentar a objetividade na determinação dos pesos, seja por meio da entropia de Shannon (Zhou *et al.*, 2021) ou por um consenso de especialistas (Shafiei *et al.*, 2022), oferecendo soluções para a subjetividade do AHP tradicional.

Implicações para o setor industrial: A evolução do AHP demonstra que as abordagens mais robustas para a gestão de recursos hídricos não se baseiam em métodos isolados, mas em combinações que mitigam suas limitações. As versões híbridas (FAHP, BWM-AHP, MCAHP) são particularmente promissoras para a indústria, pois permitem uma análise mais precisa e confiável para a avaliação de riscos hídricos em suas cadeias de valor e operações, considerando a complexidade das variáveis e a necessidade de lidar com incertezas. A combinação com GIS e métodos de ponderação mais objetivos, como a entropia, pode ajudar a criar ferramentas de apoio à decisão mais transparentes e replicáveis para o setor.

Metodologia própria

Oito estudos entre os analisados optaram por desenvolver metodologias próprias ou índices customizados para traduzir as particularidades do estresse hídrico em suas áreas de estudo. Embora essa abordagem seja flexível, ela levanta questões sobre a replicabilidade e a generalização dos

resultados, o que representa um desafio. No entanto, o valor dessas metodologias reside justamente na sua capacidade de focar em elementos específicos que modelos padronizados não capturam.

Exemplos de índices customizados ilustram essa abordagem. O estudo de Qin *et al.* (2019) criou o índice de estresse hídrico SFV (Escassez-Flexibilidade-Variabilidade), que incluiu a flexibilidade dos usos da água e a variabilidade histórica das vazões. O índice foi aplicado em bacias de seis continentes para analisar o consumo de 1980 a 2016 nos setores agrícola, energético e doméstico, comparando o consumo total e o consumo inflexível com o escoamento médio da região. De forma similar, o Índice de Alteração Hidrológica (IAH) de Saraiva Okello *et al.* (2015) foi aplicado na bacia semiárida do rio Incomati, utilizando dados de 33 estações para caracterizar os regimes hidrológicos com base em parâmetros ecológicos.

A integração de modelos e dados espaciais também é uma característica marcante dessas abordagens. Zhang *et al.* (2021) utilizaram o modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) e dados de serviços ecossistêmicos para simular padrões espaciais de segurança hídrica na Bacia do Rio Weihe, na China. Já o Índice de Segurança Hídrica (WSI), empregado por Wang *et al.* (2022) para a crise hídrica na Ásia Central, foi calculado como um indicador não espacial, utilizando parâmetros como temperatura, precipitação, população e PIB para refletir o grau de pressão sobre o uso da água em uma região. A combinação dessas abordagens mostra a diversidade de ferramentas para avaliar o problema em diferentes escalas e com distintos focos de análise.

A revisão também destacou abordagens que enfatizam contextos específicos. O estudo de Ahopelto *et al.* (2019) utilizou o Water Depletion Index (WDI) para analisar secas severas na Finlândia, um país com amplos recursos hídricos, ressaltando a necessidade de estratégias de gerenciamento mesmo em regiões de abundância. Além disso, a metodologia da WWF, aplicada por Xiao, Gao e Su (2019), foi particularmente relevante por estruturar a avaliação de risco em três categorias — riscos físicos, regulatórios e de reputação — e identificar setores industriais suscetíveis, oferecendo sugestões de gerenciamento. No entanto, o estudo apontou desafios de replicabilidade, ressaltando a dificuldade de transferir metodologias proprietárias para outros contextos sem ajustes.

Outras abordagens focadas em vulnerabilidade, como as de Gui, Chen e He (2021) e Alavijeh *et al.* (2021), criaram modelos customizados que integram fatores climáticos, sociais e econômicos. O trabalho de Alavijeh *et al.* (2021) é um exemplo robusto, utilizando o índice de segurança hídrica urbana (UWSI) para avaliar cinco dimensões e projetar tendências futuras de disponibilidade de água até 2100 com base em cenários de mudança climática.

Análise da vulnerabilidade

Quatro artigos abordaram a falta da disponibilidade hídrica através da realização da análise da vulnerabilidade de sistemas hídricos. Assim, a análise da vulnerabilidade de sistemas hídricos emergiu como uma abordagem robusta para compreender a suscetibilidade à escassez de água. Um padrão metodológico notável é a adoção de estruturas conceituais baseadas no framework do IPCC, que se baseiam nos três pilares: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Os estudos analisados aplicam essa estrutura de maneiras distintas, demonstrando sua flexibilidade.

O trabalho de Zheng *et al.* (2016) é um exemplo direto de aplicação para o setor industrial, ao avaliar a vulnerabilidade da geração de energia termelétrica à escassez hídrica na China. Para isso, foi desenvolvido um índice de vulnerabilidade que englobou múltiplos parâmetros, incluindo a dependência das usinas em relação ao fornecimento de água, a pressão exercida pelo abastecimento local, os efeitos das mudanças climáticas e as inadequações no planejamento territorial. A pesquisa, que utilizou o modelo hidrológico VIC para simular o escoamento anual entre 2021 e 2050, demonstra como é possível quantificar a dependência de um setor industrial e as implicações das mudanças climáticas.

Em contraste, Fontaine e Steinemann (2009), no Estado de Washington (EUA), e Nguyen *et al.* (2020), no Vietnã, exploram a mesma estrutura de avaliação, mas com metodologias de coleta de dados e análise diferentes. Enquanto Fontaine e Steinemann (2009) utilizaram questionários em escala Likert e validaram os resultados com três testes estatísticos rigorosos (Fisher, ANOVA, SNK), Nguyen *et al.* (2020) empregaram sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas (GIS). Contudo, o estudo de Nguyen *et al.* (2020) se depara com a limitação da ausência de consideração da disponibilidade de água doce e das taxas de retirada, um aspecto crucial para a avaliação de risco. A abordagem foi detalhada com um total de 27 indicadores, distribuídos entre os componentes de exposição (9), sensibilidade (6) e capacidade adaptativa (12). Essa comparação ilustra como a mesma estrutura conceitual pode ser adaptada para diferentes escalas e tipos de dados, desde a percepção de usuários até dados espaciais e climáticos.

O estudo de Yang *et al.* (2022) sintetiza essas abordagens, combinando a estrutura do IPCC com simulações hidrológicas e um modelo matemático que considera fatores socioeconômicos, como nível educacional e capacidade de carga. O modelo foi especialmente projetado para avaliar a vulnerabilidade do sistema de água considerando o desenvolvimento industrial e econômico da região, resultando em uma classificação mais precisa e na identificação de seus limites. A similaridade na aplicação de questionários entre este estudo e o de Fontaine e Steinemann (2009) reforça a validade da coleta de dados de percepção para enriquecer a modelagem quantitativa.

DPSIR

O modelo DPSIR (Driving Forces-Pressures-States-Impacts-Responses) se destaca como um framework conceitual, e não como uma metodologia rígida, oferecendo uma estrutura flexível para a criação de sistemas de indicadores. Essa flexibilidade é um de seus maiores méritos, permitindo a personalização de variáveis e a adaptação a diferentes contextos, como visto nos estudos de Babel *et al.* (2020) e Cao *et al.* (2022).

Babel *et al.* (2020) utilizaram o DPSIR para criar um Índice de Segurança Hídrica (WSI) urbano, com oito dimensões que vão do abastecimento, acessibilidade, qualidade e saneamento à produtividade de água, desastres, ambiente hídrico e governança. A inovação aqui reside na associação de indicadores com os critérios SMART (Específico, Mensurável, Atingível, Relevante, Temporal), garantindo que as métricas sejam acionáveis e alinhadas com intervenções práticas. Por sua vez, Cao *et al.* (2022) também desenvolveram um sistema de indicadores urbanos, mas com um conjunto diferente de 36 indicadores, agrupados em cinco categorias: recursos hídricos, qualidade da água, ecologia, uso da água e economia. Para a avaliação quantitativa, eles integraram um algoritmo de busca de projeção (PP), resultando no modelo DPSIR-PP. O estudo ainda empregou um modelo de previsão cinza para projetar tendências futuras com base em dados limitados, o que é um ponto de destaque.

A comparação entre os dois estudos demonstra a versatilidade do DPSIR para abordar a segurança hídrica de maneiras distintas. Enquanto o primeiro foca em indicadores mais qualitativos de gestão, o segundo busca uma abordagem mais quantitativa e preditiva. Ambos, no entanto, compartilham a capacidade de identificar as interações complexas entre o desenvolvimento socioeconômico e os recursos hídricos.

KPI - Indicador Chave de Desempenho

O estudo de Aalirezai *et al.* (2021), realizado na região de Saskatchewan, Canadá, é o único a utilizar Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs) como metodologia central para a avaliação da segurança hídrica. A principal contribuição dessa abordagem é a sua natureza pragmática e orientada para a gestão. O estudo utilizou sete KPIs específicos que relacionam disponibilidade, consumo, qualidade e risco da água, focando na medição de fatores críticos que podem ser monitorados e gerenciados ativamente.

O uso de um modelo de previsão cinza para projetar os KPIs futuros é um aspecto notável, pois eleva a aplicação dos indicadores de uma simples medição do passado para uma ferramenta preditiva. Essa técnica é particularmente útil para contextos com dados limitados e incertos, uma realidade comum na gestão de recursos hídricos. A aplicação do método, no entanto, sublinha a importância de adaptar a seleção de KPIs às características únicas de cada bacia hidrográfica e às necessidades dos tomadores de decisão locais, o que garante a relevância e a utilidade da ferramenta.

PSO-PEE - Projection Pursuit Model Based on Particle Swarm Optimization

O estudo de Wang *et al.* (2020) apresenta uma metodologia singular ao utilizar o modelo PSO-PEE (Projection Pursuit Model based on Particle Swarm Optimization), que se baseia em algoritmos de otimização para avaliar a segurança hídrica. A principal vantagem dessa abordagem é a sua capacidade de realizar uma otimização global eficaz e inteligente para determinar os pesos dos indicadores, superando as limitações de métodos que dependem exclusivamente de julgamento de especialistas.

O modelo incorpora a teoria da evolução biológica da população para analisar quatro camadas de critérios que impactam a segurança hídrica. A aplicação em cinco países da Ásia Central (Cazaquistão, Quirguistão, Tadjiquistão, Turcomenistão e Uzbequistão) demonstra a sua utilidade em contextos complexos. A seleção de indicadores foi detalhada em 16 camadas indicadoras (10 positivas e 6 negativas), mostrando a granularidade da análise, que aborda a oferta e a demanda de recursos hídricos e processos estocásticos. A metodologia determina os níveis de segurança hídrica com base nos valores de projeção dos indicadores, oferecendo uma avaliação quantitativa robusta. No entanto, a aplicação do PSO-PEE em novas regiões exige um ajuste cuidadoso para acomodar as particularidades da bacia de interesse, garantindo a validade da otimização.

PSER - Modelo de Pressão - Estado - Efeito – Resposta

O estudo de Zhou *et al.* (2019) utiliza o modelo PSER (Pressão-Estado-Efeito-Resposta) para a avaliação da segurança hídrica, sendo o único artigo a adotar essa abordagem. O mérito do PSER, similar ao DPSIR, reside em sua capacidade de oferecer uma visão sistêmica e causal das relações entre pressões, o estado dos sistemas hídricos, os efeitos resultantes e as respostas de gestão.

A metodologia utilizada é uma combinação poderosa de técnicas: o TOPSIS e o modelo abrangente relacional cinza. O TOPSIS é empregado para classificar as alternativas com base em múltiplos critérios, enquanto o modelo relacional cinza é fundamental para lidar com a incerteza e a incompletude de dados, uma condição comum em avaliações ambientais. A integração dessas duas ferramentas permitiu ao estudo identificar os principais fatores que influenciam a segurança hídrica em uma região cárstica de Guizhou, na China, no período de 2001 a 2015. A avaliação PSER proporcionou uma visão clara das fontes de pressão e da eficácia das medidas de resposta, mas o estudo aponta uma limitação importante: a ausência de uma análise do ciclo de recursos hídricos no sistema natural-social.

Conclusão

A análise dos 26 estudos incluídos nesta revisão sistemática permitiu identificar um conjunto diversificado de metodologias consolidadas e emergentes para avaliação da segurança hídrica, risco hídrico e vulnerabilidade em diferentes contextos. Foram observadas abordagens centradas na construção de índices (como segurança hídrica, segurança hídrica rural, sustentabilidade dos recursos hídricos, estresse

hídrico, vulnerabilidade hídrica, segurança hídrica urbana), uso de indicadores hidrológicos e avaliações direcionadas a risco, estresse, níveis de segurança e vulnerabilidade à escassez de água.

Dessa forma, as metodologias utilizadas na avaliação da segurança hídrica envolvem a Análise Hierárquica de Processos (AHP) e suas variações, como FAHP, BWM, Delphi, entropia, Monte Carlo e combinações com o método TOPSIS. Tais técnicas se mostraram particularmente eficazes em contextos que exigem a consideração de múltiplos critérios – qualitativos e quantitativos – permitindo maior robustez na definição de prioridades, no suporte à tomada de decisão e na construção de cenários preditivos. Modelos como FCE, PSER, DPSIR, VIC e previsão cinza também contribuíram para análises de sustentabilidade, risco e adaptação em ambientes complexos, inclusive sob a ótica da gestão integrada dos recursos hídricos.

A combinação de métodos multicritério com outras ferramentas analíticas e geoespaciais fortaleceu a capacidade de diagnóstico e prognóstico das abordagens aplicadas. Destacam-se, por exemplo, as integrações entre FAHP e SIG, entre AHP e simulação de Monte Carlo, entre entropia e AHP, bem como os modelos híbridos baseados em lógica Fuzzy com sistemas de apoio à decisão. Tais arranjos metodológicos permitiram avanços significativos na construção de índices compostos e na análise de vulnerabilidades.

Apesar de o termo "indústria" ter sido incluído nas palavras-chave da revisão, o processo de triagem não resultou em um grande número de artigos sobre índices de segurança hídrica aplicados a esse setor. Essa constatação evidencia uma lacuna significativa na literatura científica sobre o tema e pode ser preenchida pela adaptação das metodologias encontradas na revisão, que, apesar de não serem exclusivas para a indústria, oferecem bases sólidas para o planejamento territorial, a gestão de bacias com empreendimentos industriais e a análise de risco em cadeias de suprimento.

Verificou-se, ainda, uma tendência crescente de incorporação de elementos locais e temporais nas análises, incluindo variabilidade sazonal, disponibilidade espacial de recursos, qualidade da água e projeções futuras relacionadas a mudanças climáticas, aumento da demanda por energia e transformações demográficas. Esse direcionamento metodológico converge com a necessidade de avaliações mais contextualizadas, sobretudo em regiões críticas como bacias hidrográficas sob pressão hídrica crescente.

Por fim, os resultados desta revisão oferecem subsídios teóricos e práticos relevantes para o avanço da modelagem e da gestão da segurança hídrica, com potencial para orientar escolhas metodológicas adaptadas ao setor industrial. Ao mesmo tempo, reforçam a importância de ampliar o desenvolvimento e a aplicação de ferramentas específicas voltadas a esse segmento, considerando os riscos crescentes associados à escassez de água e a urgência de soluções resilientes e sustentáveis para o uso racional dos recursos hídricos.

Agradecimientos

Os autores agradecem à ArcelorMittal pelo apoio à pesquisa via projeto P&D, e à Universidade Federal de Juiz de Fora pelo incentivo à educação.

Referências bibliográficas

- Aalirezaei, A., Khan, M. S. A., Kabir, G., Ali, S. M. (2021) Prediction of water security level for achieving sustainable development objectives in Saskatchewan, Canada: Implications for resource conservation in developed economies. *Journal of Cleaner Production*, **311**, 127521. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127521>
- Ahopelto, L., Veijalainen, N., Guillaume, J. H., Keskinen, M., Marttunen, M., Varis, O. (2019) Can there be water scarcity with abundance of water? Analyzing water stress during a severe drought in Finland. *Sustainability*, **11**(6), 1548. <http://doi.org/10.3390/su11061548>
- Alavijeh, N. K., Falahi, M. A., Shadmehri, M. T. A., Salehnia, N., Larsen, M. A. D., Drews, M. (2021) Perspectives of current and future urban water security in Iran. *Journal of Cleaner Production*, **321**, 129004. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129004>
- Babel, M. S., Shinde, V. R., Sharma, D., Dang, N. M. (2020) Measuring water security: A vital step for climate change adaptation. *Environmental Research*, **185**, 109400. <http://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109400>
- Cao, J., Yan, Z., Wan, J., Wang, Y., Ye, G., Long, Y., Xie, Q. (2022) Comprehensive evaluation model for urban water security: A case study in Dongguan, China. *Water*, **14**(23), 3957. <http://doi.org/10.3390/w14233957>
- Chang, D.-Y. (1996) Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, **95**, 649-655. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](http://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2)
- Chen, W., Wu, S., Lei, Y., Li, S. (2017) China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water. *Ecological Indicators*, **74**, 321-333. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.038>
- Chitsaz, N., Azarnivand, A. (2017) Water scarcity management in arid regions based on an extended multiple criteria technique. *Water Resources Management*, **31**, 233-250. <http://doi.org/10.1007/s11269-016-1521-5>
- Fayer, G. C., Pereira, J. C., Ribeiro, L. G., Ferreira, P. M., Bolotari Junior, N. (2018). Análise de riscos aplicadas aos aspectos hídricos de usinas siderúrgicas utilizando as ferramentas de Analytic Hierarchy Process (AHP) e Bayesian Belief Networks (BBN). *73º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 1976-1988.
- Fontaine, M. M., Steinemann, A. C. (2009) Assessing vulnerability to natural hazards: Impact-based method and application to drought in Washington State. *Natural Hazards Review*, **10**(1), 11-18. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2009\)10:1\(11\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2009)10:1(11))
- Gui, Z., Chen, X., He, Y. (2021) Spatiotemporal analysis of water resources system vulnerability in the Lancang River Basin, China. *Journal of Hydrology*, **601**, 126614. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126614>
- Hope, R., Hansen, K., Mutembwa, M., Schlessinger, S. (2012) *Water security, risk and society – Key issues and research priorities for international development*. Synthesis report submitted to UK Collaborative on Development Sciences by Oxford University Water Security Network.
- Liu, M., Wei, J., Wang, G., Wang, F. (2017) Water resources stress assessment and risk early warning – A case of Hebei Province, China. *Ecological Indicators*, **73**, 358-368. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.048>
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Nguyen, H. Q., Luu, C., Dang, K. B., Li, Y., Zhang, X. (2020) New approach of water quantity vulnerability assessment using satellite images and GIS-based model: An application to a case study in Vietnam. *Science of the Total Environment*, **737**, 139784. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139784>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., Elmagarmid, A. (2016) Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, **5**, 210. <http://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>

- Pandey, V. P., Babel, M. S., Shrestha, S., Kazama, F. (2011) A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins. *Ecological Indicators*, **11**(2), 480-488.
<http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.07.003>
- Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J. P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., Li, X., Crowell, S., Wu, X., Doughty, R., Zhang, Y., Wang, X., Chen, B., Zhang, C., Song, L., Liu, F., Narteau, C., Wang, T., Niu, Z., Liu, Q., Yao, Y., Chen, J., Norouzi, H., Fernandez-Moran, R., Mialon, A., Law, B. E., Dirmeyer, P. A., Dolman, A. J., Ozdogan, M., Bible, K., McCabe, M. F., Van Der Schalie, R., Wigneron, J. P., Fan, L., Ciais, P., Brandt, M. (2019) Flexibility and intensity of global water use. *Nature Sustainability*, **2**(6), 515-523. <http://doi.org/10.1038/s41893-019-0294-5>
- Safavi, H. R., Golmohammadi, M. H., Sandoval-Solis, S. (2016) Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology*, **539**, 625-639. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.064>
- Saraiva Okello, A. M. L., Masih, I., Uhlenbrook, S., Jewitt, G. P. W., Van Der Zaag, P., Riddell, E. (2015) Drivers of spatial and temporal variability of streamflow in the Incomati River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**(2), 657-673. <http://doi.org/10.5194/hess-19-657-2015>
- Schaefer, T., Udenio, M., Quinn, S., Fransoo, J. C. (2019) Water risk assessment in supply chains. *Journal of Cleaner Production*, **208**, 636-648. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.090>
- Shafiei, M., Rahmani, M., Gharari, S., Davary, K., Abolhassani, L., Teimouri, M. S., Ghareisifard, M. (2022) Sustainability assessment of water management at river basin level: Concept, methodology and application. *Journal of Environmental Management*, **316**, 115201.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115201>
- Tu, Y., Chen, K., Wang, H., Li, Z. (2020) Regional water resources security evaluation based on a hybrid fuzzy BWM-TOPSIS method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**(14), 4987.
<http://doi.org/10.3390/ijerph17144987>
- Wang, X., Chen, Y., Li, Z., Fang, G., Wang, Y. (2020) Development and utilization of water resources and assessment of water security in Central Asia. *Agricultural Water Management*, **240**, 106297.
<http://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106297>
- Wang, X., Chen, Y., Fang, G., Li, Z., Liu, Y. (2022) The growing water crisis in Central Asia and the driving forces behind it. *Journal of Cleaner Production*, **378**, 134574. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134574>
- Wijitkosum, S., Sriburi, T. (2019) Fuzzy AHP integrated with GIS analyses for drought risk assessment: A case study from upper Phetchaburi River Basin, Thailand. *Water*, **11**(5), 939. <http://doi.org/10.3390/w11050939>
- Xiao, Z., Gao, J., Su, Y. (2019) China's water risk assessment and industrial source analysis based on the localization of WWF water risk assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, **78**, 106285.
<http://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106285>
- Yang, P., Zhang, S., Xia, J., Chen, Y., Zhang, Y., Cai, W., Wang, W., Wang, H., Luo, X., Chen, X. (2022) Risk assessment of water resource shortages in the Aksu River Basin of northwest China under climate change. *Journal of Environmental Management*, **305**, 114394. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114394>
- Zhang, C., Li, J., Zhou, Z., Sun, Y. (2021) Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, **120**, 106974.
<http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106974>
- Zheng, X., Wang, C., Cai, W., Kumm, M., Varis, O. (2016) The vulnerability of thermoelectric power generation to water scarcity in China: Current status and future scenarios for power planning and climate change. *Applied Energy*, **171**, 444-455. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.030>
- Zhou, F., Su, W., Zhang, F. (2019) Influencing indicators and quantitative assessment of water resources security in karst region based on PSER model – The case of Guizhou. *Sustainability*, **11**(20), 5671.
<http://doi.org/10.3390/su11205671>

- Zhou, F., Zhang, W., Su, W., Peng, H., Zhou, S. (2021) Spatial differentiation and driving mechanism of rural water security in typical “engineering water depletion” of karst mountainous area – A lesson of Guizhou, China. *Science of the Total Environment*, **793**, 148387. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148387>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (1995) *Method 551.1: Determination of chlorination disinfection byproducts, chlorinated solvents, and halogenated pesticides/herbicides in drinking water by liquid-liquid extraction and gas chromatography with electron-capture detection*. Relatório 1.0, 61 pp.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (2009) *National primary drinking water regulation*. Relatório EPA HQ-OW-2023-0572, 23 pp.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency (2002) *Trihalometanes in drinking water: sampling, analysis, monitoring and compliance*. Relatório EPA 570/9-83-002, 53 pp.
- Valentini, M. H. K., Santos, G. B., Franz, H. S., Loebens, L., Guedes, H. A. S., Vieira, B. M., Romani, R. F. (2021) Análise estatística de correlação e de variância do monitoramento da água bruta da Estação de Tratamento de Água Terras Baixas-Pelotas/RS. *Revista Thema*, **19**(3), 600-614. Acesso em 14 de março de 2024, disponível em: <https://doi.org/10.15536/thema.V19.2021.600-614.1702>
- Wu, J., He, F., Xu, D., Wang, R., Zhang, X., Xiao, E., Wu, Z. (2011) Phosphorus removal by laboratory-scale unvegetated vertical-flow constructed wetland systems using anthracite, steel slag and related blends as substrate. *Revista Water Science and Technology*, **63**(11), 2719-2724. Acesso em 20 de janeiro de 2024, disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2011.573>
- Yang, F., Antonietti, M. (2020) Artificial humic acids: sustainable materials against climate change. *Revista Advanced Science*, **7**(1), 1902992. Acesso em 01 de fevereiro de 2024, disponível em: <https://doi.org/10.1002/advs.201902992>

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO TRATAMENTO DE DEJETO BOVINO POR BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Vitheli de Oliveira Ocampos¹

Gabriela Pereira de Assis¹

Izabel Melz Fleck¹

* Leandro Fleck¹

MATHEMATICAL MODELING OF BOVINE MANURE TREATMENT BY ANAEROBIC DIGESTION

Recibido el 23 de abril de 2024. Aceptado el 22 de abril de 2025

Abstract

Brazilian livestock stands out worldwide, however it generates organic waste that requires adequate treatment to avoid environmental impacts. The present study is based on the hypothesis that anaerobic digestion can be used for the efficient treatment of livestock waste. Bovine manure from beef cattle was used as substrate and sludge from an anaerobic starch biodigester was used as inoculum. The factors inoculum mixing ratio (IMR) (%) and operating time (OT) of the anaerobic biodigesters (days) were controlled, with their effects on the color, turbidity and COD parameters being evaluated using a CCRD. The highest efficiency of the system was observed for turbidity removal (96.94%). The IMR factor, quadratic term, had a significant effect on the removal of turbidity and color. Although COD removal was not high, similar results were observed in the literature. The mathematical model for turbidity was statistically significant, presenting a p-value of 0.03. The biogas produced by experimental test 08, showed 82.0% methane, 16.0% carbon dioxide and a total absence of hydrogen sulfide. The anaerobic biodigestion technique is indicated for the treatment of cattle waste using starch effluent biodigester inoculum, however it is suggested that researchers in the area carry out additional research under experimental conditions different from those tested in the present study.

Keywords: bioenergy, biogas, organic matter, livestock.

¹ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Brasil.

* Autor correspondal: Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Mundo Novo, Br. 163, n. 235, Bairro Universitário, Mundo Novo, Mato Grosso do Sul, Brasil, CEP 79980-000. Email: leandro.fleck@uems.br

Resumo

A pecuária brasileira se destaca em nível mundial, entretanto gera resíduos orgânicos que necessitam de tratamento adequado para evitar impactos ambientais. O presente estudo está baseado na hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento de dejetos da pecuária. Foi utilizado como substrato dejetos bovino de gado de corte e como inóculo lodo de um biodigestor anaeróbio de fecalária. Foram controlados os fatores proporção de mistura do inóculo (PMI) (%) e tempo de operação (TO) dos biodigestores anaeróbios (dias), sendo seus efeitos sobre os parâmetros cor, turbidez e DQO, avaliados utilizando-se um DCCR. A maior eficiência do sistema foi observada para a remoção de turbidez (96.94%). O fator PMI, termo quadrático, exerceu efeito significativo sobre a remoção de turbidez e cor. Embora a remoção de DQO não tenha sido elevada, observa-se resultados semelhantes na literatura. O modelo matemático para a turbidez foi estatisticamente significativo, apresentando p-valor de 0.03. O biogás produzido pelo ensaio experimental 08, apresentou 82.0% de metano, 16.0 % de dióxido de carbono e ausência total de sulfeto de hidrogênio. A técnica de biodigestão anaeróbia é indicada para o tratamento de dejetos bovinos com a utilização de inóculo de biodigestor de efluente de fecalária, entretanto sugere-se que pesquisadores da área façam pesquisas adicionais em condições experimentais diferentes das testadas no presente estudo.

Palavras-chave: bioenergia, biogás, matéria orgânica, pecuária.

Introdução

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o Brasil apresenta 234,4 milhões de cabeças de gado, sendo que 18 milhões estão concentrados no MS. Segundo análise do 1º trimestre de 2023, Mato Grosso do Sul foi o 7º no ranking nacional, contabilizando 14 mil cabeças de bovinos abatidos (IBGE, 2023). Paralelamente, no ranking da cadeia produtiva do leite e derivadas, o Brasil está em 3º lugar com mais de 34 bilhões de litros por ano, sendo produzido em 98% dos municípios brasileiros (MAPA, 2024; IBGE, 2022). No Estado de Mato Grosso do Sul (MS), a produção de leite é de 1.34 milhões de litros por dia, dados que poderiam ser melhorados com a inserção de novas tecnologias e profissionalização dos envolvidos no setor produtivo (AGRAER, 2023).

A pecuária, a exemplo das demais atividades rurais gera resíduos orgânicos, que podem causar poluição como resultado da emissão de metano (Albuquerque *et al.*, 2022), ocasionando o aumento do fenômeno conhecido como efeito estufa (Pasquelini, 2020). Este fator tem sido determinante para o avanço tecnológico em pesquisas, cujos estudos visam a redução dos impactos ambientais provenientes da pecuária mundial (Alan; Köker, 2023).

Os resíduos de bovinos, conforme descrito por Mayo *et al.* (2019), em decorrência do contato direto com os cursos d'água, causa a poluição hídrica, devido a presença de matéria orgânica e nutrientes, a exemplo do nitrato. Segundo Gomes *et al.* (2014), altas concentrações de nutrientes podem acarretar mortalidade de espécies aquáticas e aumento de patógenos. Para que os impactos ambientais resultantes da pecuária sejam reduzidos, é necessário o tratamento prévio desses materiais para posterior destinação final no ecossistema.

Neste contexto, conforme Feitosa e Matos (2021) apontam, os resíduos agropecuários submetidos a diferentes tipos de tratamentos biológicos, apresentam uma série de benefícios significativos, tais como a produção de composto orgânico, produção de biofertilizantes, geração de biogás e bioetanol.

No âmbito dos tratamentos biológicos, merece especial destaque a técnica de biodigestão anaeróbia, a qual é capaz de transformar uma ampla variedade de biomassa em biogás e biofertilizante, de maneira econômica e ecologicamente responsável (RICHARDS; YABARD, 2023). Partindo desse princípio, é notório que a prática da utilização de esterco, proveniente da pecuária bovina, oferece soluções eficientes para a diminuição de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) (Esteves *et al.*, 2019).

Segundo Richards e Yabard (2023) o biogás, constituído predominantemente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), é um valioso subproduto derivado do tratamento anaeróbio de resíduos agrícolas, apresentando diversas vantagens, como a redução de emissões gasosas e a substituição de fontes fósseis tradicionais de energia.

Estudos recentes têm explorado a aplicação de biodigestores anaeróbios para o tratamento de resíduos pecuários, destacando não apenas o potencial de mitigação de impactos ambientais, mas também a recuperação energética por meio da produção de biogás. Corroborando com essa questão, Martins *et al.* (2024), Albuquerque *et al.* (2022) e Esteves *et al.* (2019) apontam a importância do processo de biodigestão anaeróbia para o tratamento de resíduos da pecuária, entretanto, é necessário o entendimento de que a eficiência do processo depende de fatores operacionais que influenciam diretamente no metabolismo microbiano como, por exemplo, a proporção de inóculo, tempo de retenção hidráulica e características físico-químicas do substrato.

Trabalhos como os de Fleck *et al.* (2017) e Assis *et al.* (2023) demonstraram que o uso de inóculos provenientes de efluentes industriais, como de feculárias, pode acelerar a adaptação microbiológica e aumentar a estabilidade operacional. Além disso, abordagens de Delineamento Composto Central Rotacional têm sido empregadas para otimizar variáveis operacionais e desenvolver modelos matemáticos capazes de prever o desempenho do processo, contribuindo para a aplicação em escala real (Cancelier *et al.*, 2015; Leite *et al.*, 2021; Variani; Kripka, 2021).

Neste contexto, o presente estudo está baseado na hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento de dejetos da pecuária, utilizando inóculo de biodigestor aplicado ao tratamento de efluentes de feculária, em que modelos matemáticos poderão ser gerados para a simulação de cenários que potencializem o aprimoramento da técnica em condições reais de operacionalização de biodigestores anaeróbios.

Material e métodos

Local de Estudo

O trabalho foi realizado no município de Mundo Novo, situado no extremo sul do estado de Mato Grosso do Sul, fazendo divisa com o país Paraguai e com o estado do Paraná. O município possui área de 478,380 km², com a estimativa de 19.193 habitantes e densidade demográfica em 40,12 habitantes/km² (IBGE, 2022). O município está localizado nas coordenadas 23°56' 17" S e 54°16' 15" O, com altitude de 324 metros acima do nível do mar. A cidade dispõe de um clima temperado, com temperatura média de 28 °C no verão e de 11 °C no inverno.

Coleta e armazenamento do substrato

Foi utilizado como substrato para a condução dos ensaios experimentais de biodigestão anaeróbia, dejetos bovinos originários de gado de corte, criados predominantemente a pasto. Após coletado, o substrato foi armazenado em condições de congelamento, a -5 °C, para que as características físico-químicas não fossem alteradas até o momento de uso para a realização dos ensaios experimentais.

Caracterização do substrato

A fim de padronizar as características físico-químicas, o dejetos bovinos foi coletado em um único dia, em volume suficiente para atender a demanda de todos os ensaios experimentais. A caracterização prévia do substrato foi realizada utilizando APHA (2012); Carmo e Silva (2012) e Matos (2016), sendo observado pH de 7.08, 74.3% de sólidos e 11.69 Dag/kg de matéria orgânica.

Inóculo

Foi utilizado como inóculo para o processo de biodigestão anaeróbia o lodo de um biodigestor anaeróbio aplicado ao tratamento da água residuária da produção de fécula de mandioca. Para cada condição experimental do delineamento de tratamentos foi realizada a aclimação da biomassa às novas condições de operação, em mistura com o dejetos bovinos, cujas proporções foram definidas em ensaios preliminares.

Monitoramento do processo

Para monitorar os níveis de acidez e/ou alcalinidade intrínsecos ao sistema, foi utilizado como instrumento de apoio um pHmetro de bancada (pH Pro - Line Lab). Para a correção do pH, utilizou-se soluções de hidróxido de sódio (NaOH) 6 mol e solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 20% para obter valores desejáveis na faixa de 7.0, sendo este o pH ideal para o crescimento dos microrganismos anaeróbicos (Chen *et al.*, 2015). Para garantir a continuidade da atividade microbiológica, os biodigestores foram monitorados diariamente, para cada ensaio experimental.

Módulo experimental e coleta das amostras

Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizado um módulo experimental constituído por garrafas de polietileno tereftalato (PET) com volume útil de 1 L, as quais foram imersas em Banho-Maria digital (SP Labor), com o controle de temperatura definido em 35 °C, sendo está a temperatura sugerida por Kwietniewska e Tys (2014). Os reatores anaeróbios foram operados em sistema de batelada, apresentando uma saída/entrada para coleta de amostras e ajuste de pH.

Amostras do substrato foram coletadas no início e ao final de cada ensaio experimental para avaliar a eficiência de remoção de cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), utilizando respectivamente os seguintes métodos e instrumentos analíticos: colorímetro de bancada, turbidímetro de bancada e método analítico 5220D (APHA, 2012).

Preparo dos substratos

Após a coleta, para o preparo do substrato a ser utilizado na biodigestão anaeróbia, inicialmente foi realizada a análise de determinação de sólidos totais. Para isso, foram pesados aproximadamente 30 g de dejetos de bovinos, em três cadinhos, para a determinação do peso úmido (PU). Em seguida, os cadinhos foram levados para a estufa à 105 °C, até atingirem peso constante, de forma a determinar o peso seco (PS). Seguindo recomendações de Matos (2016), o teor de sólidos totais foi quantificado por meio da Equação (2), a partir da Equação (1):

$$U = \frac{PU-PS}{PU} \times 100$$

Equação (1)

$$ST = 100 - U$$

Equação (2)

Em que:

U = teor de umidade, em %;

ST = teor de sólidos totais, em %;

PU = peso úmido da amostra, em g;

PS = peso seco da amostra, em g.

A partir dos resultados observados na análise de sólidos totais, foi determinado a quantidade de água destilada a ser adicionada ao dejetos bovino, a fim de se obter uma concentração de 8% de sólidos totais, conforme recomendado por Matos (2016).

Delineamento de tratamentos

Foram controlados os fatores proporção de mistura do inóculo (PMI) (%) e tempo de operação (TO) dos biodigestores anaeróbios (dias), sendo seus efeitos sobre os parâmetros cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), avaliados utilizando-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), ou seja, um esquema fatorial de tratamentos 2², incluindo 4 ensaios fatoriais, 4 ensaios axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios.

Na Tabela 1 observa-se a matriz do delineamento de tratamentos com os valores codificados e reais dos fatores em estudo, sendo os valores reais definidos com base em ensaios experimentais preliminares.

Tabela 1. Delineamento de tratamentos

Ensaio Experimental	*PMI – Valor codificado	PMI – Valor real (%)	TO- Valor codificado	**TO- Valor real (dias)
1	-1	6.33	-1	9.75
2	-1	6.33	+1	18.25
3	+1	17.67	-1	9.75
4	+1	17.67	+1	18.25
5	-1.41	4.00	0	14.00
6	1.41	20.00	0	14.00
7	0	12.00	-1.41	8.00
8	0	12.00	1.41	20.00
9	0	12.00	0	14.00
10	0	12.00	0	14.00
11	0	12.00	0	14.00

*PMI – Proporção de mistura do inóculo; **TO – Tempo de Operação

A Proporção de Mistura do Inóculo (PMI) corresponde à fração percentual, em base de massa úmida, do inóculo proveniente do biodigestor de efluente de fecularia em relação à massa total da mistura inicial (inóculo + dejetos bovinos) utilizada no reator. Por exemplo, um valor de PMI de 12% indica que, para cada 100 g de mistura inicial, 12 g correspondem ao inóculo e 88 g ao dejetos bovinos.

Os níveis de PMI e de Tempo de Operação (TO) adotados no presente estudo foram definidos a partir de ensaios preliminares realizados previamente, visando contemplar condições operacionais representativas de sistemas em escala laboratorial, sem comprometer a estabilidade microbiológica. Para a construção do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), optou-se por valores mínimos e máximos de PMI de 4% e 20%, respectivamente, e de TO de 8 a 20 dias, de forma a possibilitar a avaliação de respostas tanto em condições reduzidas quanto ampliadas de tempo de operação e proporção de inóculo.

No DCCR, a repetição é realizada exclusivamente no ponto central, pois este é utilizado para estimar o erro puro experimental e verificar a reprodutibilidade do sistema, sem necessidade de replicar as demais combinações fatoriais. Assim, cada condição experimental foi conduzida uma única vez, com exceção do ponto central, que foi repetido três vezes para garantir a robustez estatística, reduzindo o número total de ensaios sem comprometer a qualidade do ajuste do modelo, além de contribuir para minimizar efeitos de deriva temporal e garantir maior robustez estatística ao ajuste do modelo.

Geração de modelos matemáticos

Para cada variável resposta (cor, turbidez e demanda química de oxigênio) foi gerado um modelo matemático quadrático representativo do processo, obtido a partir do ajuste estatístico dos resultados correspondentes a todos os ensaios do delineamento de tratamentos. O modelo matemático codificado que foi ajustado a partir dos dados experimentais, é apresentado na Equação 3.

$$\text{Variável resposta: } a_1 + a_2\text{PMI} + a_3\text{PMI}^2 + a_4\text{TO} + a_5\text{TO}^2 + a_6\text{PMI} \times \text{TO} \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

a = coeficientes que serão ajustados a partir dos dados experimentais.

PMI = valor codificado da proporção de mistura do inóculo.

TO = valor codificado do tempo de operação.

A significância estatística dos modelos matemáticos originados no sistema de tratamento anaeróbio de dejetos bovino, foi testada pela Análise de Variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 90%.

Análise da produção de biogás

A análise da qualidade do biogás produzido pelo sistema de tratamento anaeróbio de dejetos bovinos, foi realizada utilizando um autoanalisador portátil de biogás (Confor BM4S). Foram consideradas as concentrações de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S). Devido ao volume de biogás produzido ser o fator limitante para a aplicação do autoanalisador, optou-se por analisar o biogás produzido no ensaio experimental número 8, o qual apresentou o maior tempo de operação do sistema (20 dias).

Resultados e discussão

Análise de eficiência da biodigestão anaeróbia

Dentre os três parâmetros avaliados, observa-se que as maiores eficiências foram obtidas para a remoção de turbidez e cor, o que por consequência pode ser um indicativo de elevada remoção de sólidos do sistema de tratamento (Tabela 2). O processo de remoção de matéria orgânica (em termos de DQO) não apresentou resultados desejáveis, uma vez que, a maior eficiência foi de 56.11%. É importante destacar que este resultado não inviabiliza a aplicação da biodigestão anaeróbia para o tratamento de dejetos bovinos, quando o objetivo for a remoção de matéria orgânica, mas indica que novos estudos podem ser desenvolvidos, com diferentes faixas de PMI e TO.

Embora os resultados não sendo expressivos em termos de remoção de DQO, encontram-se na literatura trabalhos que obtiveram resultados semelhantes ao presente estudo, a exemplo do que foi relatado por Costalonga *et al.* (2019), os quais ao caracterizarem o afluente e o efluente da bovinocultura leiteira, tratado em biodigestor anaeróbio associado com um ciclo de recirculação, obtiveram remoção de 65.00% de DQO.

Considerando que para o presente estudo utilizou-se inóculo de um biodigestor aplicado ao tratamento da água residuária de fecularia, Fleck *et al.* (2017), otimizaram as condições operacionais de um reator anaeróbio aplicado ao tratamento de águas residuárias da produção de fécula de mandioca. No estudo realizado, os autores constataram remoção máxima de DQO de 96.82%, valores superiores ao presente estudo. Estes resultados confirmam a atividade microbiológica do inóculo que foi utilizado, uma vez que o mesmo é proveniente da mesma unidade agroindustrial utilizada por Fleck *et al.* (2017), corroborando que a eficiência do sistema para o tratamento de dejetos bovinos, pode ser melhorada em condições diferentes do delineamento experimental.

Tabela 2. Eficiência de remoção de parâmetros ambientais pela biodigestão anaeróbia

Ensaio Experimental	Remoção de Turbidez (%)	Remoção de Cor (%)	Remoção de DQO (%)
1	86.24	73.45	56.11
2	95.91	88.52	47.88
3	87.33	77.79	41.94
4	86.54	92.51	40.21
5	72.12	48.78	5.45
6	76.17	67.85	14.29
7	95.47	86.59	1.52
8	94.24	86.48	8.61
9	93.81	77.55	3.83
10	95.44	87.35	3.69
11	96.94	89.57	3.69

É importante destacar que todos os ensaios do DCCR foram executados em ordem aleatorizada, com o objetivo de minimizar possíveis efeitos de deriva temporal no sistema experimental. Assim, a baixa remoção de DQO observada em determinados ensaios experimentais, inclusive em condições do ponto central do delineamento, não pode ser atribuída à sequência de execução. É mais provável que essas variações estejam associadas a fatores intrínsecos às condições operacionais testadas, como maior carga orgânica ou acúmulo de compostos intermediários, que podem reduzir a eficiência do processo.

Análise de efeitos para a remoção de poluentes ambientais

O fator PMI, termo quadrático, exerceu efeito significativo sobre a remoção de turbidez e cor dos biodigestores anaeróbios, pois os p-valores foram inferiores ao nível de significância adotado, de 10% (Tabela 3). Considerando que o efeito de um fator pode ser entendido como a variação causada na resposta, quando percorremos todos os níveis desse fator, independentemente dos demais fatores (Rodrigues; lemma, 2014), entende-se que condições mais elevadas de PMI e TO podem resultar em eficiências mais reduzidas do sistema em relação a turbidez e cor.

Embora alguns coeficientes estimados, com base na análise de efeitos, não tenham apresentado significância estatística dentro do nível de confiança adotado, optou-se por manter todos os termos lineares, quadráticos e de interação no ajuste. Essa decisão se justifica porque, no contexto de modelagem de processos ambientais complexos, a retirada de termos pode distorcer a superfície de resposta e limitar a capacidade de simulação em regiões do espaço experimental que não foram diretamente testadas. Além disso, a literatura aponta que, mesmo para parâmetros não significativos, a presença no modelo pode auxiliar na interpretação física do fenômeno (Rodrigues; lemma, 2014). Assim, a abordagem adotada permite que os modelos sirvam como ferramentas preditivas iniciais, a serem refinadas em estudos futuros.

Tabela 3. Análise de efeitos para o processo de biodigestão anaeróbia

Turbidez			
Fator	Efeito	Erro Padrão	p-valor
Média	95.38	2.38	0.00*
PMI**. (L)	-0.64	2.92	0.83
PMI. (Q)	-19.06	3.48	0.002*
TO***.(L)	1.79	2.92	0.57
TO. (Q)	1.77	3.48	0.63
PMI X TO.	-5.23	4.12	0.26
Cor			
Média	84.78	5.57	2.2×10^{-5} *
PMI. (L)	8.83	6.83	0.25
PMI. (Q)	-21.23	8.15	0.05*
TO.(L)	7.43	6.83	0.33
TO. (Q)	7.15	8.15	0.42
PMI X TO.	-0.18	9.65	0.99
DQO			
Média	3.58	14.67	0.82
PMI. (L)	-2.35	17.99	0.90
PMI. (Q)	25.96	21.47	0.28
TO.(L)	0.009	17.99	0.99
TO. (Q)	21.13	21.47	0.37
PMI X TO.	3.25	25.41	0.90

*Estatisticamente significativo com um nível de significância de 10%; **PMI, corresponde a proporção de mistura do inóculo; ***TO, corresponde ao tempo de operação

Modelagem matemática para remoção de poluentes ambientais

Os modelos matemáticos representativos do processo de biodigestão anaeróbia do dejetos bovino são apresentados nas Equações 4, 5 e 6 para as variáveis dependentes turbidez, cor e DQO, respectivamente. Os coeficientes foram estimados com base nos resultados da Análise de

Regressão Linear Múltipla, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). A modelagem matemática de sistemas ambientais se mostra de extrema importância, dada a sua aplicabilidade para a simulação de cenários, os quais podem ser determinantes para a redução de impactos ambientais (Variani; Kripka, 2021).

$$RT(\%) = 95.38 - 0.32PMI - 9.53PMI^2 + 0.90TO + 0.89TO^2 - 2.62PMI.TO \quad \text{Equação (4)}$$

$$RC(\%) = 84.78 + 4.42PMI - 10.62PMI^2 + 3.72TO + 3.58TO^2 - 0.09PMI.TO \quad \text{Equação (5)}$$

$$RDQO(\%) = 3.58 - 2.35PMI + 25.96PMI^2 + 0.009TO + 21.13TO^2 + 3.25PMI.TO \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

RT(%)= eficiência de remoção de turbidez.

RC(%)= eficiência de remoção de cor.

RDQO(%)= eficiência de remoção de demanda química de oxigênio.

PMI= valor codificado da Proporção de Mistura do Inóculo.

TO = valor codificado Tempo de Operação.

O modelo matemático para a eficiência de remoção de turbidez (Equação 4) indica que a variável mais influente é o termo quadrático de PMI, com coeficiente negativo (-9,53), evidenciando que níveis muito baixos ou muito altos de proporção de inóculo tendem a reduzir a eficiência. O termo de interação entre as variáveis independentes também é negativo, sugerindo que, quando ambos os fatores aumentam simultaneamente, a eficiência de remoção de turbidez pode cair.

Assim como na turbidez, para o modelo matemático representativo da eficiência da remoção de cor (Equação 5) o termo quadrático de PMI apresenta impacto negativo (-10,62). Os termos lineares de PMI e TO são positivos, sugerindo ganhos iniciais com aumento moderado desses fatores, mas limitados por efeitos quadráticos adversos. Embora o modelo não tenha sido estatisticamente significativo ao nível de 10%, ele fornece *insights* relevantes sobre tendências e zonas operacionais.

Diferente das demais variáveis, para o modelo matemático representativo da eficiência de remoção de DQO (Equação 6), o termo quadrático de PMI é positivo, sugerindo que valores mais extremos desse fator tende a aumentar a remoção de DQO. No entanto, o baixo intercepto (3,58) e a não significância estatística global indicam que, nas condições testadas, o processo apresentou limitações para remoção de matéria orgânica, possivelmente relacionadas à biodegradabilidade do substrato e à presença de frações recalcitrantes.

Embora a análise estatística tenha indicado que alguns coeficientes, particularmente no modelo matemático para a remoção de DQO, não apresentaram significância dentro do nível de confiança adotado, optou-se por manter todos os termos do modelo quadrático (lineares, quadráticos e de interação). Essa decisão foi adotada para evitar que a retirada seletiva de termos pudesse distorcer a geometria da superfície e comprometer a capacidade de prever tendências no espaço experimental.

No presente estudo, o objetivo dos modelos não foi apenas a predição estatística estrita, mas também a utilização como ferramenta exploratória para simulação de cenários, identificação de regiões promissoras de operação e comparação entre variáveis-resposta. Assim, a preservação da equação completa garante que o modelo mantenha coerência matemática e permita, em trabalhos futuros, análises multicritério ou otimizações por função de desejabilidade, mesmo para variáveis com baixo ajuste no experimento atual.

Validação dos modelos matemáticos propostos

A validação do modelo matemático possui importância científica fundamental, pois assegura que a equação proposta é capaz de representar, com precisão, o comportamento do processo dentro dos limites controlados para as variáveis independentes adotadas no estudo (LASKAR *et al.*, 2022). Esse procedimento é essencial para verificar a adequação do ajuste estatístico e garantir que as predições geradas sejam confiáveis e aplicáveis às condições experimentais avaliadas (Beven; Lane, 2022).

No contexto de processos ambientais, como a biodigestão anaeróbia, a validação adquire relevância ainda maior, uma vez que modelos devidamente testados permitem simular cenários operacionais, antecipar respostas do sistema e apoiar a tomada de decisão para otimização em escala real. Dessa forma, a validação não apenas confirma a robustez estatística do modelo, mas também assegura sua utilidade prática na gestão e aprimoramento tecnológico do tratamento de resíduos. Corroborando com essa questão, Eker *et al.* (2018), destacam a validação como etapa-chave para estabelecer confiança na aplicabilidade dos modelos à tomada de decisão em contextos ambientais e, Janová *et al.* (2024), argumentam que a correta validação deve incluir a discussão explícita sobre como o modelo atende ao seu propósito proposto.

Em relação ao presente estudo, na Tabela 4 é apresentada a análise de variância (ANOVA) para a validação dos modelos matemáticos propostos. Verifica-se que o p-valor de 0.03 foi estaticamente significativo para a análise de turbidez, sendo este inferior ao nível de significância adotado, de 10%. Devido à grande variabilidade inerente ao processo de tratamento de efluentes envolvendo microrganismos, podem ser considerados significativos os parâmetros com p-valores menores que 10% (Rodrigues; lemma, 2014).

Neste contexto, seguindo as recomendações apresentadas por Cancelier *et al.* (2015), pode-se afirmar que no presente estudo, dentre os modelos matemáticos gerados, o melhor ajuste estatístico foi obtido para os dados referentes a eficiência de remoção de turbidez no sistema de tratamento anaeróbio de dejetos bovinos, o que não inviabiliza a utilização dos demais modelos matemáticos para a investigação de possíveis cenários associados a biodigestão anaeróbia.

Tabela 4. Validação estatística dos modelos matemáticos de simulação

Turbidez				
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	547.84	5	109.57	0.03*
Resíduos	85	5	17.00	
Total	632.84	10		
Cor				
Regressão	968.78	5	193.76	0.22
Resíduos	465.57	5	93.11	
Total	1434.35	10		
DQO				
Regressão	1591.00	5	318.20	0.77
Resíduos	3228.03	5	645.61	
Total	4819.03	10		

*Estatisticamente significativo com um nível de significância de 10%.

Gráficos de superfície de resposta

Embora os modelos matemáticos propostos não sejam estatisticamente significativos para as variáveis dependentes cor e DQO, é importante evidenciar a dinâmica do processo com base nas faixas máxima e mínima do estudo, as quais poderão ser utilizadas como limites norteadores de estudos futuros. Com base nessas informações, é apresentado na Figura 1 os gráficos de superfície de resposta do modelo matemático proposto para a turbidez (A), cor (B) e DQO (C).

Constatou-se que a maior remoção de turbidez (Figura 1A) ocorre em condições experimentais próximo ao ponto central do delineamento experimental, as quais são caracterizadas por 12% de mistura do inóculo (PMI) ao dejetto bovino, com o biodigestor anaeróbio operando por 14 dias (TO). De maneira similar, corroborando com o que foi apresentado na discussão da Tabela 3, o estudo indica que operando nessas condições experimentais, o biodigestor anaeróbio propicia as melhores respostas em termos de remoção de cor (Figura 1B).

Entretanto, para a remoção de matéria orgânica (em termos de DQO) há indícios de que melhores resultados podem ser obtidos em condições mais reduzidas de PMI e TO (Figura 1C), o que leva a concluir que estudos adicionais podem ser realizados em diferentes condições de PMI e TO, a fim de que seja investigada a possibilidade de otimização simultânea das variáveis respostas pela aplicação da técnica da função de desejabilidade, proposta por Derringer e Suich (1980), como forma de reduzir o tempo de operação do reator anaeróbio, sem comprometer a eficiência do sistema empregado.

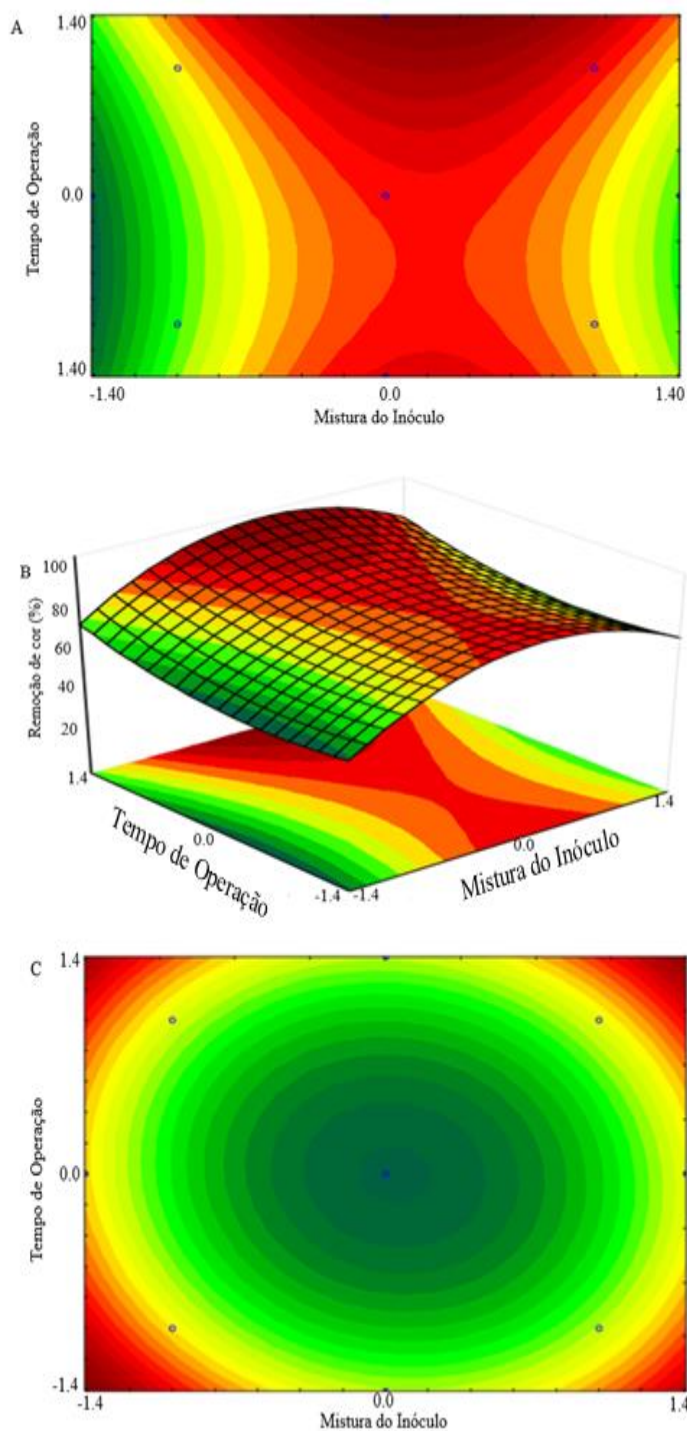


Figura 1. Superfície de resposta para a remoção de poluentes ambientais. (A) Turbidez; (B) Cor; (C) DQO

É importante destacar que as superfícies de resposta obtidas para turbidez e cor apresentam características próximas a paraboloides hiperbólicos, o que indica a ausência de um ponto ótimo global dentro da faixa experimental estudada. Nesse caso, a escolha de condições mais favoráveis foi baseada na região experimental que apresentou os maiores valores de remoção das variáveis respostas, considerando a aplicabilidade prática do processo. Entende-se que essa estratégia é plausível em estudos de superfície de resposta quando não há máximo/mínimo definido no domínio experimental, permitindo identificar uma zona operacional preferencial.

Além disso, mesmo em casos em que os modelos matemáticos não apontem um ponto ótimo teórico para as variáveis independentes, a escolha final da faixa de operação dos parâmetros operacionais deve considerar não apenas o valor matemático exato, mas também um intervalo de operação que seja estável, seguro e tecnicamente viável. Essa abordagem, muitas vezes chamada de ótimo prático, busca acomodar variações inerentes ao processo, reduzir riscos de instabilidade e facilitar a aplicação em escala real.

Caracterização do biogás produzido

Embora o objetivo do presente estudo tenha sido aplicar a biodigestão anaeróbia para o tratamento de dejetos bovinos, é de conhecimento que a técnica possui como coproduto a produção de biogás, uma emergente fonte alternativa de energia em grande escala (Deng *et al.*, 2023). Para que a caracterização do biogás não fosse comprometida, optou-se por avaliar o biogás produzido pelo maior tempo de operação (20 dias). Constatou-se que o biogás apresentou 82.0% de metano, 16.0 % de dióxido de carbono e ausência total de sulfeto de hidrogênio (Tabela 5). A ausência de sulfeto de hidrogênio é de extrema importância em sistemas de produção de biogás, pois suas características ácidas podem resultar em corrosão e diminuição da vida útil de motores e equipamentos utilizados para a produção da bioenergia (Zhang *et al.*, 2021).

No caso em questão, ensaio experimental 8 (PMI = 12%; TO = 20 dias), embora a eficiência de remoção de DQO tenha sido baixa (8.61%), observou-se elevada concentração de CH₄ no biogás (82%). Esse resultado indica que, apesar da menor remoção global da carga orgânica, a fração efetivamente degradada foi convertida em um biogás de alta qualidade, com predominância de metano. É importante salientar que a análise realizada neste estudo se refere exclusivamente à composição do biogás e não à eficiência de conversão da matéria orgânica em biogás, a qual dependeria também da medição do volume total gerado. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de frações orgânicas mais facilmente degradáveis no substrato, resultando em metano de alta pureza, mesmo quando persistem compostos recalcitrantes que mantêm a DQO residual elevada.

Ao comparar os resultados obtidos com as informações constantes na literatura, observa-se melhores resultados no estudo desenvolvido. Ribeiro *et al.* (2020) ao avaliarem a geração de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos bovinos, obtiveram biogás com composição de 65% de metano, 8% de CO₂ e 5% de H₂S.

CIBiogás (2019) em nota técnica, relata produção de biogás com 55.0% de metano para bovino de leite e 62.0% para bovino de corte, o que destaca a elevada produção de metano obtida no presente estudo, de 82.0%. Esta discrepância pode estar relacionada ao manejo da pecuária, bem como aos parâmetros controlados no sistema de tratamento empregado. Em escala real, o potencial de produção de biogás depende do arranjo tecnológico disponível, o que pode influenciar diretamente na qualidade do biocombustível produzido.

Tabela 5. Caracterização do biogás produzido durante o experimento

Elemento	Concentração (%)
Metano (CH ₄)	82.00
Dióxido de Carbono (CO ₂)	16.00
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0.00

Considerações finais

Após a realização dos ensaios experimentais seguindo rigorosos critérios científicos, a hipótese de que a biodigestão anaeróbia pode ser utilizada para o eficiente tratamento de dejetos da pecuária, utilizando inóculo de biodigestor aplicado ao tratamento de efluentes de fecularia, foi confirmada. O Brasil, por ser um país essencialmente agropecuário, deve buscar constantemente formas para otimizar os sistemas de tratamento de seus resíduos, sendo esse um dos principais produtos do presente estudo.

Embora os resultados tenham sido promissores, ressalta-se que estudos adicionais podem ser realizados a fim de melhorar a eficiência de remoção de matéria orgânica em biodigestores anaeróbios aplicados ao tratamento de dejetos de bovinos. Considerando a qualidade do biogás produzido, é fortemente encorajado a utilização do tratamento anaeróbio de dejetos bovinos para a produção de bioenergia, a qual pode ser utilizada nas propriedades pecuaristas, possibilitando atender alguns objetivos essenciais da sustentabilidade ambiental (ODS), além de reduzir custos com energia elétrica para os produtores rurais.

Cabe destacar que o presente estudo não contemplou um balanço de carbono completo, considerando simultaneamente as frações líquida e gasosa do processo. Assim, para potencializar a compreensão integral da dinâmica de conversão e possíveis perdas de carbono, recomenda-se que trabalhos futuros incluam essa análise combinada, de modo a fornecer uma estimativa mais abrangente e precisa da eficiência global do sistema.

Referências bibliográficas

- APHA (2012) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22th ed. Washinton, DC – EUA: Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- AGRAER, Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Ruural (2023) *Cadeia produtiva do leite de MS precisa passar por mudanças estruturais para elevar a produção*. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://www.agraer.ms.gov.br/cadeia-produtiva-do-leite-de-ms-precisa-passar-por-mudancas-estruturais-para-elevar-a-producao>
- Alan, H., Köker, A. R. (2023) Analyzing and mapping agricultural waste recycling research: An integrative review for conceptual framework and future directions. *Resources Policy*, **85**(part. B), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103987>
- Albuquerque, M. G., Sousa, S. S. O. de, Arruda, V. C. M. de, El-Deir, S. G. (2022) Impactos socioambientais dos dejetos da pecuária no âmbito rural: uma revisão de literatura. *Revista AIDIS*, **15**(1), 517-529. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.1.78123>
- Assis, G. P., Ocampos, V. O., Fleck, I. M., Fleck, L. (2023) Modelagem matemática do tratamento de soro de leite por biodigestão anaeróbia. *Revista de estudos ambientais*, **25**(2), 39-50. <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2023V25N2P39-50>
- Beven, K., Lane, S. (2022) On (in)validating environmental models. 1. Principles for formulating a Turing-like Test for determining when a model is fit-for purpose. *Hydrological Process*, **36**(10), e.14704. <https://doi.org/10.1002/hyp.14704>
- Cancelier, A., Dal'Soto, U. P., Costelli, M. C., Lopes, T. J., Silva, A. (2015) Avaliação da produção de biogás de dejetos de suínos utilizando a metodologia de superfície de resposta. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **20**(2), 209-217. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000101264>
- Carmo, D. L., Silva, C. A. (2012) Métodos de Quantificação de Carbono e Matéria Orgânica em Resíduos Orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **36**(1), 1211-1220. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400015>
- Chen, S., Zhang, J., Wang, X. (2015) Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste. *Waste Management & Research*, **33**(11), 1033-1040. <https://doi.org/10.1177/0734242X15602965>
- CIBIOGAS- Energias Renováveis. (2019) *Nota Técnica 01/2019: Produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite e corte*. p.1-8.
- Costalonga, L. G., Pires, N. O., Costa, T. R., Bottrel, S. E. C., Monteiro Neto, J. M., Pereira, R. O., Paula, V. R. de, Otênio, M. H. (2019) Avaliação da atividade estrogênica em efluente da pecuária leiteira. *Principia – Caminhos da Iniciação Científica*, **19**(2), 1-12, 2019. <https://doi.org/10.34019/2179-3700.2019.v19.29921>
- Deng, C., Kang, X., Lin, R., Wu, B., Ning, X., Wall, D., Murphy, J. D. (2023) Boosting biogas production from recalcitrant lignin-based feedstock by adding lignin-derived carbonaceous materials within the anaerobic digestion process. *Energy*, **278**(part A), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127819>
- Derringer, G. C., Suich, R. (1980) Simultaneous optimization of several responses variables. *Journal of Quality Technology*, **12**(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Eker, S., Rovenskaya, E., Obersteiner, M., Langan, S. (2018) Practice and perspectives in the validation of resource management models. *Nature communications*, **(9)**, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07811-9>
- Esteves, E. M. M., Herrera, A. M. N., Esteves, V. P. P., Morgado, C. do R. V. (2019) Life cycle assessment of manure biogas production: a review. *Journal of Cleaner Production*, **219**(10), 411-423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.091>
- Feitosa, A. K., Matos, M. A. A. de. (2021) A gestão de biorresíduos na perspectiva da economia circular. In: FEITOSA, A. K. (Org.) *Gestão, Meio Ambiente e Sustentabilidade*. Mulheres na Ciência, v. 4. Fortaleza: Aliás, 2021. 172 pp.
- Fleck, L., Tavares, M. H. F., Eyng, E., Andrade, M. A. M., Frare, L. M. (2017) Optimization of anaerobic treatment of cassava processing wastewater. *Engenharia Agrícola*, **37**(3), 574-590. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p574-590/2017>

- Gomes, A. C. A., Rocha, M. M., Galvão, A. S., Albino, P. M. B. (2014) Incentivos para a viabilização do biogás a partir dos resíduos da pecuária leiteira no Estado de Minas Gerais. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, **30**(0), 149-160. <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v30i0.34192>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) *Painel de Indicadores*. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/indicadores.html>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) *Cresce o abate de bovinos, frangos e suínos no 1º tri de 2023*. Agência IBGE notícias, 2023. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/37070-cresce-o-abate-de-bovinos-frangos-e-suinos-no-1-tri-de-2023>
- Janová, J., Bödeker, K., Bingham, L., Kindu, M., Knoke, T. (2024) The role of validation in optimization models for forest management. *Annals of Forest Science*, **81**(19), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01235-w>
- Kwietniewska, E., Tys, J. (2014) Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **34**(1), 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.041>
- Laskar, A. A., Ahmed, M., Khan, A. S., Samir, M. (2022) Experimental investigation and statistical validation of mathematical models for hot air-drying traits of carrot. *Food Science and Technology International*, **29**(4), 345-360. <https://doi.org/10.1177/10820132221093264>
- Leite, J. G. B. S., Santos, R. S., Lima, G. S., Silva, C. C., Assis, F. G. V., Oliveira, E. A., Leal, P. L. (2021) Co-digestão anaeróbica de manipueira, casca de café e esterco bovino: Um estudo de otimização do processo de otimização. *Brazilian Journal of Development*, **(7)**1, 1334-1355. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-091>
- Martins, F. J. S. B., Bruel, G. M., Souza, T. R. C., Esposito. (2024) Aproveitamento de dejetos bovinos para a produção de biogás. *Latin American Journal of Energy Research*, **11**(1), 99-113. <https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p99-113>
- Matos, C. F. (2016) *Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção*. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Instituto de Tecnologia- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Mayo, A. L., Ritter, D. J., Bruthans, J., Tingey, D. (2019) Contributions of commercial fertilizer, mineralized soil nitrate, and animal and human waste to the nitrate load in the Upper Elbe River Basin, Czech Republic. *HydroResearch*, **1**(1), 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.04.003>
- MAPA, Ministério da Agricultura E Pecuária (2024) *Mapa do leite: políticas públicas e privadas para o leite*. Acesso em: 13 jun. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite>
- Pasqualini, A. A. (2020) Aplicação dos biodigestores na pecuária sustentável. *Revista Faculdades do Saber*, **5**(9), 598-609. <https://rfs.emnuvens.com.br/rfs/article/view/89>
- Ribeiro, S. A. S., Junho, A. L., Barros, R. M., Santos, I. F. S., Tiago Filho, G. L., Martuscelli, E., Freitas, J. V. R. (2020) Estudo preliminar da biodigestão de esterco bovino com soro de leite em sistema de digestão em duplo estágio com purificação de biogás. **9**(8), 1-25. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5911>
- Richards, D., Yabar, H. (2023) Promoting energy and resource from livestock waste: case study yuge farm, Japan. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, **7**(2), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100299>
- Rodrigues, M. R., Iemma, A. F. (2014) *Experimental design and process optimization*. 2ª Ed. São Paulo.
- Variani, L., Kripka, M. (2021) Método de decisão multicritério aplicado à seleção de materiais estruturais considerando o impacto ambiental. *Revista AIDIS*, **14**(1), 462-476. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.1.70213>
- Zhang, Y., Kawasaki, Y., Oshita, K., Takaoka, M., Daisuke, M., Inoue, G., Tanaka, T. (2021) Economic assessment of biogas purification systems for removal of both H₂S and siloxane from biogas. *Renewable Energy*, **168**(0), 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.058>

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

EMISSIONS OF CARBON AND EMBODIED ENERGY IN BUILDINGS: PORTO PRIVILEGE PROJECT IN SALVADOR-BAHIA

Ângela Márcia Andrade Silva ¹

* José Célio Silveira Andrade ²

Isabelle Barbosa de Brito ³

CARBON EMISSIONS AND EMBODIED ENERGY IN BUILDINGS: PORTO PRIVILEGE PROJECT IN SALVADOR-BAHIA

Recibido el 23 de abril de 2024. Aceptado el 22 de abril de 2025

Abstract

The general objective of this article is to analyze the inventory prepared using the energy consumption and carbon emissions calculator (CECarbon) for a building project in Salvador - Bahia. The following methodological techniques were used: bibliographic and documentary research and an illustrative case of Porto Privilege's project. The results demonstrated that 79% of carbon emissions from the project (1,134.68 tCO_{2e} or 0.22 tCO_{2e}/m²) refer to the consumption of steel, concrete, aluminum frames, mortar, and concrete blocks. The embodied energy in all materials used in the project (12,906.78 GJ or 2.55 GJ/m²) would be capable of supplying 415 homes with four people for one year. Thus, the evaluation of the structural aspect of the building, the efficiency of the construction process, allowing the reduction of losses of steel, concrete, and mortar, or possible replacement of aluminum frames and concrete blocks with other alternative materials, for example, has potential to reduce carbon emissions and embodied energy at Porto Privilege. For possible compensation actions, the project's total emissions are equivalent to the carbon content stored in 7,943 trees in the Atlantic Forest. It is concluded that Porto Privilege's results are positioned within the national average regarding carbon intensity and energy consumption of buildings. It is hoped that the article can motivate other construction companies to carry out their carbon emission inventories, contributing to improving indicators for the sector, and supporting decision-making by entrepreneurs and public agents regarding mitigation strategies and/or offsetting carbon emissions in the construction sector in Brazil.

Keywords: carbon emissions, embodied energy, CECarbon, urban building projects, Salvador - Bahia.

¹ Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

² Escola de Administração, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

³ Escola de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

*Autor correspondente: Escola de Administração, Universidade Federal da Bahia, Avenida Reitor Miguel Calmon, s/n Vale do Canela, Salvador – Bahia, Brasil, 40110-903. Email: jcelio.andrade@gmail.com

Resumo

Este artigo tem como objetivo geral analisar o inventário, elaborado utilizando-se a calculadora de consumo energético e emissões de carbono (CECarbon), para um projeto de edificação em Salvador-Bahia. Foram empregadas as técnicas metodológicas: pesquisas bibliográfica e documental, caso ilustrativo em projeto do empreendimento Porto Privilege. Os resultados demonstraram, que 79% das emissões totais de carbono do empreendimento (1,134.68 tCO₂e ou 0.22 tCO₂e/m²) refere-se ao consumo de aço, concreto, esquadrias de alumínio, argamassa e blocos de concreto. A energia incorporada em todos os materiais/insumos utilizados na obra (12,906.78 GJ ou 2.55GJ/m²) seria capaz de abastecer anualmente 415 casas com 4 pessoas. Assim, a avaliação do partido estrutural da edificação, o uso racional do aço, concreto e também argamassas, ou possíveis substituições das esquadrias de alumínio e dos blocos de concreto, por outros materiais alternativos, por exemplo, tem potencial para redução das emissões de carbono e consumo energético no Porto Privilege. Para possíveis ações de compensação, tem-se que as emissões totais do empreendimento equivalem ao conteúdo de carbono armazenado em 7,943 árvores da Mata Atlântica. Conclui-se que o Porto Privilege se encontra posicionado na média nacional no que se refere a intensidade de carbono e consumo energético. Espera-se que esse artigo possa motivar outras construtoras a fazerem seus inventários de emissão de carbono, contribuindo para aprimorar indicadores para o setor, como também subsidiar a decisão por parte dos empreendedores e agentes públicos no que se refere as estratégias de mitigação e/ou compensação das emissões de carbono da construção civil no Brasil.

Palavras-chave: emissões de carbono, energia incorporada, CECarbon, projetos edificações urbanas, Salvador-Bahia.

Introdução

Considerando a Análise de Ciclo de Vida (ACV) das edificações, estudos mostram que o setor da construção civil é responsável por grande utilização dos recursos naturais, consumo de água e energia, geração de resíduos sólidos e significativa emissão de GEE. Segundo o relatório de Status Global para Edificações e Construção, publicado pelo Programa para o Meio Ambiente da ONU (PNUMA, 2024), esse setor foi responsável por 21% das emissões globais de GEE. Em 2022, as edificações, durante todo o seu ciclo de vida, foram responsáveis por 34% da demanda global de energia e por 37% das emissões de CO₂, relacionadas com a energia e processos, tornando a construção civil um setor crítico para alcançar os objetivos climáticos globais. No Brasil o setor contribui com cerca de 6% das emissões nacionais de GEE, e consome 51% da energia do país (CONFEA, 2024).

Convém salientar que, apesar desse impacto, no Brasil, são ainda poucas as organizações desse setor que já publicaram seus inventários de GEE. Na Bahia, até o momento, não existe registro público de inventário de emissões de GEE feita por alguma empresa de construção civil. De forma geral no estado da Bahia, os regulamentos que disciplinam as construções de edificações ainda não contemplam avaliações sobre pegada de carbono e energia incorporada, deixando-a à margem da legislação urbanística. Os projetos das edificações continuam a ser desenvolvidos e construídos sem considerar indicadores de intensidade de carbono e de consumo energético e sem formular estratégias/planos de redução das emissões de GEE e energia. Assim, urge estudos que: i) prospectem metodologias/ferramentas de contabilização de carbono para as edificações

urbanas; ii) avaliem medidas de redução das emissões de GEE que favoreçam a elaboração de projetos de edificações menos intensivos em carbono, tais como: especificações de materiais que resultem em menor impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida, escolha de fornecedores mais próximos das obras, etc.; iii) analisem atributos que possam ser inseridos nas edificações urbanas em prol da adaptabilidade dessas construções aos cenários das mudanças climáticas; e iv) subsidiem políticas e planos de mitigação e adaptação as mudanças climáticas voltadas para o ambiente urbano (Silva & Andrade, 2022; Prado *et al.*, 2022).

Partindo-se da premissa que o ambiente construído impacta e é impactado pelas mudanças climáticas, tem-se como problema de pesquisa a seguinte indagação: quais as principais fontes de emissão de GEE e consumo energético de projetos de edificações urbanas no estado da Bahia? Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar o inventário, elaborado utilizando-se a calculadora de consumo energético e emissões de carbono na construção civil (CECarbon), para um projeto de edificação urbana no estado da Bahia.

A CECarbon - Calculadora de Consumo Energético e Emissões de Carbono na Construção Civil, cuja primeira versão foi lançada em 2020, foi desenvolvida através de uma parceria entre o SindusCon-SP – Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, a GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, e a Secretaria Nacional de Habitação do Ministério das Cidades, para contabilizar as emissões de GEE e consumo energético das edificações. Atualmente, a ferramenta é recomendada em algumas políticas públicas, tais como: Programa Minha Casa Minha Vida, Manual de Estratégias Sustentáveis da Prefeitura de São José dos Campos, Selo Casa Azul + Caixa, IPTU Verde Salvador-BA, Prefeitura Municipal de Campinas, etc. (Sindicato da Construção Civil do Estado de São Paulo [SindusCon – SP], 2025).

Logo, espera-se que este artigo contribua para subsidiar a tomada de decisão por parte dos empreendedores e agentes públicos no que se refere as estratégias de mitigação e/ou compensação das mudanças climáticas no setor da construção civil no Brasil. Prevê-se também que os conhecimentos gerados por essa pesquisa possa contribuir para estimular o mercado imobiliário baiano em direção à produção de edificações ambientalmente mais corretas, fazendo com que o estado e o Brasil avance na implementação da agenda climática, e reforce o seu compromisso no cumprimento das metas definidas, através da NDC brasileira no Acordo de Paris.

Inventário de Emissões de GEE pelas empresas e o GHG Protocol

A gestão e reporte das emissões de GEE pelas organizações ainda é pouco pesquisada no Brasil, apesar da sua crescente relevância mundial devido a pressões regulatórias, sociais, ambientais e de mercado. Macedo, Luiz-Jr e Feiden (2024), analisando trabalhos acadêmicos sobre pegada de carbono, constatou que a área das engenharias é a segunda com maior número de trabalhos,

ficando atrás das ciências agrárias e a frente das ciências sociais aplicadas. Apesar desse contexto, Burritt, Schaltegger e Zvezdov (2011) afirmam que o papel da contabilidade de carbono, mediante a realização de inventários de emissões de GEE, é crucial pois fornece, aos gestores das organizações e à sociedade, informações que irão ajudar na tomada de decisões sobre ações de redução das emissões de carbono.

O inventário de emissões de GEE é um procedimento de contabilidade da intensidade de carbono, usado em todo o mundo por governos e instituições públicas e privadas, para a identificação das fontes e quantificação das emissões de GEE, com o objetivo de elaborar planos de mitigação das emissões ou ações de compensação (Cruz & D'Ávila, 2013). Muitas organizações estão inserindo o inventário de GEE em seu processo de gestão, pois, além de contribuir para mitigar e/ou neutralizar seus impactos ambientais e agregar valor à imagem corporativa, ajuda a preparar a empresa para cumprir legislações e regulamentos cada vez mais restritivos com relação às mudanças climáticas (Hall & Lee, 2022).

Um dos métodos mais utilizados mundialmente para o desenvolvimento de inventários de emissões de GEE é o GHG Protocol. Os GEEs contabilizados são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoreto de enxofre (SF₆), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs). O GHG Protocol é compatível com os padrões ISO e as metodologias do IPCC e considera três escopos para contabilização de emissões (WRI, 2024):

- a) Escopo 1 - emissões diretas, de fontes próprias ou controladas pela organização: esse escopo engloba as emissões lançadas à atmosfera que vêm diretamente dos processos das organizações. Dentro dessa classificação, estão, por exemplo, os GEEs produzidos a partir da queima de combustíveis e fontes de geração de energia.
- c) Escopo 2 - emissões indiretas, provenientes do consumo de energia: nesse escopo são contabilizadas as emissões indiretas da geração de energia que é comprada de fornecedores, por exemplo, as concessionárias de energia elétrica. Em outras palavras, são todas as emissões de GEE liberadas na atmosfera a partir do consumo de eletricidade, vapor, calor e resfriamento adquiridos.
- d) Escopo 3 - emissões indiretas de GEE, cujo relato é visto como opcional, decorrentes das atividades da organização, mas que provêm de fontes que não pertencem ou não são controladas pela mesma. Esse escopo engloba, portanto, as emissões de GEE pelas quais a organização é indiretamente responsável, tanto a montante como a jusante da sua cadeia de valor. Não há padronização dos limites operacionais reportados no escopo 3, cabendo às organizações a escolha de quais fontes contabilizar.

A elaboração de inventários de emissões de GEE é considerada como o primeiro passo para as empresas conhecerem e quantificarem as suas emissões de carbono e planejarem estratégias de mitigação das mudanças climáticas, pois não se pode gerir o que não se conhece e não se pode medir (Ibrahim *et al.*, 2012).

Pegada de Carbono do setor construção civil

Considerando todo o ciclo de vida das edificações, as principais fontes de emissão de GEE das edificações são oriundas dos processos de produção dos materiais, das atividades de construção, transporte de bens e serviços e gerenciamento de resíduos, além do consumo da energia durante a operação e manutenção predial (Bessa, 2010).

No Brasil, portanto, é fundamental melhorar o desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida das edificações, sobretudo porque ainda há muito a construir. Apesar disso, a maior parte das decisões tomadas nesse setor no Brasil não considera critérios ambientais. Daí, a importância da adoção pelo setor de estratégias de mitigação das mudanças climáticas em mercados emergentes como o Brasil, onde se prevê um aumento da procura por novas construções. Considerando-se que as etapas de construção e operação das edificações são os principais contribuintes para as emissões de GEE, e a redução substancial dessas emissões de GEE ao longo de todo o seu ciclo de vida é necessário para permitir o cumprimento das metas climáticas. Portanto, não há caminho crível para enfrentar as mudanças climáticas sem a contribuição do setor da construção civil. Como boa parte dos edifícios que existirão em 2050 ainda não foram construídos. Trata-se de uma grande oportunidade para o setor da construção civil repensar as soluções e projetos para as edificações do futuro – edifícios que priorizem a mitigação e resiliência climática com geração de energia renovável e construção de baixo carbono (UNEP, 2024).

Analizando o gerenciamento da pegada de carbono na indústria da construção civil, Labaran *et al.* (2022) defendem a necessidade de um *framework* reconhecido internacionalmente, mas ajustados à cada realidade local, para quantificação da pegada de carbono das edificações e sugerem estratégias de mitigação, tais como a adoção dos edifícios verdes, incluindo o uso de materiais sustentáveis, com menor conteúdo de carbono incorporado e certificados com selos ambientais. A adoção do eco-design na elaboração de novos projetos também é sugerida por Lamberts *et al.* (2007), nos quais as soluções são avaliadas considerando-se todo o ciclo de vida das edificações.

Fearnside (2001) mostra que o uso de biomateriais tem um potencial significativo de redução de emissões de GEE em comparação com soluções convencionais. Por exemplo, Xu *et al.* (2022), Melo *et al.* (2023) e Carvalho *et al.* (2024) oferece *insights* importantes sobre os potenciais do bambu para a redução das emissões de GEE e energia incorporada nas edificações: alta taxa de crescimento quando comparado com a madeira convencional, capturando grandes quantidades de CO₂ durante o seu ciclo de vida (até 0.5 tCO₂/m³); baixa energia incorporada no processamento quando comparado com concreto ou aço; substituição de materiais intensivos em carbono (como aço ou concreto) em certas aplicações estruturais e de acabamento; redução de impactos ao final da vida útil da edificação, por ser renovável e biodegradável.

Já Gardini, Marco e Florian (2024), argumenta que o bioconcreto pode representar uma inovação promissora no setor da construção civil ao unir avanços tecnológicos com sustentabilidade. Composto por microrganismos e minerais que permitem sua autorregeneração, esse material possui resistência à corrosão e a capacidade de absorver CO₂ durante o processo de cura. Essas propriedades resultam em estruturas mais duráveis, com menor necessidade de manutenção e potencial para reduzir as intensidades de carbono e energia das edificações.

Caldas (2020; 2024), entretanto, ao apontar as etapas (estrutura, vedações e revestimentos) e os materiais (concreto, aço e alumínio) como os mais impactantes em relação à intensidade de carbono, argumenta que o cálculo da pegada de carbono deve ser utilizado para avaliar diferentes materiais alternativos e sistemas construtivos nos projetos de edificações, em conjunto com análise de viabilidade técnico-econômica. Logo, para o autor é altamente recomendado que a pegada de carbono seja calculada nas primeiras etapas do projeto, possibilitando projetos mais sustentáveis e eficientes em termos de custo-benefício com relação a emissão de GEE e consumo energético.

Entretanto apesar da redução das emissões de GEE ser crucial, pois contribui para a mitigação das mudanças climáticas, mas não é suficiente. É preciso integrar as estratégias de redução com as de adaptação visando reduzir a vulnerabilidade das edificações a eventos climáticos extremos e seus impactos. A integração entre mitigação e adaptação desde a fase inicial dos projetos dos empreendimentos da construção civil é fundamental para a criação de edifícios mais eficientes e resilientes (Felicioni, Lupisek & Gaspari, 2023).

Indicadores de emissões de carbono e energia incorporada de edificações reportados pela literatura

Minunno *et al.* (2021) ao fazerem uma revisão da literatura sobre indicadores de energia incorporada e as emissões de carbono de edificações ao redor do mundo, encontraram uma variação de 2.5 a 7.6 GJ/ m² e 0.26 a 0.61 tCO₂e/m², respectivamente. Considerando-se que as estruturas de madeira incorporam significativamente menos energia e carbono em todo o ciclo de vida em comparação com estruturas de concreto e aço, esses autores defendem que o uso da madeira de origem sustentável no lugar de concreto pode reduzir até 43% a energia incorporada e 68% em intensidade de carbono. Já os projetos de edificações que consideram a desmontagem e reutilização dos componentes, como edifícios modulares, podem reduzir em até 81% a energia incorporada e 88% a intensidade de carbono.

Rock *et al.* (2022), baseado em 1,000 estudos de caso realizados em edificações em diferentes países da Europa, encontrou uma variação da intensidade de carbono de 0.07 a 0.52 tCO₂e/m². Com base em uma amostra de 3,737 edificações também no continente europeu, o projeto de pesquisa intitulado “The Embodied Carbon Benchmarks for European buildings” chegaram aos resultados que os edifícios da Europa Oriental têm, em média, o maior indicador de intensidade de carbono de 0.58-0.70 tCO₂e/m², seguidos pelos edifícios da Europa Ocidental onde a média de

carbono incorporado varia entre 0.51 e 0.60 tCO₂e/m² e, finalmente, edifícios do Norte da Europa onde o carbono incorporado médio varia entre 0.31 e 0.35 tCO₂e/m², dependendo do tipo de edifício (residencial, comercial, educacional ou industrial). Os quatro materiais/insumos de construção que mais contribuem com as emissões de carbono são concreto, aço, alumínio e plásticos. Além desses materiais destacam-se também os produtos de isolamento, portas, janelas e vidros e gesso. Os combustíveis utilizados na movimentação de terras e de outros equipamentos de construção e no transporte de materiais e serviços de construção também têm impactos significativos (One Click LCA, 2021).

Também na Europa, o padrão de edificações com emissão de carbono zero do Reino Unido (UKNZCBS, 2025), desenvolvido para orientar o ambiente construído a atingir emissões líquidas zero de carbono até 2050 e garantir o alinhamento com as metas de redução de carbono do Reino Unido, relata indicadores de carbono incorporado nas suas edificações entre 0.43 e 0.82 tCO₂e/m². Valores muito próximos a esses, foram reportados pelo Instituto Europeu para Desempenho Energético de Edificações (BPIE, 2024), ao sugerir diretrizes para o estabelecimento de benchmarks para o carbono incorporado nas edificações, a partir das experiências na Irlanda, Espanha e República Checa: 0.34-0.81tCO₂e/m².

No Brasil, Belizário-Silva (2022) propõe indicadores para avaliar o desempenho ambiental do ciclo de vida das edificações, entre eles, a emissão de CO₂, que no padrão construtivo HIS (Habitação de Interesse Social) varia entre 0.17 e 0.26 tCO₂e/m². Já Melo *et al.* (2023), pesquisando diferentes tipos de projetos, encontrou que a intensidade de carbono varia entre 0.27 e 0.39 tCO₂e/m². Caldas *et al.* (2017) avaliaram a intensidade de carbono e energia incorporada em HIS em Brasília-DF, chegando a uma variação de 0.32 a 0.38 tCO₂e/m² e 2.2 a 5.4 GJ/m², respectivamente. O sistema construtivo alvenaria cerâmica apresentou menores emissões de CO₂e quando comparada com o *light steel framing*, e para ambos sistemas construtivos, a etapa operação predial se mostrou a mais significativa (50% a 70%), seguida da construção (20% a 30%), manutenção (11% a 20%) e fim de vida útil (menor que 1%).

Contabilização das Emissões de GEE e Energia Incorporada pelas Edificações: CECarbon

Alinhada com a metodologia do GHG Protocol, a CECarbon, online e gratuita, veio suprir a falta de uma ferramenta de gestão customizada para auxiliar as empresas do setor da construção civil no processo de tomada de decisão informada sobre as pegadas de carbono e consumo energético de seus projetos, permitindo a criação e acompanhamento de indicadores para as edificações e a definição de benchmarks e metas de baixo carbono para o setor (SindusCon – SP, 2025).

Como o objetivo da CECarbon é mensurar as emissões de GEE (tCO₂e) e o consumo energético ou energia embutida (MJ) nos projetos e/ou construção das edificações, a ferramenta utiliza

como fronteiras do ciclo de vida das edificações “do berço a entrega da obra”. Ou seja, da extração e transporte das matérias primas necessárias, fabricação dos materiais/insumos de construção e transporte até o canteiro de obra e atividades de construção no canteiro.

Portanto, considerando o escopo da ACV de edificações mostrado na Figura 1, a contabilização feita pela CECarbon engloba as etapas A1-A5 da norma europeia que estabelece princípios e requisitos específicos para a avaliação de sustentabilidade de obras de engenharia civil (CEN TC 350) e não são consideradas as emissões de GEE e consumo energético para as fases “B1-B7” referentes ao uso (operação e manutenção), como também as fases “C1-C4” referentes ao final de vida e “D” equivalente ao além do ciclo de vida das edificações (CEN, 2024).

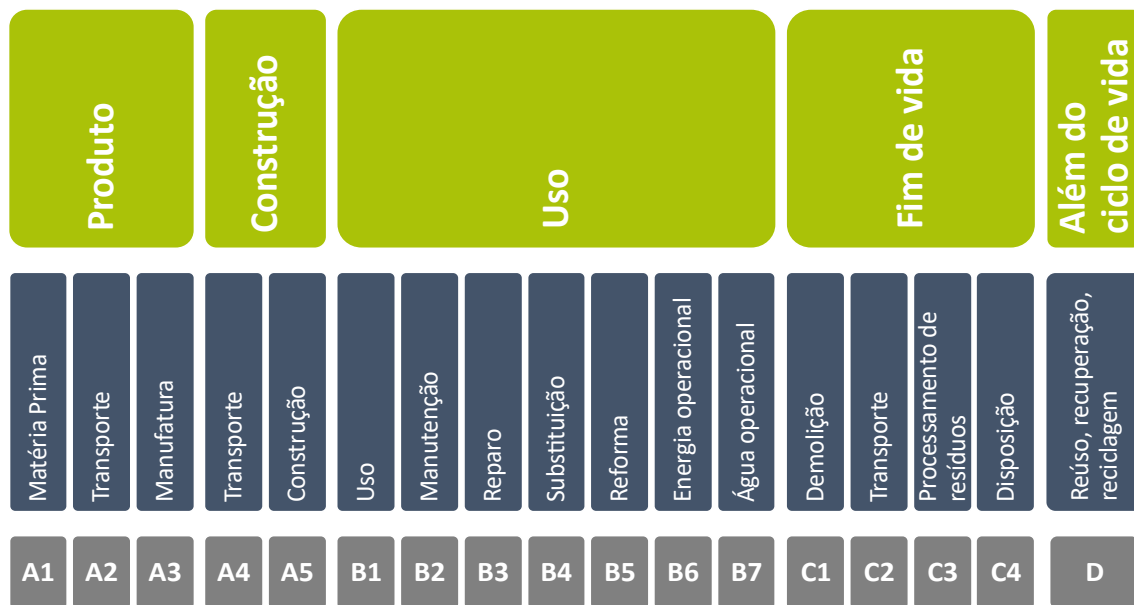


Figura 1. Escopo da ACV de edificações de acordo com as normas CEN TC350. *Fonte: CEN (2024)*

Assim, a CECarbon permite o cálculo das pegadas de carbono e energética das edificações nas seguintes etapas: a) projeto (ou seja, anteriormente ao início efetivo da obra/construção), visando antecipar resultados e indicadores e oferecer um diagnóstico preliminar para tomada de decisões; b) a qualquer momento no decorrer da obra, possibilitando informar alterações de projeto, substituições de materiais, etc., e buscando oferecer um comparativo, capaz de mostrar variações nos resultados, antes da consolidação da obra; c) obra concluída, permitindo a extração dos resultados consolidados após a entrega da obra.

O cálculo das emissões totais de GEE para a realização dos inventários dos empreendimentos/obra é feito através da equação 1:

$$ET = \sum_i^n DA.FE_{geei}.GWP_{geei} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde ET refere-se ao total de emissões de GEE (expresso em tCO₂e), DA aos dados de atividade ou fontes de emissão de GEE e FE_{geei} refere-se aos fatores de emissão de GEEs e GWP_{geei} - “Global Warming Potential”, diz respeito ao potencial de aquecimento global”, ou seja, o quanto uma determinada massa de um GEE é capaz de reter calor na atmosfera, em comparação a mesma massa de gás equivalente ao CO₂.

Já a energia incorporada ou consumo energético é calculada pela equação 2:

$$EE = EE_m + EE_{tm} + EE_c \quad \text{Equação (2)}$$

Onde EE é o total da energia embutida/incorporada (expresso em MJ), EE_m é a energia embutida/incorporada nos materiais/insumos de construção consumidos na obra, EE_{tm} é a energia incorporada no transporte dos materiais/insumos de construção das fábricas para a obra e EE_c é a energia incorporada na construção da edificação, pelo consumo de energia do canteiro de obra.

A CECarbon possui um banco de dados com fatores de emissão de GEE e de consumo energético para diversos materiais e insumos de construção e processos complementares, como transporte e uso de combustíveis. A seleção desses fatores prioriza o contexto brasileiro visando uma maior precisão possível. Assim, para reduzir a incerteza dos cálculos, os fatores de emissão são extraídos das DAP’s – Declarações Ambientais de Produtos (EPD’s - Environmental Product Declaration, em inglês), permitindo uma diferenciação por fabricante, SIDAC - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção, Ecoinvent – BR (banco de dados suíço que possui fatores de emissão baseados no contexto brasileiro) e literatura especializada – artigos técnicos e científicos. Para materiais compostos, como argamassa e concreto, a ferramenta utiliza dados de seus componentes individuais, permitindo a análise de diferentes traços (SindusCon - SP, 2022).

Para que haja compatibilidade entre as unidades de medida, os dados de entrada (inputs), referentes ao parâmetro DA (dados de atividade ou fontes de emissão de GEE) devem estar em uma unidade compatível com as unidades dos fatores de emissão de GEEs (FE_{geei}) e dos fatores de energia embutida/incorporada (EE_m, EE_{tm} ou EE_c) que constam no banco de dados da CECarbon. Portanto, caso necessário, deve ser feita a conversão da unidade de medida dos dados de entrada (inputs) para a unidade solicitada pela plataforma da CECarbon (Tabela 2).

Tabela 2. Inputs, Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético e Outputs do Inventário Porto Privilege

INPUTS				Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético				OUTPUTS		
Fonte	Dado de Atividade (quantidade)	Unidade	Referência – Dado de Atividade	Fator de Emissão GEE (kgCO2e/unidade)	Referência - Emissões	Fator de Consumo Energético (MJ/unidade)	Referência - Energia	Consumo Energético Total (MJ)	Emissões Biogênicas (tCO2)	Emissões Totais de GEE (tCO2e)
Materiais de Construção										
Argamassa (Genérico)	703.99	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	91.41	Média calculada a partir dos 6 perfis de argamassa selecionados.	572	Média calculada a partir dos 6 perfis de argamassa selecionados.	402,682.28		64.35
Concreto (Genérico)	8.24	m³	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	229.27	Média calculada a partir dos 3 tipos de concretos selecionados.	1,179.00	Média calculada a partir dos 3 tipos de concretos selecionados.	9,714.96		1.89
Gesso	122.00	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	342.4	Costa (2012).	4,773.00	Bajay e Santana (2010).	582,306.00		41.77
Aço	197.86	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	1,900.00	Instituto do Aço Brasil (2018).	30,000.00	Tavares (2006)	5,935,800.00		375.93
Areia	97.73	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	2.39	Guida, Falco, and da Silva (2020).	40	Guida, Falco, and da Silva (2020).	3,909.20		0.23
Esquadrias de madeira (portas)	8,446.00	kg	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	2.23	Ecoinvent (2022)	28.00	Ecoinvent (2022)	236,488.00		18.83

Tabela 2. Inputs, Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético e Outputs do Inventário Porto Privilege

INPUTS				Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético				OUTPUTS		
Fonte	Dado de Atividade (quantidade)	Unidade	Referência – Dado de Atividade	Fator de Emissão GEE (kgCO ₂ e/unidade)	Referência - Emissões	Fator de Consumo Energético (MJ/unidade)	Referência - Energia	Consumo Energético Total (MJ)	Emissões Biogênicas (tCO ₂)	Emissões Totais de GEE (tCO ₂ e)
Eletroduto de PVC	5,570.00	m	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	7.82	Gonçalves e Bode (2015).	51.4	Gonçalves e Bode (2015).	286,298.00		43.56
Mastique asfáltico	0.58	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	280	Guida, Falco e da Silva (2020).	6,620.00	Guida, Falco e da Silva (2020).	3,839.60		0.16
Esquadrias de alumínio	8,964.00	kg	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	12.76	Ecoinvent (2022)	137	Ecoinvent (2022)	1,228,068.00		114.38
Vidro plano	9.7	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	650	CNI (2016).	10,822.00	Guida, Falco e da Silva (2020)	104,973.40		6.30
Vidro temperado	0.7	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	950	CNI (2016).	13,162.00	Guida, Falco e da Silva (2020)	9,213.40		0.67
Brita	87.76	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	4.27	Guida, Falco e da Silva (2020).	82.4	Guida, Falco e da Silva (2020).	7,231.42		0.37

Tabela 2. Inputs, Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético e Outputs do Inventário Porto Privilege

INPUTS				Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético				OUTPUTS		
Fonte	Dado de Atividade (quantidade)	Unidade	Referência – Dado de Atividade	Fator de Emissão GEE (kgCO2e/unidade)	Referência - Emissões	Fator de Consumo Energético (MJ/unidade)	Referência - Energia	Consumo Energético Total (MJ)	Emissões Biogênicas (tCO2)	Emissões Totais de GEE (tCO2e)
Granito	17.89	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	700	Hammond e Jones (2011).	2,000.00	Tavares (2006)	35,780.00		12.52
Cimento (Genérico)	24.88	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	654.53	Média calculada a partir dos 3 tipos de cimento selecionados.	2,989.40	Média calculada a partir dos 3 tipos de cimento selecionados.	74,376.27		16.28
Cabos (fiação)	3,148.00	m	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	0.25	EPD Fabricante	3	EPD Fabricante	9,444.00		0.79
Tinta à base de solvente	3.56	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	3,760.00	Hammond e Jones (2011).	97,000.00	Hammond e Jones (2011)	345,320.00		13.39
Produtos Sanitários (Louças)	3	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	1,980.00	Guida, Falco e da Silva (2020).	31,560.00	Guida, Falco e da Silva (2020).	94,680.00		5.94
Revestimentos Cerâmicos	65	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	514	Guida, Falco e da Silva (2020).	8,390.00	Guida, Falco e da Silva (2020).	545,350.00		33.41

Tabela 2. Inputs, Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético e Outputs do Inventário Porto Privilege

INPUTS				Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético				OUTPUTS		
Fonte	Dado de Atividade (quantidade)	Unidade	Referência – Dado de Atividade	Fator de Emissão GEE (kgCO2e/unidade)	Referência - Emissões	Fator de Consumo Energético (MJ/unidade)	Referência - Energia	Consumo Energético Total (MJ)	Emissões Biogênicas (tCO2)	Emissões Totais de GEE (tCO2e)
Concreto 30-32 MPa	1,111.47	m³	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	252	Guida, Falco e da Silva (2020).	1,318.00	Guida, Falco e da Silva (2020).	1,464,917.46		280.09
Manta asfáltica a quente	7.13	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	530	Guida, Falco e da Silva (2020).	52,700.00	Guida, Falco e da Silva (2020).	375,751.00		3.78
Tubo de PVC - água	2,988.00	m	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	1.54	EPD Fabricante	25.5	EPD Fabricante	76,194.00		4.6
Tubo de PVC - esgoto	2,322.00	m	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	2.1	EPD Fabricante	18	EPD Fabricante	41,796.00		4.88
Bloco de concreto de vedação fbk 02 MPa (09x19x39) cm	777	t	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de materiais por etapa construtiva	77.44	Sonvezzo, Oliveira e John (2022)	605.5	Sonvezzo, Oliveira e John (2022)	470,473.50		60.17
Insumos e Processos Complementares										
Transporte de Solo	3,774.00	Km	Orçamento do projeto e Google Maps	0.4200	Caminhão médio, com rendimento médio de 5.6 km/L. Considera 10% de biodiesel no diesel. EPE (2019).	6.300	Caminhão médio, com rendimento médio de 5.6 km/L. Considera 10% de biodiesel no diesel. EPE (2019).	23,776.20	0.16	1.58

Tabela 2. Inputs, Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético e Outputs do Inventário Porto Privilege

INPUTS				Fatores de Emissão de GEE e Consumo Energético				OUTPUTS		
Fonte	Dado de Atividade (quantidade)	Unidade	Referência – Dado de Atividade	Fator de Emissão GEE (kgCO ₂ e/unidade)	Referência - Emissões	Fator de Consumo Energético (MJ/unidade)	Referência - Energia	Consumo Energético Total (MJ)	Emissões Biogênicas (tCO ₂)	Emissões Totais de GEE (tCO ₂ e)
Transporte de Resíduos (Downstream)	760	Km	Orçamento do projeto e Google Maps	0.4200	Caminhão médio, com rendimento médio de 5.6 km/L. Considera 10% de biodiesel no diesel. EPE (2019).	6.300	Caminhão médio, com rendimento médio de 5.6 km/L. Considera 10% de biodiesel no diesel. EPE (2019).	4,788.00	0.03	0.32
Consumo de Energia Elétrica	30	MWh	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de insumos por etapa construtiva	0.075	Baseado no mix de energia do Sistema Elétrico Nacional. EPE (2019).	3,600.00	Baseado no mix de energia do Sistema Elétrico Nacional. EPE (2019).	108,000.00	0.00	0.00
Consumo de Combustível (Diesel) em máquinas - combustão estacionária	3,675.40	L	Orçamento do projeto e relatório de consumo estimado de insumos por etapa construtiva	2.631	EPE (2019)	35.400	EPE (2019)	130,109.16	0.91	8.79
Frete de Materiais	46,904.76	Km	Orçamento do projeto e Google Maps	0.4200	Caminhão médio, com rendimento médio de 5.6 km/L. Considera 10% de biodiesel no diesel. EPE (2019).	6.300	Caminhão médio, com rendimento médio de 5.6 km/L. Considera 10% de biodiesel no diesel. EPE (2019).	295,499.99	1.91	19.70
Totais Gerais								12,906.78	3.01	1,134.68

Os resultados (*outputs*) da contabilização das emissões de carbono e consumo energético pela CECarbon podem ser expressos tanto pelos escopos (1, 2 e 3) do GHG Protocol, quanto pelas categorias inventariadas pela ferramenta: “bens e serviços comprados”, “combustão móvel”, “combustão estacionária” e “energia adquirida”. No relatório gerado pela ferramenta, esses resultados também podem ser reportados de acordo com 10 etapas construtivas do projeto/empreendimento (Serviços Preliminares; Fundações; Estrutura; Vedações; Revestimentos; Esquadrias e Vidros; Pintura; Cobertura; Pavimentação e Infraestrutura; Instalações Prediais) ou pelas diversas fontes individuais de emissão e consumo de energia, tornando os *outputs* da CECarbon mais compatíveis com o orçamento da obra. A ferramenta permite o cálculo da pegada de carbono e consumo energético dos projetos de edificação considerando diferentes sistemas construtivos (alvenaria e estrutura convencional, alvenaria estrutural e parede de concreto) e padrões construtivos (alto, médio e HIS) o que pode auxiliar na escolha de alternativas com menor intensidade de carbono por parte dos gestores do projeto da obra.

Assim, ao permitir a análise das emissões de GEE e consumos energéticos por etapa da obra, categoria, escopo (1, 2 e 3 do GHG Protocol), sistemas e padrões construtivos e materiais/insumos, o relatório com os *outputs* subsidiam a tomada de decisão dos gestores quanto as estratégias a serem utilizadas para reduzir o impacto das etapas da obra e dos materiais/insumos considerados mais críticos, além de contribuir para relatar os resultados das pegadas de carbono e energética dos empreendimentos junto aos stakeholders.

A CECarbon também permite a elaboração do inventário corporativo que é o registro detalhado dos ativos e recursos que a empresa possui, mensurando os impactos de seus escritórios, matrizes, filiais e stands. A ferramenta também tem disponível o inventário integrado que é a consolidação de informações que permite a gestão e monitoramento tanto das atividades de construção quanto dos processos corporativos de forma conjunta, permitindo assim comparações entre diferentes projetos, insumos e operações.

A CECarbon também permite a elaboração do inventário corporativo que é o registro detalhado dos ativos e recursos que a empresa possui, mensurando os impactos de seus escritórios, matrizes, filiais e stands. A ferramenta também tem disponível o inventário integrado que é a consolidação de informações que permite a gestão e monitoramento tanto das atividades de construção quanto dos processos corporativos de forma conjunta, permitindo assim comparações entre diferentes projetos, insumos e operações.

Indicadores de Intensidade de Carbono e Consumo Energético de Edificações reportados pela CECarbon

A partir da análise de uma amostra de 109 inventários de obras realizados até 2024 com a utilização da CECarbon, em diversos estados brasileiros, incluindo o Distrito Federal, resultaram os seguintes indicadores de intensidade média de carbono e de energia por m² construído: emissão média de

GEEs: 0.21 tCO₂e/m² (com variação entre 0.10 e 0.52 tCO₂e/m²) e energia média incorporada: 2.17 GJ/m² (com variação entre 1.1 e 5.10 GJ/m²). Esses indicadores foram desmembrados em sistema construtivo e padrão construtivo, resultando nos valores apresentados na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1. Indicadores CECarbon: Intensidades Médias de Carbono e Energia de Edificações no Brasil

Tabela 1: Indicadores CECarbon: Intensidades Médias de Carbono e Energia de Edificações no Brasil

Indicadores CECarbon			
Indicadores Gerais			
Indicador	Valor	Número de Edificações	
Emissão de GEEs (tCO ₂ e/m ²)	0.21	109	
Energia Incorporada (GJ/m ²)	2.17	109	
Indicadores por Sistema Construtivo			
Sistema Construtivo	Emissão de GEEs (tCO ₂ e/m ²)	Energia Incorporada (GJ/m ²)	Número de Edificações
Alvenaria e Estrutura Convencional	0.26	2.66	51
Sistema Alvenaria Estrutural	0.18	1.76	18
Parede de Concreto	0.16	1.73	40
Indicadores por Padrão de Construção			
Padrão de Construção	Emissão de GEEs (tCO ₂ e/m ²)	Energia Incorporada (GJ/m ²)	Número de Edificações
Padrão Alto	0.25	2.53	33
Padrão Médio	0.21	2.15	36
Padrão HIS	0.18	1.89	40

Fonte: SindusCon - SP (2024)

A Tabela 1 mostra que as edificações de padrão alto, construídos pelo sistema alvenaria e estrutura convencional, tendem a apresentar maiores emissões de GEE e maior quantidade de energia incorporada, enquanto as de padrão HIS apresentam os menores valores para ambos os indicadores.

Além dos indicadores mostrados pela Tabela 1, outros achados importantes foram reportados pela CECarbon, em linha com a literatura especializada discutida anteriormente: i) a etapa construtiva mais impactante em relação as emissões de carbono e consumo energético é a estrutura; ii) o material mais impactante em relação à intensidade de carbono é o concreto, enquanto que em relação à energia incorporada são concreto e aço; iii) 97% das emissões de GEE geradas na produção das edificações estão no escopo 3, enquanto os escopos 1 e 2 respondem apenas por 3%, fazendo com que as estratégias de redução das emissões no setor dependa fortemente do esforço da cadeia de suprimentos para fabricação de materiais/insumos de construção com menores pegadas de carbono (SindusCon – SP, 2024).

Esses dados são importantes, pois servem de parâmetros para a definição de benchmarks setoriais e futuras metas de baixo carbono, permitindo que os diversos atores da cadeia produtiva da construção civil possam formular estratégias visando à redução dos seus impactos rumo à construção de edificações mais sustentáveis e eficientes em relação ao carbono e energia.

Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos utilizados para a realização deste estudo foram divididos em 03 fases. Na primeira fase foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre a temática nas principais bases de dados acadêmicas nacionais e internacionais (*Scielo, Web of Sciences, Scopus etc.*) sobre estratégias, metodologias e boas práticas do setor de construção civil para contabilizar as emissões de GEE e consumo energético de projetos de edificações e estratégias de mitigação das mudanças climáticas.

Na segunda fase foi realizada análise documental sobre estudos, legislações, regulamentos e políticas públicas existentes vinculadas ao ambiente construído, que promovam a realização do inventário de emissões de GEE em projetos de edificações urbanas. Além desses, foram analisados documentos referentes ao projeto do empreendimento Porto Privilege, selecionado na terceira fase da pesquisa, para ilustrar a elaboração do inventário de GEE de edificações: especificações técnicas ou memorial descritivo, relação de insumos totais da obra, relação de insumos por etapa da obra, planos de desconstrução/demolição, orçamentos, etc.

Desse modo, a terceira fase da pesquisa consistiu na realização de um caso ilustrativo em projeto de edificação urbana localizado em Salvador-Bahia denominado “Porto Privilege”. Essa fase envolveu a utilização da segunda versão da ferramenta CECarbon (<https://www.cecargon.com.br/>) para a contabilização das emissões de GEE e consumo energético do projeto do empreendimento Porto Privilege.

O uso do caso ilustrativo é recomendado por Ikeda, Veludo de Oliveira & Campomar (2005), quando se deseja identificar as barreiras ou dificuldades encontradas na implementação de algum novo conceito/modelo ou nova ferramenta de gestão e propor melhorias. Assim, entre setembro 2022 e abril 2023, durante essa fase da pesquisa, foram feitos treinamentos online, contatos via e-mail/telefone, e reuniões virtuais/presenciais com o corpo técnico do Sinduscon-SP, responsável pela ferramenta CECarbon, e também do Porto Privilege, com o propósito de coletar dados, tirar dúvidas, relatar barreiras/dificuldades e recomendar melhorias.

Os dados necessários aos *inputs* da CECarbon foram coletados junto aos responsáveis pelo projeto/obra do Porto Privilege, tais como: dados operacionais referentes as etapas construtivas do projeto/empreendimento, consumo estimado de materiais e insumos e seus respectivos fretes, estimativa de uso de combustíveis, seja para fins de combustão estacionária ou móvel, etc.

Para isso, analisou-se e extraiu-se dados de relatórios de consumo total estimado de insumos e materiais e também por cada uma das etapas construtivas, planilhas orçamentárias, além dos informes de potenciais fornecedores sobre quantidade de viagens até o canteiro de obra para cada um dos materiais e insumos. As distâncias percorridas por esses transportes foram quantificadas utilizando-se a ferramenta Google Maps, considerando-se o modal rodoviário.

Logo, além de testar e contribuir para a validação e aperfeiçoamento da CECarbon (terceira versão lançada em maio 2024), essa fase da pesquisa visou realizar um diagnóstico preliminar da pegada de carbono e do consumo energético do Porto Privilege para subsidiar a tomada de decisão por parte dos empreendedores.

Resultados e discussão

Perfil do Empreendimento Porto Privilege

Trata-se de um empreendimento privado de alto padrão residencial localizado no bairro da Barra em Salvador-Bahia, em um terreno de 722 m² e área total construída de 5066,5 m². Conta com um bloco arquitetônico composto por 106 unidades (40 apartamentos quarto e sala com 28,76m²; 64 estúdios com 19,55m² e 02 lofts com 42 e 55m²) distribuídas em 14 pavimentos (Carozzo Desenvolvimento Imobiliário, 2024).

Emissões de Carbono e Consumo Energético do Porto Privilege

Os resultados obtidos (*outputs*) reportados no relatório gerado pela CECarbon (ver Tabela 2) demonstraram que as emissões totais de carbono do projeto do empreendimento Porto Privilege equivalem a 1,134.68 tCO₂e ou 0.22 tCO₂e/m², sendo 3.01 tCO₂, referente às emissões biogênicas. Já a energia incorporada em todos os materiais/insumos utilizados na obra corresponde a 12,906.78 GJ ou 2.55GJ/m², suficiente para abastecer anualmente aproximadamente 415 casas de famílias médias brasileiras com 4 pessoas.

Como previsto, a categoria do GHG Protocol denominada “bens e serviços comprados” foi a responsável por 97% das emissões totais da obra e 96% do consumo energético total no projeto do Porto Privilege. Já as categorias “combustões estacionária e móvel” e “energia adquirida” mostrou-se pouco significantes tanto para as emissões totais de GEE quanto para o consumo energético. Desse modo, grande parte das emissões de carbono do projeto foram indiretas e, portanto, classificadas no escopo 3. Esse resultado está em linha com os dados reportados pela CECarbon em uma amostra de 109 inventários analisados, que mostram a grande contribuição do escopo 3 para a pegada de carbono das obras, fazendo com que a redução das emissões de GEE dependa fortemente do engajamento dos fornecedores.

Além desses resultados totais, as Figuras 2 a 5, a seguir, apresentam os resultados das emissões de GEE e energia incorporada, detalhados pelas principais etapas e fontes individuais da obra.

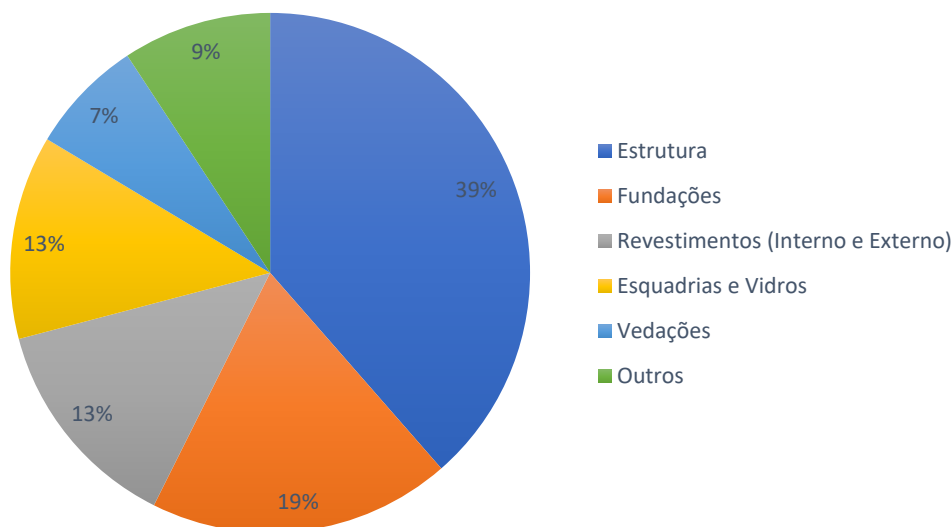


Figura 2. Emissões de GEE pelas principais etapas construtivas do Porto Privilege

Observa-se na Figura 2 que 5/10 etapas responderam por 91% das emissões totais de GEE da obra. São elas: estrutura, fundações, revestimentos (interno e externo), esquadrias/vidro e vedações. A outra metade das etapas construtivas (instalações prediais, pavimentação e infraestrutura, pintura (interna e externa), serviços preliminares e cobertura) contribuiu apenas com 9%.

Conforme mostrado na Figura 3, a seguir, as mesmas 05 etapas construtivas com as maiores emissões de GEE foram também responsáveis pelos maiores consumos energéticos da obra. Assim, essas 05 etapas responderam por 87% da energia incorporada à obra. A única diferença diz respeito aos posicionamentos assumidos pelas etapas “revestimentos (interno e externos)” e “esquadrias e vidro”. Enquanto “revestimentos” ocupou a terceira posição no ranking referente a emissões de GEE e quarta posição quanto a energia incorporada, “esquadrias e vidro” apresentou resultados inversos: quarta posição no ranking referente a emissões de GEE e terceira posição quanto a energia incorporada.

Já as 5 principais fontes individuais de emissão de GEE e energia incorporada do Porto Privilege são apresentadas nas Figura 4 e 5, respectivamente.

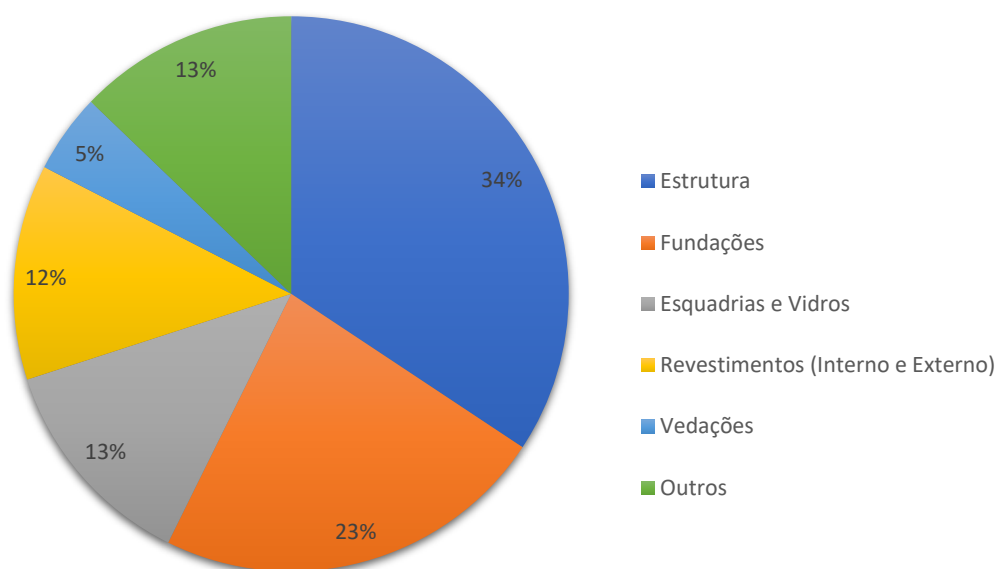


Figura 3. Energia incorporada pelas principais etapas construtivas do Porto Privilege

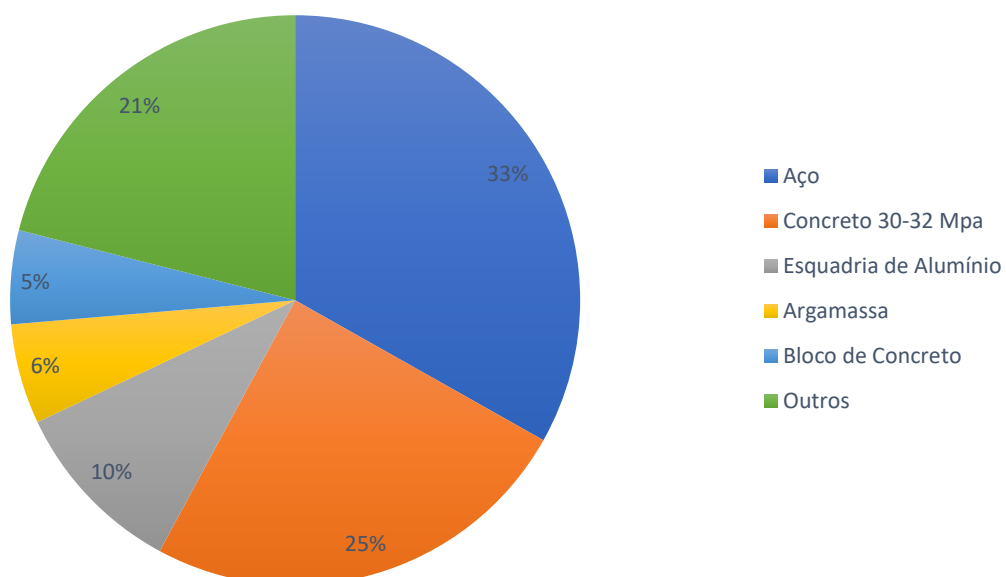


Figura 4. Principais fontes individuais de emissão de GEE do Porto Privilege

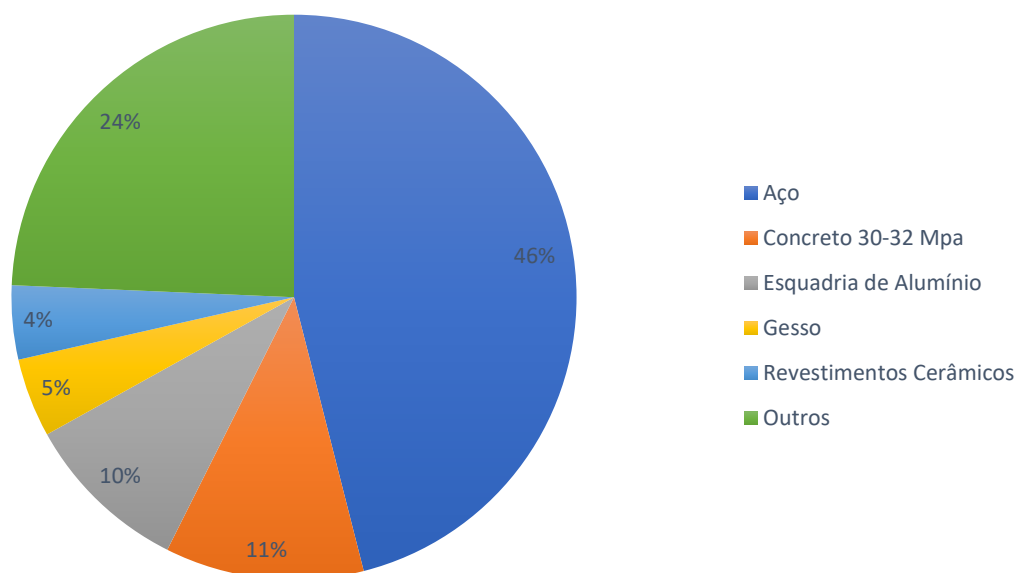


Figura 5. Principais fontes individuais de energia incorporada do Porto Privilege

Observa-se pelas Figuras 4 e 5 que no Porto Privilege, apenas 3 materiais/insumos (aço, concreto 30-32 Mpa e esquadrias de alumínio) representam 68% das emissões totais de GEE e 67% do consumo energético da obra. Considerando-se também a demanda prevista de argamassa genérica e blocos de concreto de vedação, o percentual de emissões de GEE sobe para 79%. Já quanto à energia incorporada, incluindo-se gesso e revestimentos cerâmicos, esse percentual alcança 76%.

Logo, o principal foco para ações de redução de emissão de GEE e de consumo energético da obra deve se concentrar no uso racional e/ou na substituição desses 07 materiais/insumos tidos como críticos. A redução de desperdícios desses materiais/insumos no processo construtivo, análise do partido estrutural, otimização da logística de fornecimento, por exemplo, são algumas estratégias que poderão contribuir, assim como possíveis substituições por materiais alternativos, para a redução das pegadas de carbono e energética da obra.

Convém ressaltar que esses resultados foram obtidos tendo como base o planejamento do empreendimento, e que algumas ações de redução das emissões de GEE e consumo energético já foram implementadas na execução da obra, tais como: planejamento do processo de desconstrução do imóvel situado no terreno da obra visando o reaproveitamento de materiais; substituição de fornecedores de materiais/insumos buscando maior proximidade com o canteiro de obras e diminuição do número e da quilometragem de viagens; racionalização da execução das alvenarias, com redução de espessura de argamassa e ausência de “rasgos” nas paredes para passagem de tubulações e eletrodutos.

Comparação resultados Porto Privilege com indicadores nacionais e internacionais

Comparando-se os resultados encontrados no empreendimento baiano com os indicadores nacionais de intensidade de carbono e energia incorporada, obtidos através de 109 inventários de GEE realizados pela calculadora CECarbon no Brasil e apresentados anteriormente na Tabela 1, tem-se:

- Emissão de GEEs: O resultado encontrado no Porto Privilege ($0.22 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$) é bastante similar à média geral de $0.21 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$ e, portanto, dentro do intervalo e variação obtido por outras obras no Brasil que utilizaram a CECarbon (0.10 a $0.52 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$).
- Consumo Energético: O indicador do Porto Privilege (2.55 GJ/m^2) é ligeiramente superior à média geral de 2.17 GJ/m^2 e também dentro do intervalo de variação obtido por outras obras no Brasil que utilizaram a CECarbon (1.1 a 5.10 GJ/m^2).

Quando se compara por padrão e sistema construtivos, obtêm-se os seguintes resultados:

- Emissão de GEEs: o indicador do Porto Privilege ($0.22 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$) é ligeiramente inferior à média para padrão construtivo alto de $0.25 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$.
- Consumo Energético: similarmente, o resultado do Porto Privilege (2.55 GJ/m^2) também é ligeiramente inferior à média para alto padrão construtivo de 2.53 GJ/m^2 .
- Emissão de GEEs: o resultado encontrado no Porto Privilege, que usa alvenaria e sistema estrutural convencional, foi de $0.22 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$, inferior à média geral de $0.26 \text{ tCO}_2\text{e/m}^2$.
- Consumo Energético: O indicador do Porto Privilege (2.55 GJ/m^2) é um pouco inferior à média geral de 2.66 GJ/m^2 .

Quanto à etapa construtiva tida como mais crítica, tem-se que a estrutura, tanto no Porto Privilege quanto nas outras obras brasileiras que utilizaram a CECarbon, foi a etapa líder em emissões de GEE e consumo energético. Entretanto, com relação ao material/insumo considerado mais crítico, observou-se uma divergência: enquanto no Porto Privilege o aço foi campeão tanto em emissões de carbono quanto em energia incorporada, nas outras obras que utilizaram o CECarbon no Brasil, o concreto foi o maior emissor e o aço foi líder apenas em consumo energético. Admite-se como hipótese que essa divergência se deve à relação utilizada entre o consumo de aço/concreto adotada nas obras, que pode variar, por exemplo, de 80 a 120 kg de aço por m^3 de concreto estrutural (Bulin & Lach, 2022).

Assim, de um modo geral, os resultados encontrados no empreendimento Porto Privilege em Salvador, Bahia, se posicionam muito próximos às médias gerais encontradas para os indicadores de intensidade de carbono e energia de outras edificações no Brasil que utilizaram a CECarbon. As variações/divergências podem ser explicadas por particularidades do projeto, como tipos e proporções entre os materiais/insumos utilizados, soluções construtivas adotadas, cadeia de suprimento utilizada, eficiência logística no transporte dos materiais e insumos, etc.

Confrontando-se também os resultados encontrados no Porto Privilege com os indicadores internacionais e nacionais reportados pela literatura, vê-se que o indicador de consumo energético do empreendimento está dentro dos intervalos de variação encontrados em edificações ao redor do mundo por Minunno *et al.* (2021) e por Caldas *et al.* (2017) para HIS no Brasil.

Quanto ao indicador de emissão de GEE do Porto Privilege, constatou-se que ele se posiciona um pouco abaixo dos valores mínimos dos intervalos de variação encontrados no Brasil por Melo *et al.* (2023) para diferentes tipos de projetos, porém, dentro da faixa reportada por Belizário-Silva (2022) para HIS.

Quando confrontado com os valores dos indicadores internacionais de intensidade de carbono, observou-se que o resultado do empreendimento Porto Privilege fica dentro do intervalo de variação encontrado por Rock *et al.* (2022) em edificações europeias, mas inferior ao valor mínimo reportado por Minunno *et al.* (2021) para edifícios ao redor do mundo e também aos valores mínimos reportados pelo Instituto Europeu de Desempenho Energético de Edificações - BPIE (2024) e pela organização responsável pelo padrão de edificações com emissão de carbono zero do Reino Unido - UKNZCBS (2025). Conta a favor do Brasil o fato do país contar com maior percentual de energia renovável na sua matriz energética quando comparado com a Europa e o resto do mundo.

Quanto aos três materiais/insumos considerados mais críticos para a pegada de carbono das edificações, observou-se que os resultados encontrados no Porto Privilege (concreto, aço e alumínio) convergem com os achados da pesquisa “*The Embodied Carbon Benchmarks for European buildings*”, feita com quase 4 mil edifícios na Europa (One Click LCA, 2021), apesar das diferenças entre o contexto brasileiro e europeu em relação à regulação do segmento de edificações e matriz energética. Trata-se, portanto, de materiais com alta intensidade de carbono e energia embutida. Assim, apesar desses materiais no Brasil apresentarem normalmente menores pegadas de carbono quando comparados com seus semelhantes europeus, muito em função da matriz energética brasileira ser considerada mais limpa, eles fazem parte da lista de materiais mais críticos para o alcance de edificações mais sustentáveis, seja no Brasil ou no restante do mundo. Isso reforça a necessidade de engajamento da cadeia de fornecedores para a redução contínua da pegada de carbono desses materiais e/ou análise de substituição por materiais alternativos, como possíveis caminhos para a descarbonização do setor.

Isto posto, pode-se admitir que os resultados obtidos no Porto Privilege se encontram alinhados com a literatura pesquisada. No que se refere a possíveis ações de compensação, os resultados mostraram que as emissões totais do Porto Privilege equivalem ao conteúdo de carbono armazenado em aproximadamente 7,943 árvores típicas da Mata Atlântica. Essa quantificação é realizada considerando que cada árvore tem o potencial de absorver e estocar em média 163.14 kg de CO₂ ao longo de seus primeiros 20 anos (SOS Mata Atlântica, 2013). Assim, considerando-se o valor de R\$75.00/crédito de carbono no mercado voluntário, resultaria em um custo aproximadamente R\$ 85 mil ou R\$17/m² (Carbonext, 2024).

Análise de incertezas

O cálculo do inventário do Porto Privilege envolveu certos níveis de incertezas que estão relacionados com os dados de entrada (inputs) e com os fatores de emissão de GEE e de consumo energético utilizados pela CECarbon. Como se trata do cálculo do inventário de um projeto de edificação, os dados de entrada são estimativas contidas nas planilhas orçamentárias e outros documentos oficiais do empreendimento, conforme descrito no item sobre os procedimentos metodológicos do estudo.

Em se tratando de inventário para contabilização de emissões de GEE e consumo energético, os dados de entrada e fatores de emissão e energia incorporada devem ser suficientemente precisos para permitir que os gestores tomem decisões com confiança razoável de que os resultados encontrados (outputs) têm credibilidade, atendendo ao princípio da exatidão. Assim, para minimizar tais incertezas, foram usados valores de entrada somente baseados em fontes oficiais do empreendimento, que seguissem padrões de mercado e, na medida do possível, tivessem conformidade com a realidade local.

Dadas as limitações em se estabelecer valores quantitativos de incerteza para o cálculo do inventário do Porto Privilege, as incertezas foram analisadas de forma qualitativa segundo recomendação do GHG Protocol (2003). Assim, considerando-se que os níveis de incerteza podem ser classificados em baixo, médio e alto, avaliaram-se as incertezas do inventário do Porto Privilege, a partir de uma análise qualitativa dos dados de entrada (inputs) e fatores de emissão e consumo energético, apresentados na Tabela 2.

Logo, a partir da análise da Tabela 2, pode-se argumentar, portanto, que o nível de incerteza geral para o cálculo das emissões de GEE e consumo energético do Porto Privilege pode ser considerado como “médio”, já que os valores dos dados de entrada (inputs) foram baseados em previsões de projeto e a maioria dos fatores de emissão e de consumo energético tem abrangência nacional e/ou internacional e não reflete necessariamente os valores específicos dos potenciais fornecedores de matérias primas e insumos elencados nos documentos do projeto. Existe uma variação de pegada de carbono entre diferentes fabricantes de um mesmo material/insumo de construção. Porém, a CECarbon, como a maioria das ferramentas acreditadas disponíveis, ainda não possui muita disponibilidade de fatores de emissão e de consumo energético de diferentes fabricantes brasileiros. As DAPs ou EPDs (em inglês) de materiais e insumos de construção de diferentes fabricantes estão se tornando cada vez mais comuns no Brasil e tendem a ser fontes de dados mais precisos sobre os fatores de emissão e energia incorporada.

Defende-se também que as incertezas dos cálculos referentes as emissões de GEE e consumos energéticos dos insumos e processos complementares tendem a ser maiores que aquelas referentes as emissões e consumo energético oriundos dos consumos orçados de materiais de

construção, pois envolveu estimativas, através da ferramenta Google Maps, de distâncias dos fretes de todos os materiais de construção (das suas respectivas fábricas até o canteiro de obra), além dos transportes de solo e resíduos (do canteiro de obras até o local de disposição final).

Considerações finais

Este artigo defende a importância da contabilização das pegadas de carbono e energéticas nos projetos de edificações no Brasil, analisando a contribuição de cada etapa construtiva e cada fonte individual de emissão de GEE e de consumo energético, visando direcionar ações de redução das intensidades de carbono e energia dos empreendimentos do setor da construção civil. Defende-se também que a calculadora CECarbon tem potencial para extrapolar os benefícios da mensuração das emissões de GEE e do consumo energético de uma obra e se tornar uma ferramenta gerencial de acompanhamento de quantitativos de insumos previstos e realizados, podendo contribuir para a avaliação do processo orçamentário das construtoras e da eficiência de seus processos produtivos.

Espera-se que essa pesquisa possa motivar outras construtoras a contabilizarem as pegadas de carbono e os consumos energéticos dos seus empreendimentos, contribuindo para aprimorar indicadores relacionados com emissões de GEE e energia incorporada, como também subsidiar a tomada de decisão por parte dos empreendedores e agentes públicos no que se refere as estratégias de mitigação e/ou compensação das emissões de carbono no setor da construção civil no Brasil.

Ressalta-se que esse estudo apresenta como principal limitação o fato de contabilizar as emissões de carbono e os consumos energéticos a partir apenas de dados estimados de consumo e frete de materiais/insumos extraídos do projeto do Porto Privilege. Trata-se, portanto, da utilização e do teste da CECarbon na etapa de projeto do empreendimento. Isto é, foram utilizados dados secundários de projeto antes do início da obra, com a finalidade de oferecer um diagnóstico preliminar do empreendimento em relação às emissões de carbono e ao consumo de energia embutida nos materiais e insumos para a tomada de decisão por parte dos empreendedores.

Outra limitação refere-se ao escopo da ACV das edificações adotado pela CECarbon: “do berço à entrega da obra”. Logo, caso se faça necessário contabilizar as emissões de carbono e os consumos energéticos para as fases referentes ao uso (operação e manutenção) e ao final da vida útil das edificações, é fundamental a utilização de outras ferramentas acreditadas.

Assim, recomenda-se para novas pesquisas:

- i) Continuidade do estudo no empreendimento Porto Privilege, comparando-se o que foi projetado com o realizado. Ou seja, é necessário confrontar os resultados contabilizados na etapa de projeto e discutidos neste artigo com os resultados a serem contabilizados após o final do período de construção do empreendimento. Ao final da construção, é crucial que o

inventário do Porto Privilege seja refeito, considerando-se os consumos reais de materiais/insumos e energia da obra, para efeito de comparação com os resultados encontrados a partir das estimativas da etapa de projeto. O objetivo é discutir as possíveis variações/divergências nos resultados devido às incertezas orçamentárias, alterações de projeto e/ou substituições de materiais/insumos no decorrer da obra.

- ii) Verificação de que há um aumento da inclusão na CECarbon e em outras ferramentas acreditadas, de mais fatores de emissão por fabricantes brasileiros dos insumos/materiais, extraídos de EPDs auditados por uma terceira parte independente, visando uma maior confiabilidade e precisão do cálculo das emissões de carbono e energia incorporada.
- iii) Análise quantitativa do grau de incerteza dos resultados obtidos (outputs) com a CECarbon em comparação com outras ferramentas acreditadas. Isso é fundamental, pois contribuiria para fomentar a melhoria da qualidade dos resultados obtidos, mediante a diminuição do grau de incerteza dos cálculos.
- iv) Formas de incentivo à realização e publicação de inventários de GEE por empresas do setor da construção civil, incluindo não apenas os canteiros de obra, mas também os escritórios e toda a área corporativa. A disseminação dessa prática, mediante a realização de relatórios integrados (obra e corporativo), é crucial para a estruturação de um banco de dados nacional que auxilie a promoção da sustentabilidade no setor.
- v) Pesquisas para verificar em que medida a CECarbon e demais ferramentas acreditadas estão incorporando materiais alternativos com menor pegada de carbono e energia incorporada e sua viabilidade técnica e econômica, incluindo indicadores para diferentes tipos de sistemas construtivos, como wood frame, steel frame, madeira engenheirada, etc.;
- vi) Exame de estratégias de gestão de resíduos e reciclagem em canteiros de obras e seu impacto na redução de emissão de GEE;
- vii) Investigação sobre geração e uso de energia renovável e eficiência energética no canteiro e seu potencial para reduzir emissão de GEE e energia incorporada nas obras;
- viii) Avaliação do impacto da capacitação dos trabalhadores em práticas sustentáveis para redução de GEE e energia incorporada nas obras;
- ix) Estudos para elaboração de abas suplementares na CECarbon para realização de cálculo da pegada hídrica, análise de riscos climáticos e sugestão de medidas de adaptação nos projetos e construções de edificações. Atualmente, a ferramenta está apenas voltada para a contabilização das emissões de carbono e do consumo energético e, consequentemente, medidas de mitigação nas obras; entretanto, sabe-se que a melhoria da resiliência urbana requer uma via de mão dupla, envolvendo tanto estratégias de mitigação como de adaptação às mudanças climáticas, como a escassez hídrica, por exemplo. Sugere-se também que futuramente a CECarbon incorpore a contabilização da pegada de carbono nas outras fases do ciclo de vida das edificações, tais como: operação&manutenção predial e final da vida útil;
- x) Integração da CECarbon com softwares de orçamento de obras, sistemas de gestão de compras e controle de estoque e com plataformas BIM (Modelagem da Informação da

Construção), para permitir extração automática de informações sobre os quantitativos de materiais e insumos orçados e também os efetivamente utilizados na obra, otimizando a realização do inventário de emissões, tanto na fase de projeto quanto no final da construção;

- xi) Pesquisas comparativas entre os resultados obtidos via CECarbon e os encontrados por outras ferramentas acreditadas de inventários de emissões de GEE e consumo energético;
- xii) Avaliação do potencial impacto de políticas públicas e regulatórias na redução das emissões de GEE e do consumo energético das edificações no Brasil, identificando pontos de melhoria de efetividade.

Essa agenda de pesquisa é importante para o aperfeiçoamento dos indicadores de intensidade de carbono e energia para o setor de construção civil, visando à definição de metas para o plano setorial de mitigação das mudanças climáticas, medida a ser cumprida tendo como base as políticas públicas e regulatórias, como o Plano Clima em elaboração pelo governo federal.

Referências bibliográficas

- Bajay, S.V., Santana, P.D.M. (2010) *Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial cal e gesso*. CNI. Brasília - DF.
- Belizário-Silva, F. (2022) *Proposal of lifecycle-based environmental performance indicators for decision making in construction*. (Tese de Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Bessa, V. M. T. (2010) *Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios*. (Tese de Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- BPIE, Buildings Performance Institute Europe (2024) *How to establish Whole Life Carbon benchmarks – Insights and lessons learned from emerging approaches in Ireland, Czechia and Spain*. Acesso em 05 de agosto de 2025. Disponível em: https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2024/09/How-to-establish-whole-life-carbon-benchmarks_final.pdf
- Bulin, J.E.S., Lach, A.G. (2022) Análise comparativa de consumo de aço e concreto entre duas configurações de investimento em Balneário Camboriú. (TCC Graduação), UniSociesc, Joinville, Santa Catarina, Brasil.
- Burritt, R.L., Schaltegger, S., Zvezdov, D. (2011) Carbon management accounting: explaining practice in leading German companies. *Australian Accounting Review*, **21**(1), 80–98. <https://doi.org/10.1111/j.1835-2561.2010.00121.x>
- Caldas, L.R. (2024). *Ferramentas de quantificação das emissões de carbono aplicadas a edificações: um guia para auxiliar na escolha*. Acesso em 1 de agosto de 2025. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/1019174/ferramentas-de-quantificacao-das-emissoes-de-carbono-aplicadas-a-edificacoes-um-guia-para-auxiliar-na-escolha>
- Caldas, L.R. (2020). *Como calcular a pegada de carbono de uma edificação*. Acesso em 1 de agosto de 2025. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/943023/como-calcular-a-pegada-de-carbono-de-uma-edificacao>
- Caldas, L. R., Lira, J. S. M. M., Melo, P. C., Spoto, R. M. (2017) Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasília: proposal of design guidelines for low-carbon social housing. *Ambiente Construído*, **17**(3), 71-85. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000300163>
- Carbonext (2024) *Descarbonização no setor da construção civil –edificações*. Sindicato da Indústria da Construção Civil de São Paulo – SindusCon-SP, São Paulo.
- Carozzo Desenvolvimento Imobiliário (2024) *Porto Privilege*. Acesso em 23 de março de 2024. Disponível em: <https://www.carozzo.com.br/empreendimentos/porto-privilege>

- Carvalho, B.V.O. *et al.* (2024) The Use of Bamboo in Civil Engineering: Sustainability and Innovation at the Max Feffer Center, Pardinho Municipality, São Paulo State (SP), Brazil. *Research, Society and Development*, **13**(12), 53131247728. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i12.47728>
- CEN, European Committee for Standardization (2024) *Construction*. Acesso em 03 de julho de 2024. Disponível em: <https://www.cencenelec.eu/areas-of-work/cen-sectors/construction/sustainability-safety-and-accessibility>
- CNI, Confederação Nacional da Indústria (2016) *Estratégias corporativas de baixo carbono: setor do vidro*. Brasília – DF.
- CONFEA, Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (2024) *Medidas para descarbonização da construção civil avançam no Brasil*. Acesso em 05 de setembro de 2024. Disponível em: <https://www.confea.org.br/medidas-para-descarbonizacao-da-construcao-civil-avancam-no-brasil>
- Costa, B.L. (2012). *Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil*. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Cruz, F., D'Ávila, S.L. (2013) *Inventory of Greenhouse Gas Emissions of the Federal Technological University of Paraná – Curitiba Campus*, Academic Department of Chemistry and Biology, Federal Technological University of Paraná, Curitiba.
- Ecoinvent (2022) *Ecoinvent Database*. Acesso em 23 de abril de 2022. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database>
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética (2019). *Balanco Energético Nacional 2019*. Acesso em 05 de agosto de 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/anteriores>
- Fearnside, P.M. (2001) The potential of Brazil's forest sector for mitigating global warming under the Kyoto Protocol. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, v. 6, p. 355-372.
- Felicioni, L., Lupisek, A., Gaspari, J. (2023) Exploring the common ground of sustainability and resilience in the building sector: a systematic literature review and analysis of building rating systems. *Sustainability*, **15**(1), 884-898. <https://doi.org/10.3390/su15010884>
- Gardini, O.L., Marco, G., Florian, F. (2024) A utilização de bioconcreto na construção civil, pontos positivos e seus desafios, *Revista Científica Multidisciplinar*, **5** (1), 516061, <http://dx.doi.org/10.47820/recima21.v5i1.6061>
- GHG Protocol (2003) *GHG Protocol guidance on uncertainty assessment in GHG inventories and calculating statistical parameter uncertainty*. Acesso em: 5 de agosto de 2025. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghg-uncertainty.pdf>
- Gonçalves, J.C.S., Bode, K. (org.) (2015) *Edifício ambiental*, São Paulo: Oficina de Textos.
- Guida, E.C., Falco, D.G., Silva, L.J. (2020) Energia embutida nos materiais de construção utilizados em edificações brasileiras. XXI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. *Anais*.
- Hall, G., Lee, J. (2022) *Making Advances in Carbon Management: best practice from the Carbon Information Leaders*. Acesso em 13 de abril de 2024. Disponível em: http://www.935.ibm.com/services/uk/bcs/pdf/cdp_andibm_final_updated_sept08.pdf?me=w&met=landingpage
- Hammond, G., Jones, C. (2011) *Inventory of Carbon & Energy (ICE) version 2.0* University of Bath.
- Ibrahim, N., Sugar, L., Hoornweg, D., Kennedy, C. (2012) Greenhouse gas emissions from cities: comparison of international inventory frameworks. *Local Environment*, **17**(2), 223-241. <https://doi.org/10.1080/13549839.2012.660909>
- Ikeda, A.A., Veludo-de-Oliveira, T.M., Campomar, M.C. (2005) A Tipologia do Método do Caso em Administração: usos e aplicações. *O&S – Organizações e Sociedade*. **12**(34), 141-159. <https://doi.org/10.1590/S1984-92302005000300009>
- Instituto do Aço Brasil (2018) *Relatório de Sustentabilidade 2018*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- Labaran, Y. H., Mathur, V., Muhammad, S.U., Musa, A.A. (2022) Carbon footprint management: A review of the construction industry. *Cleaner Engineering and Technology*, **9**(1), 100531. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531>
- Lamberts, R., Triana, M. A., Fossati, M., Batista, J.O. (2007) *Sustentabilidade nas edificações: contexto internacional e algumas referências brasileiras na área*. Laboratório de Edificações – UFSC. Florianópolis.

- Macedo, H.R., Luiz-Jr., O.J., Feiden, A. (2024) Carbon Footprint: a scientometric analysis of publications from the Capes Thesis and Dissertations Database – Brazil. *RGSA –Revista de Gestão Social e Ambiental*, **18**(9), 2024, p.1-14. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-143>
- Melo, P. C., Caldas, L.R., Masera, G., Pittau, F. (2023) The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, **433**(1), 139862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139862>
- Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G.M., Gruner, R.L. (2021) Investigating buildings' embodied energy and carbon: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **143**(1), 110935, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110935>
- One Click LCA (2021) *Benchmark for European Buildings – According to EN 15978:2011 and Level(s) framework*. Disponível em: <https://oneclicklca.com/resources/ebooks/embodied-carbon-benchmarks-for-european-buildings>
- Prado, A. F. R., Alberte, E.P.V., Ventura, A.C., Ventin, J.T.I. (2022) Urban resilience actions in the built environment: an analysis of the city of Salvador–Bahia-Brazil. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/2/022004>
- Rock, M., Allacker, K., Auinger, M., Balouktsi, M. et al. (2022) Towards indicative baseline and decarbonization pathways for embodied life cycle GHG emissions of buildings across Europe, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1078: 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012055>
- SindusCon-SP (2025) Sindicato da Construção Civil do Estado de São Paulo. *Construindo um futuro sustentável: o protagonismo do Brasil na descarbonização*. Acesso em: 1 agosto 2025. Disponível em <https://sindusconsp.com.br/eventos/25-anos-do-comasp>
- SindusCon-SP (2024) Sindicato da Construção Civil do Estado de São Paulo *Descarbonização do setor da Construção Civil e lançamento da nova versão da CECarbon*. Acesso em 22 de março de 2024. Disponível em: <https://cecarbon.com.br/blog/post/665e246b4f1881001c5f443d>
- SindusCon-SP (2022) Sindicato da Construção Civil do Estado de São Paulo. *CECarbon - relatório metodológico*. Acesso em 3 de fevereiro de 2024. Disponível em: <https://www.cecarbon.com.br/methodology>
- Silva, A., Andrade, C. (2022) Sinergia entre estratégia de resiliência de Salvador e IPTU verde: oportunidades para aumento da eficácia e parceria com o mercado imobiliário. *Anais do XXII Encontro Internacional Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, São Paulo-SP.
- Sonvezzo, C. S., Oliveira, L. S., John, V. M. (2022) Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: blocos de concreto. São Paulo: Sidac.
- SOS Mata Atlântica (2013) *Cada árvore da Mata Atlântica chega a tirar 163 kg de gás carbônico da atmosfera*. Acesso em 3 de agosto de 2025. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/noticias/cada-arvore-da-mata-atlantica-chega-a-retirar-163-kg-de-gas-carbonico-da-atmosfera>
- Tavares, S.F. (2006) *Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras*. (Tese de Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- UNEP, United Nations Environment Programme (2024) *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations - mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
- UKNZCBS (2025) *UK Net Zero Carbon Buildings Standard*, Acesso em 05 agosto 2025. Disponível em: <https://www.nzcbbuildings.co.uk/pilotversion>
- WRI (2024) *GHG Protocol*. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/projetos/ghg-protocol>
- Xu, X., Xu, P., Zhu, P., Li, H., Xiong, Z. (2022) Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO2 emissions, *Science of The Total Environment*, **814**, 152697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152697>

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF DISSOLVED OXYGEN IN A LARGE TROPICAL SEMI-ARID RESERVOIR

*Tharcia Priscilla de Paiva Batista Matos ¹
Alexandre Cunha Costa ¹

Recibido el 5 de noviembre de 2024. Aceptado el 9 de agosto de 2025

Abstract

The monitoring of dammed waters is important for the management of watersheds, mainly in the semi-arid region due to the meteorological regime in the region. The goal of this research is to analyze the spatio-temporal variability of dissolved oxygen (DO) in the Castanhão reservoir, Brazil, highlighting its impact on fish farming. The data used refer to six sampling stations provided by the Ceará State Company of Water Resources Management. Hydrogen potential (pH), salinity (S), temperature (T), and depth (z) of the water column profile of the reservoir between January 2016, and June 2021 were analyzed. The Kruskal-Wallis test with Post-Hoc analysis and the Mann-Kendall trend test were used. In the spatial analysis on the water surface, most of the DO values observed were above 4.0 mg.L⁻¹, corresponding to the recommended standards for creating Nile romis niloticus). Spatial analysis at the bottom of the reservoir showed that the deeper stations have a lower concentration of DO. It was possible to group the analyzed stations into two groups in the surface analysis (CTN-20 and CTNs) and three groups in the bottom analysis (group A: CTN-20, CTN-24, and CTN-08, group B: CTN-23 and CTN-03, and group C: CTN-16). The seasonal analysis at the bottom showed lower DO availability in the rainy season. In the interannual analysis, cluster A deteriorated over the years concerning DO concentration.

Keywords: aquaculture, dissolved oxygen, tropical semi-arid, water quality.

¹ Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil.

*Autor correspondal: Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brasil. José Franco de Oliveira, sin número, Código postal: 62.790-970, Redenção – Ceará – Brasil. Email: thpris@gmail.com

Introduction

Arid and semi-arid regions represent 45% of the earth's surface (Li *et al.*, 2014). These regions are subject to a marked lack of water resources due to low precipitation, high rainfall variability, and high evaporation (Yanfen *et al.*, 2019). In semi-arid northeastern Brazil, prolonged periods of drought directly impact economic development and pose risks to the region's water, energy, and food security (Marengo *et al.*, 2017). The construction of reservoirs through the damming of non-perennial rivers is a common activity in this region to supply the lack of water during drought (Mamede *et al.*, 2012; Paulino and Teixeira, 2012; Costa *et al.*, 2021; Rabelo *et al.*, 2021).

Dissolved oxygen (DO) concentration in reservoirs is paramount for water quality management. Dammed waters are subject to deterioration of their quality due to high average temperatures, longer water residence time Freire *et al.* (2009) and Bezerra *et al.* (2014), high evaporation, nutrient input from agriculture and domestic sewage Liu *et al.* (2011) and Pimenta *et al.* (2012) and volume reduction resulting from long periods of drought Freire *et al.* (2009) and Wiegand *et al.* (2021).

Due to the high seasonal and interannual variation of the inflow of water (Costa *et al.*, 2021), tropical semi-arid reservoirs generally have large variations in water level and, consequently, are more prone to the release and resuspension of phosphorus from bottom sediments (Santos *et al.*, 2016; Farias Mesquita *et al.*, 2020; Rocha & Lima Neto, 2022). In China, the environmental factors that favored the release of phosphorus in a reservoir in the arid region followed the following ascending order: hydrodynamics > DO > pH > T (Lu *et al.*, 2021). The DO threshold to trigger anaerobic phosphorus release is normally around 1.5 mg L⁻¹ (Chapra & Canale, 1991). A high phosphorus concentration in the water column can lead to algal blooms, making the system more vulnerable to eutrophication (Lins *et al.*, 2017; Lacerda *et al.*, 2018).

Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) has great economic and social potential due to its easy reproduction, rapid growth, low production costs, and physiological ability to adapt to different environments and production systems (Vicente & Fonseca-Alves, 2013). The ideal DO range for Nile tilapia cultivation should be between 4.0 to 5.0 mg.L⁻¹ in tropical reservoirs. Although tilapia is a species that supports a wide range of DO, this species is susceptible to diseases when frequently exposed to low concentrations of oxygen (Silva *et al.*, 2015).

Thus, this research aims to analyze the spatio-temporal variability of DO at the surface and the bottom of Castanhão reservoir, the largest reservoir in the Brazilian semi-arid. The specific objectives are: (1) to statistically evaluate the spatial distribution of DO; (2) to analyze the interannual and seasonal variability of DO; and (3) to relate the DO with the conditions for rearing Nile tilapia on the surface of the reservoir.

Methodology

Study area

The study was carried out in the Castanhão reservoir (Latitude 5.50° S; Longitude 38.47° W) in the Hydrographic Region of the Middle Jaguaribe River, located in the semi-arid region of the State of Ceará, Northeastern Brazil (Figure 1). The Castanhão reservoir has a total storage capacity of 6.7 billion m³, with a normal operating capacity of 4.45 billion m³ (DNOCS, 2017).

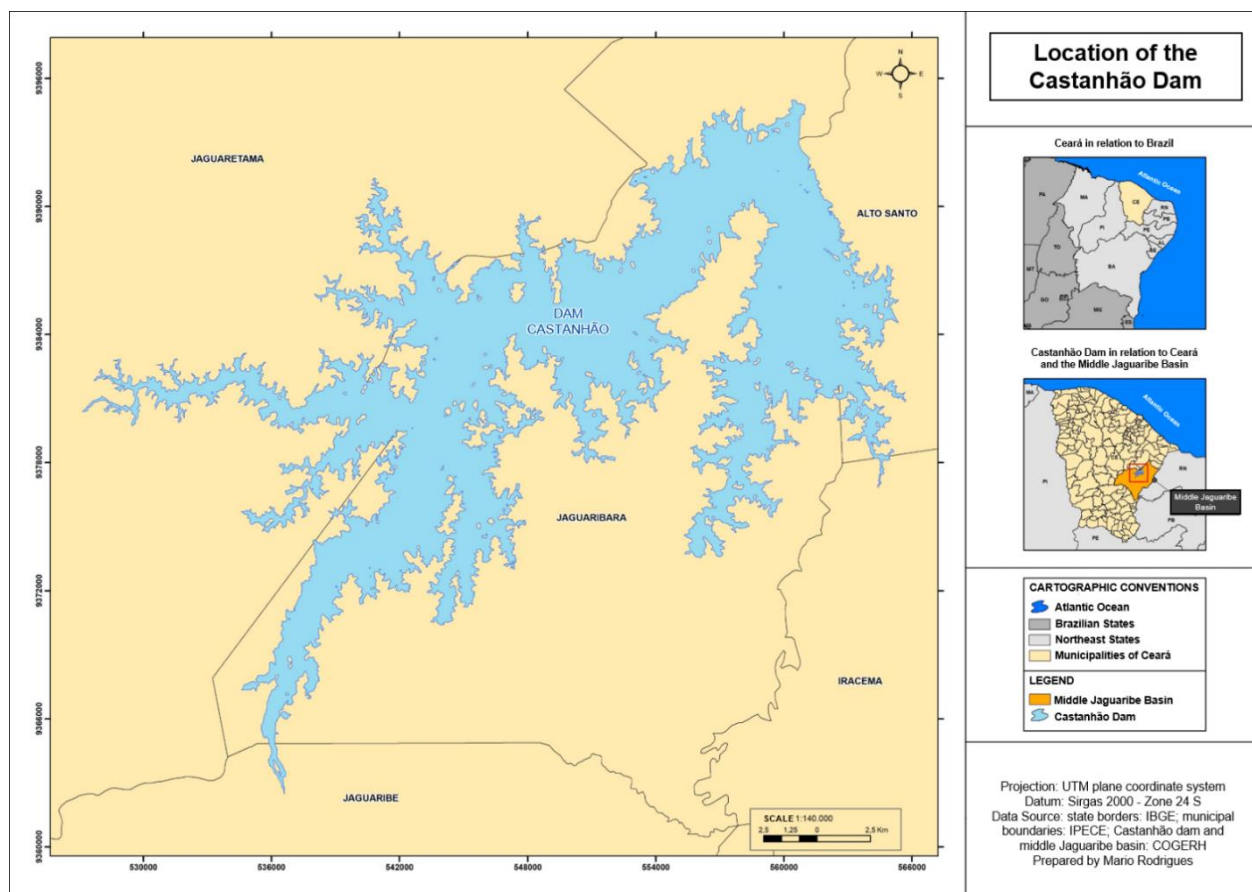


Figure 1. Location of the Castanhão Dam, Ceará, Brazil. Fuente: Matos-Batista, 2021

The climate in the region is considered hot semi-arid according to the Köppen climate classification (BSh'w'), with an average annual temperature of 27°C and an average annual rainfall of 757 mm during the last 80 years (COGERH, 2011). Between 2016 and 2018, and 2021, the annual precipitation observed in the Castanhão reservoir was below the historical average and around the average in 2019 and 2020 (Figure 2).

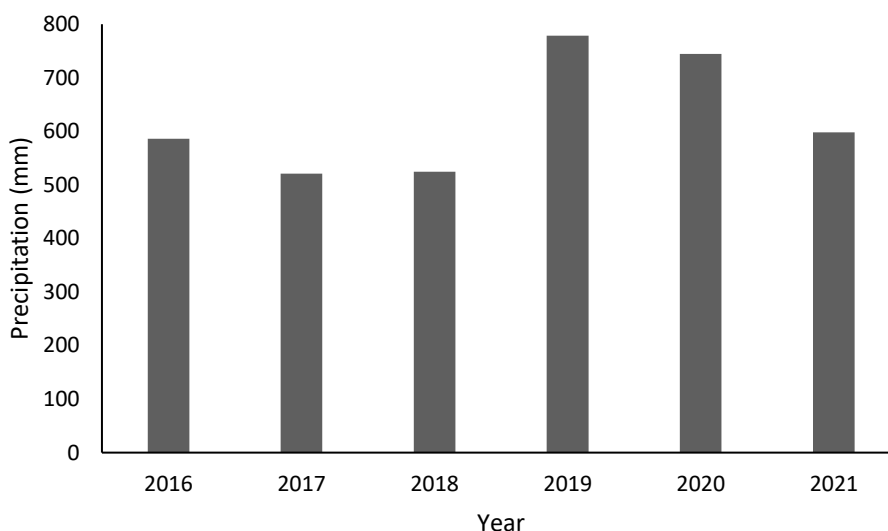


Figure 2. Annual Precipitation in the Castanhão reservoir between 2016-2021.

The region's rainy season is from January to June (Figure 3), with maximum values in March and April. The dry season lasts from July to December (Figure 3), with less rainfall occurring in September and October (Santos *et al.*, 2016). Eastern Wave are responsible for the post-rainy season rains in the state of Ceará, as observed in July relatively high rainfall for the period (Ferreira & Mello, 2005). Figure 4 shows that the reservoir's lowest water levels were observed in 2016-2021, with around 7% of the total capacity (minimum: 2%, maximum: 16%) due to the intense drought and seasonal precipitation variation. Ceará went through a long period of drought between 2012 and 2017, resulting in a decrease in the volume of water in the state's reservoirs (Pereira *et al.*, 2023).

The Castanhão reservoir is an important water reserve mainly intended for human supply in the Metropolitan Region of Fortaleza, capital of the State of Ceará, and in several municipalities downstream of the Jaguaribe River Valley, for drinking animals, irrigation, fish farming, and the regulation of the flow of the Jaguaribe River (COGERH, 2011).

Nutrient emissions to the Castanhão reservoir are due to natural and anthropic sources. The main anthropogenic sources are irrigated agriculture, livestock, fish farming, urban runoff, and solid waste disposal (Lacerda *et al.*, 2018). They present themselves as potential contributors of nutrients to the hydrographic region of the Middle Jaguaribe River, contributing to the environmental imbalance and the increase in human exposure to contaminants (COGERH, 2011).

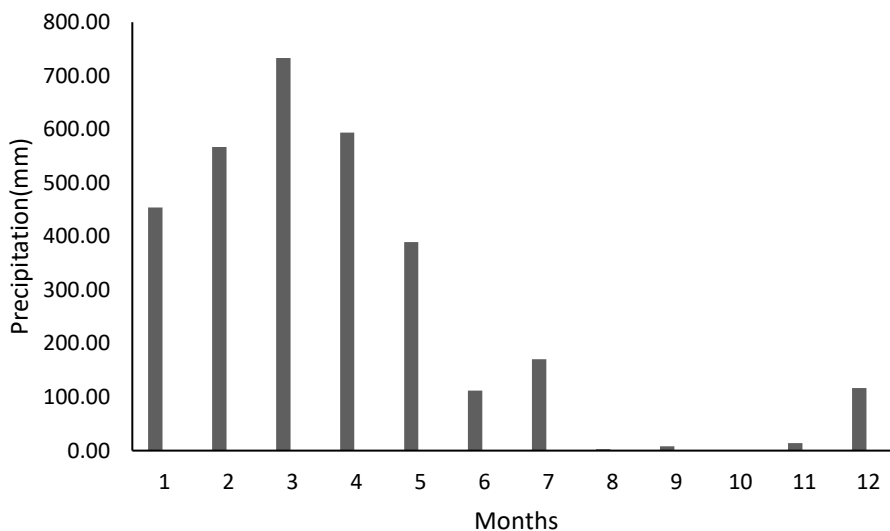


Figure 3. Precipitation seasonality in the Castanhão reservoir.

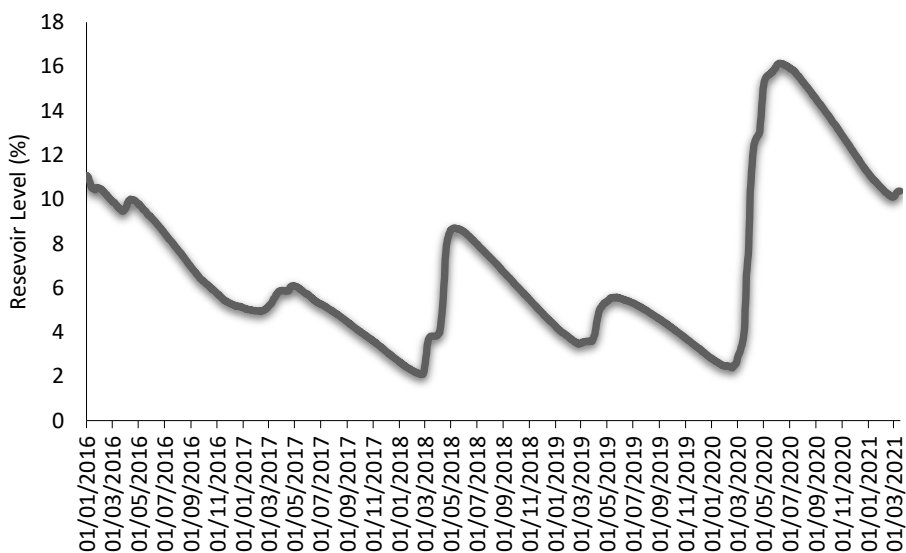


Figure 4. Variation in the volume of the Castanhão reservoir between 2016 and 2021.

Water quality data

The parameters evaluated in this study were DO, temperature (T), hydrogen potential (pH), salinity (S) and depth (z) of water column profiles carried out monthly in the reservoir between June 2016 and June 2021. There was no profile data in April 2020 and from February to May 2021. The Ceará State Company of Water Resources Management (COGERH, in Portuguese) provided all data.

In addition to the water quality parameters described above, the water temperature gradient and the temperature difference between the surface and bottom of the reservoir were used. The temperature gradient was determined by the ratio between the difference in temperatures at the bottom and surface and the difference in depth of measurements (equation 1).

$$\frac{\Delta T}{\Delta Z} = \frac{T_f - T_s}{Z_f - Z_s} \quad \text{Equation (1)}$$

In the equation:

ΔT temperature difference;

ΔZ depth difference of the measurements;

T_f temperature of the reservoir at the bottom;

T_s temperature at the surface;

Z_f depth at which the measurement was taken at the bottom;

Z_s depth at which the measurement was taken at the surface.

Figure 5 shows the measuring stations where the Ceará State Company of Water Resources Management (COGERH) performed the "in situ" profiling. They are CTN-20 (near the dam), CTN-24 and CTN-23 (near fish farm areas), CTN-03, and CTN-08 (left and main arm for the supply of water and nutrients), and CTN-16 (right and secondary arm for the supply of water and nutrients). Data from the surface and bottom of the reservoir were used from profiling, corresponding to a depth of 0.30 m from the surface and 1.0 m from the bottom, respectively. Table 1 presents the depth variation range at which profiling occurred during the study period and the maximum depth of the reservoir at the water quality sampling station.

It is important to note that, due to the long dry period experienced by the Castanhão Reservoir, some of the reservoir's profiling was performed at a depth of approximately 2.0 meters, following the methodology adopted by COGERH. Therefore, the surface and bottom data were measured under virtually the same conditions during some periods between 2017 and 2020. These measurements correspond to stations CTN-03 and CTN-23.

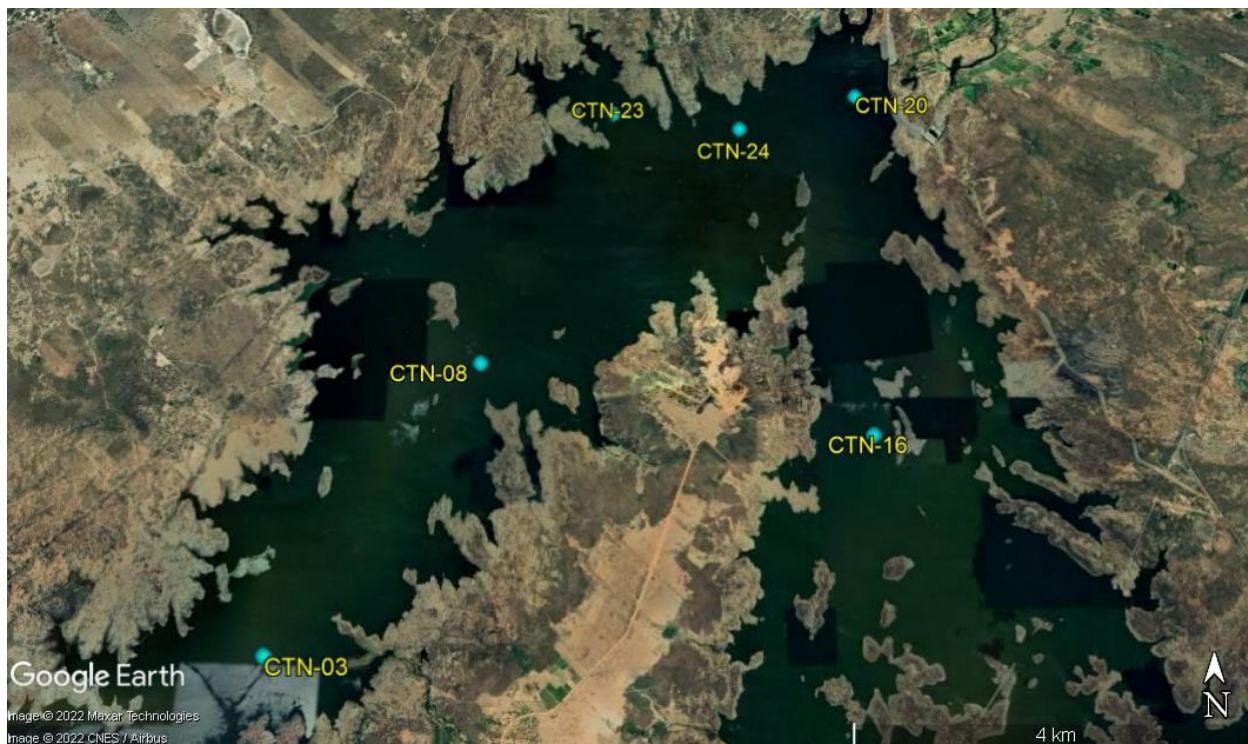


Figure 5. Spatial distribution of water quality measurement stations in the Castanhão reservoir (CTN-20, CTN-24, CTN-23, CTN-08, CTN-03, and CTN-16). *Fuente Google Earth, 2022*

Table 1. Depth range between 2016-2021 measurements and maximum depth for each sampling station.

Sampling stations	Measurement depth variation (m)	Maximum depth (m)
CTN-20	10.52 - 30.01	36.12
CTN-24	7.46 - 10.24	33.03
CTN-08	5.52 - 24.00	35.11
CTN-23	1.00 - 19.45	26.03
CTN-03	0.46 - 17.60	28.71
CTN-16	3.42 - 19.04	25.12

Spatial analysis

The spatial analysis included the measurement of DO, pH, T, S and z values. The difference in water temperature between the surface and bottom and the temperature gradient was also analyzed. The Shapiro-Wilk normality test (SW) was used to verify if the sample data from each monitoring station had a Gaussian distribution. Then, the Kruskal-Wallis test (KW) was applied to verify if the samples from the stations originated from the same distribution. If so, the Dwass-

Steel-Critchlow-Fligner test (DSCF) was used to assess whether there were significant differences between pairs of samples from each station. Clusters with statistical similarities were formed from non-significant ranks. A significance level of 1% was used in all analyzes. The free Jamovi software (<https://www.jamovi.org/>) was used to analyze the data collected.

Seasonal analysis

The seasonal analysis considered the DO variation between the rainy season, from January to June, and the dry season, from July to December. The same statistical procedure used in the spatial analysis, the application of SW, KW, and DSCF tests, was used to analyze the variation of DO between the rainy and dry seasons, both at the surface and at the bottom of the reservoir. However, this temporal analysis was based on a compartmentalized view of the Castanhão reservoir considering the DO spatial clusters.

Interannual analysis

DO box diagrams were created for the interannual analysis, and the Mann-Kendall test (MK) was applied considering the period of 2016-2020. The compartmentalization into clusters was again considered in the comparative evaluation. The MK test was applied to verify the existence of a monotonous, positive, or negative trend in the series. Therefore, the normality of the series was verified, and the existence of serial correlation was tested by applying the autocorrelation function (ACF). The analyzed stations were CTN-20, CTN-24, CTN-08, and CTN-23. Stations CTN-03 and CTN-16 were excluded due to missing data. XLSTAT, an MS Excel data analysis add-on (<https://www.xlstat.com>), was used to run the MK test.

Results

Spatial analysis

The statistical analysis showed that the DO at the CTN-20 station differed statistically from the other five sampling stations on the reservoir surface. It is possible to group the surface stations into two spatial clusters: CTN-20 and CTNs. The CTN-20 station had the lowest DO values among the six stations (Figure 6). At least 50% of the DO values were above 5.0 mg.L^{-1} (the minimum value for Nile tilapia rearing is 4.0 mg.L^{-1}) (Silva *et al.*, 2015).

Regarding the DO at the bottom of the reservoir, the result obtained from the statistical tests allowed the grouping of stations into three spatial clusters: cluster A (CTN-08, CTN-20, and CTN-24), cluster B (CTN-03 and CTN-23), and cluster C (CTN-16). The analysis of the DO box diagrams in Figure 7 shows that cluster A (CTN-08, CTN-20, and CTN-24) presented the lowest DO concentrations. Considering that the DO limit for releasing phosphorus from the sediment in an anaerobic situation is 1.5 mg.L^{-1} (Chapra & Canale, 1991), phosphorus release in the reservoir may have occurred, mainly in the cluster A region.

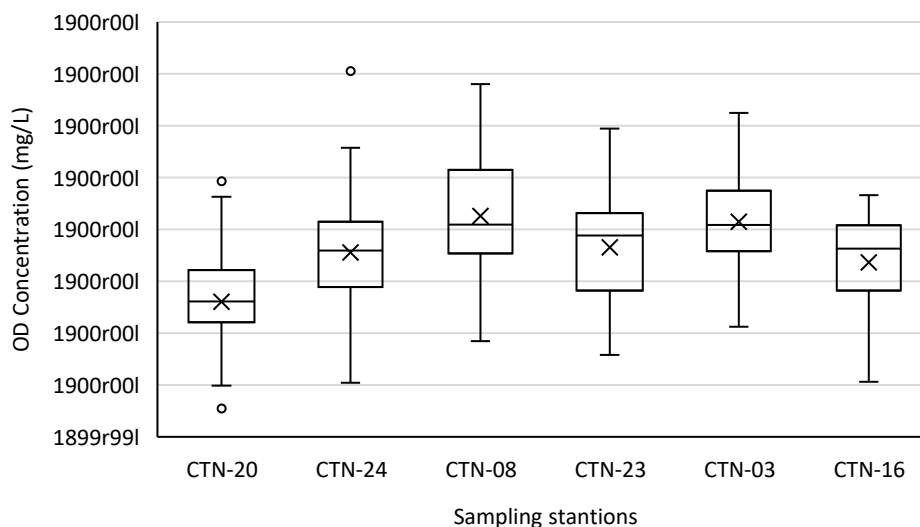


Figure 6. Box diagram for surface dissolved oxygen (DO) for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

Cluster A represents the stations with the greatest depth (Figure 8). The findings show a similar result to that found for DO at the bottom of the reservoir, except for the CTN-20 station, which was statistically different from the other five.

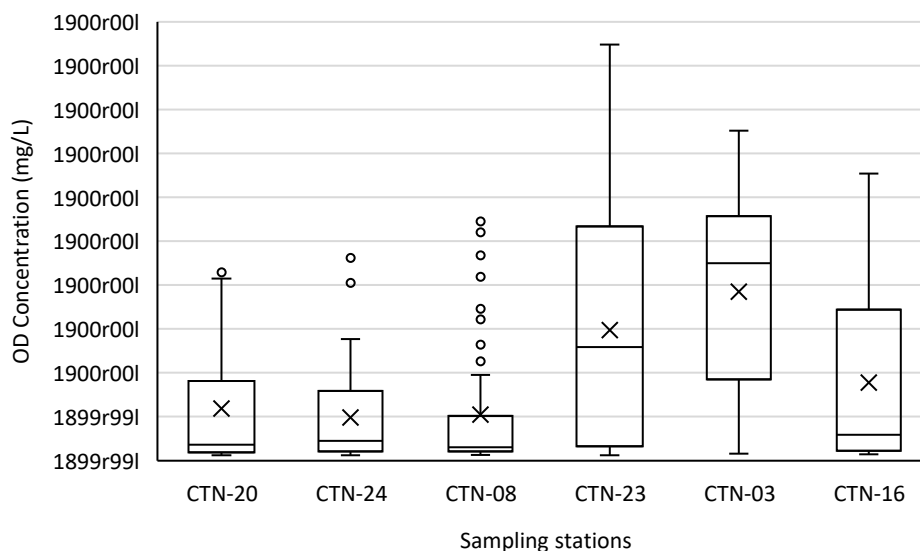


Figure 7. Box diagram for dissolved oxygen (DO) at the bottom for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

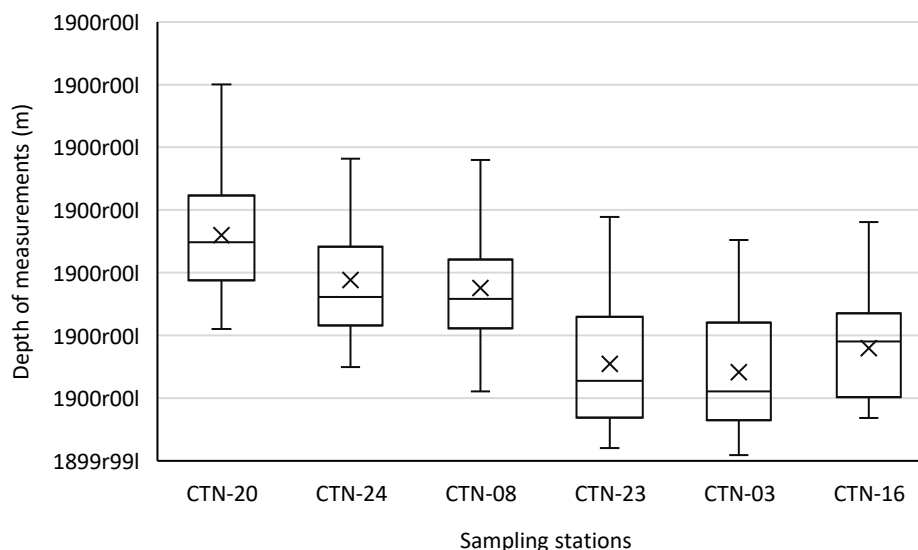


Figure 8. Box diagram for depth of bottom measurements for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

Stations CTN-03, CTN-08, CTN-20, and CTN-24 are positioned in the longitudinal profile of the reservoir that receives water from the Jaguaribe River, the main contributor of water and nutrients to the reservoir. However, station CTN-03 does not present low concentrations of DO, as observed in other stations. Possibly, the low concentrations of DO existing in cluster A are related to the reception of nutrients and organic matter from the Jaguaribe River that accumulates in the deepest regions of the reservoir. This environment provides greater DO consumption due to the decomposition of organic matter, which may cause to low DO concentrations in the bottom.

In fact, the depth of the reservoir has a great influence on the quality of the water. In these systems, transport processes occur preferentially along with the depth. Among the factors related to depth is the speed of heat transfer in the water mass, the energy of the winds that cannot be enough to mix the water column, and the process of thermal and chemical stratification (Cunha & Ferreira, 2013; Bezerra *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 2016; Rocha and Lima Neto, 2022).

The existence of thermal stratification hinders the exchange of matter between the upper and lower water column, causing a prolonged anaerobic reduction state. This causes the nutrients from the sediment to continue to be released into the water column, causing the deterioration of water quality (Lima Neto *et al.*, 2022). In a study carried out at the Castanhão reservoir, nutrient accumulation was found in deeper monitoring stations (Santos *et al.*, 2016).

The comparison test result for water temperature on the reservoir's surface showed that CTN-20 was statistically different from CTN-08, CTN-03, and CTN-23. A similar finding was found concerning the bottom temperature, showing that CTN-20 differed from CTN-03 and CTN-23 and that CTN-03 and CTN-24 differed from each other. The surface T-box diagram (Figure 9) and the bottom T-box diagram (Figure 10) show that the water temperatures at the surface and bottom were similar.

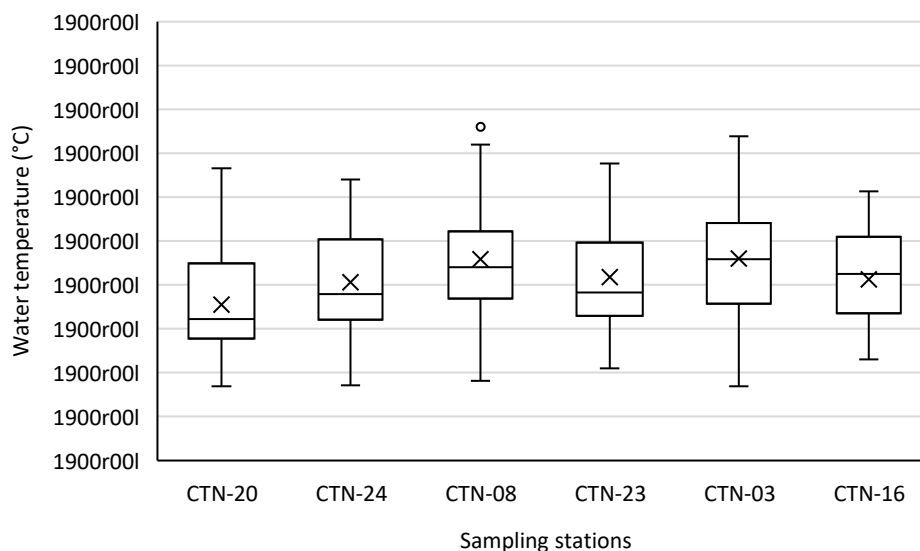


Figure 9. Box diagram for surface water temperature (T) for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

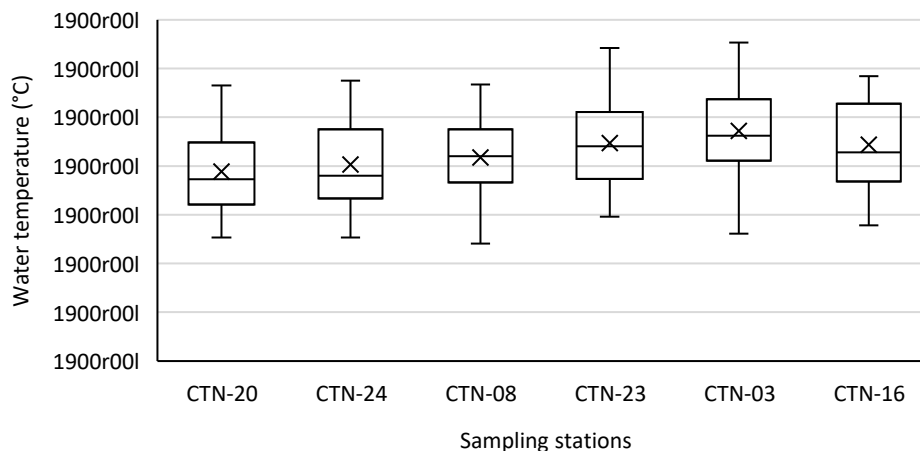


Figure 10. Box diagram for water temperature (T) at the bottom for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

It was impossible to explain the spatial variation of DO at the surface and the bottom of the reservoir through the statistical tests and box diagrams performed using water temperature data. The temperature gradient (Figure 11) and the temperature difference (Figure 12) were then analyzed to explain the spatial variation of DO at the bottom of the reservoir. The results showed different patterns from those found at the bottom of the reservoir. The low DO concentrations at the bottom of the reservoir in cluster A are possibly related to the greater depth found in the stations in this cluster, which allows the formation of a lower water mass in a prolonged anaerobic reduction state.

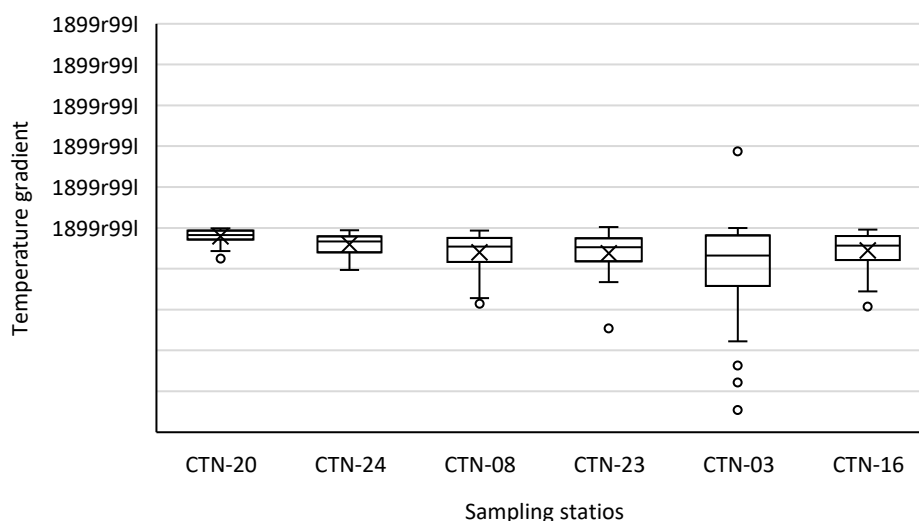


Figure 11. Box diagram for temperature gradient for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

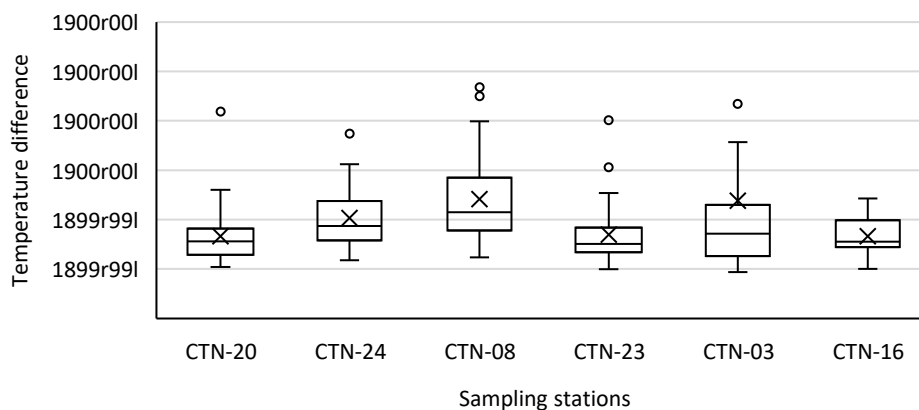


Figure 12. Box diagram for temperature difference (surface-bottom) for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

The results of the statistical tests for surface pH were similar to those found for surface DO, making it possible to divide the stations into two clusters: CTN-20 and other CTNs. The CTN-20 cluster had the lowest pH (Figure 13), and the lowest DO concentrations (Figure 6). Concerning the pH at the bottom of the reservoir, the statistical tests showed similar results to those found for DO at the bottom. The CTN-16 station did not show consistent results in the tests, being placed in a separate cluster. The pH box diagrams (Figure 14) show that all stations analyzed had pH values below 8.0, which characterizes an acidic to a neutral environment.

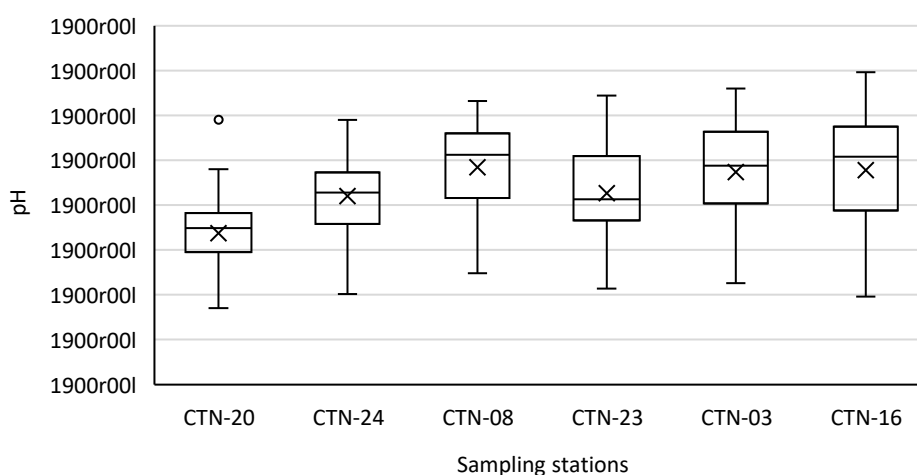


Figure 13. Box diagram for surface hydrogen potential (pH) for each sampling station between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

DO and pH values indicated a favorable environment of phosphorus release from the Castanhão reservoir sediment in cluster A (CTN-20, CTN-24, and CTN-08), mainly around CTN-08, which had the lowest DO value (below 1.0 mg.L^{-1}) (Figure 7). Further analysis involving temperature, pH and DO is required to confirm the release of phosphorus from the reservoir sediment. In another study carried out in a reservoir in the northeastern semi-arid region, it was found that phosphorus was released from the sediment in a range of 1.0 to 5.0 mg.L^{-1} associated with different T and pH conditions, equal to 6, 8, and 10. However, the greatest phosphorus release occurred in an anoxic environment ($\text{DO} < 1.0 \text{ mg.L}^{-1}$), at $\text{pH}=10$ and $T=32^\circ\text{C}$ (Cavalcante *et al.*, 2021).

The statistical tests and box plots performed with salinity failed to explain the spatial variation in DO at the surface and bottom of the reservoir. Comparison tests for surface (Figure 15) and bottom (Figure 16) salinity data showed only station CTN-16 to be statistically different from stations CTN-20, CTN-24, and CTN-08. The box plot for salinity for the six stations analyzed

presents a virtually homogeneous scenario for the entire reservoir, with salinity around 0.20‰. In Brazil, CONAMA resolution 357/2005 considers water to be freshwater when it has a salinity greater than 0.05 ‰ and less than 30 ‰. In 2007, in a study on the sustainability of fish farming activities, a salinity of 0.30 ‰ was found in the Castanhão reservoir (Nascimento, 2007).

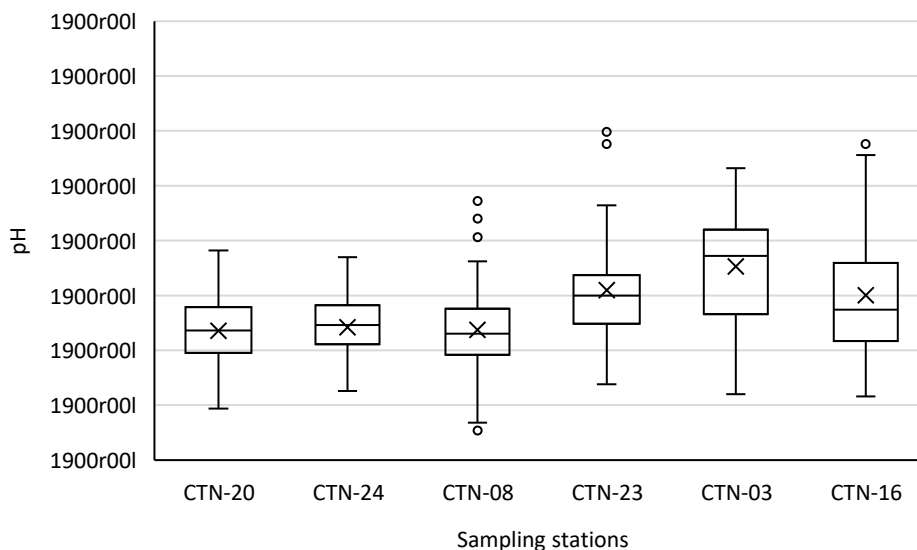


Figure 14. Box diagram for each sampling station's bottom's hydrogen potential (pH) between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

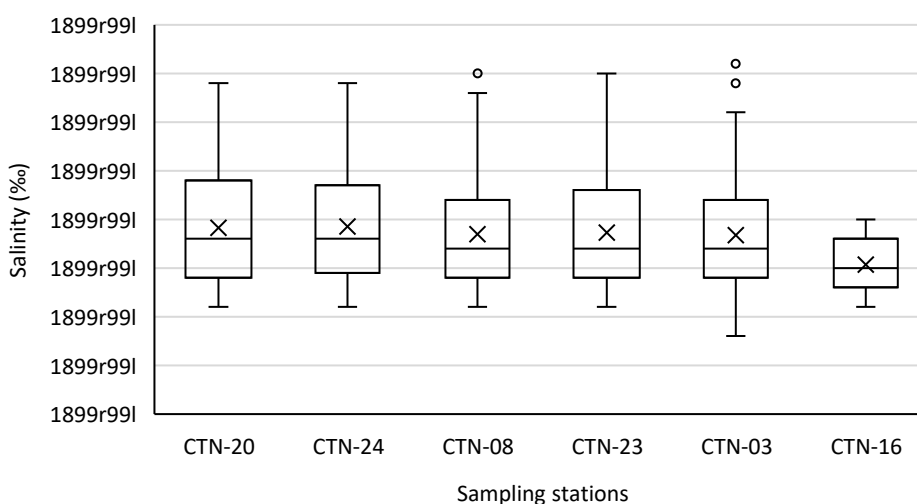


Figure 15. Box diagram for surface salinity (s) between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

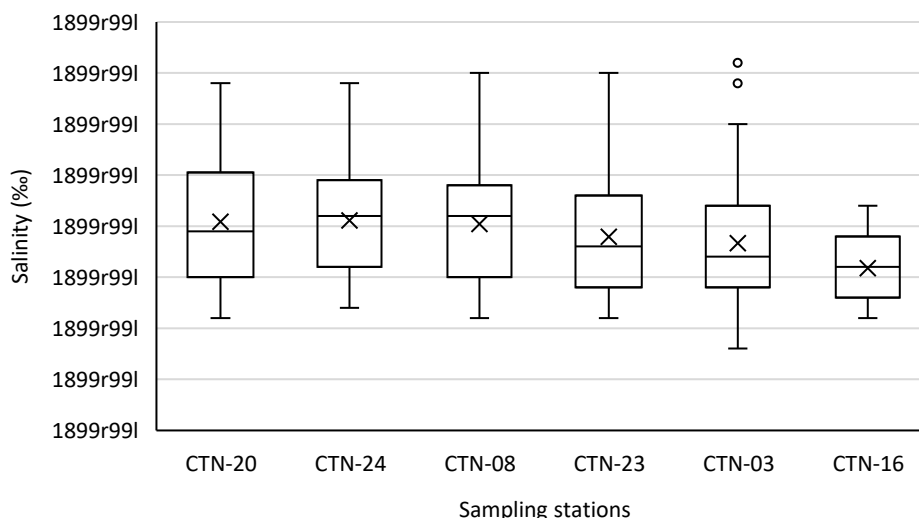


Figure 16. Box diagram for each sampling station's bottom's salinity (s) between 2016-2021. The location of the stations in the Castanhão reservoir is shown in Figure 5.

Seasonal analysis

The seasonal analysis was performed considering the compartmentalized reservoir in two surface clusters (CTN-20 and CTNs) and three bottom clusters: A (CTN-08, CTN-20, and CTN-24), B (CTN-23 and CTN- 03), and C (CTN-16). The KW test did not show significant differences between the wet and dry seasons at the surface, indicating a dominance of the spatial scale over the seasonal one (Figure 15). Consequently, it was not necessary to apply for the DSCF test. Similar results were found for the Castanhão reservoir, which presented DO concentrations in surface waters statistically equal across the seasons (Santos *et al.*, 2016; Lacerda *et al.*, 2018).

The lower DO concentrations in the rainy season may be related to the entry of organic matter brought by the rainwater. Aquatic ecosystems in the semi-arid northeast of Brazil tend to undergo severe physical and chemical changes during the rainy season. River inlets are responsible for most of the nutrients the reservoirs receive in the rainy season (Araújo *et al.*, 2011; Paulino & Teixeira, 2012; Lu *et al.*, 2021; Rocha and Lima Neto, 2022).

Clusters A, B, and C differed from each other between the rainy and dry seasons, which indicates equal importance of the spatial and seasonal scales for DO variation at the bottom. The DO values at the bottom were statistically lower in the rainy season, mainly in clusters A and C (Figure 18). Temperature and pH analyses are important to check phosphorus release. In tropical semiarid regions, other studies show phosphorus release during the rainy season

(Araújo *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2016; Lacerda *et al.*, 2018; Lima Neto *et al.*, 2022). Under anoxic conditions, phosphorus was released into the water column (Moura *et al.*, 2020). In a reservoir in the semi-arid region of northeastern Brazil, a higher phosphorus concentration was observed during the rainy season, when the stratification environment and low concentrations of DO were more evident. This condition was related to the combination of external and internal loads (Lima Neto *et al.*, 2022).

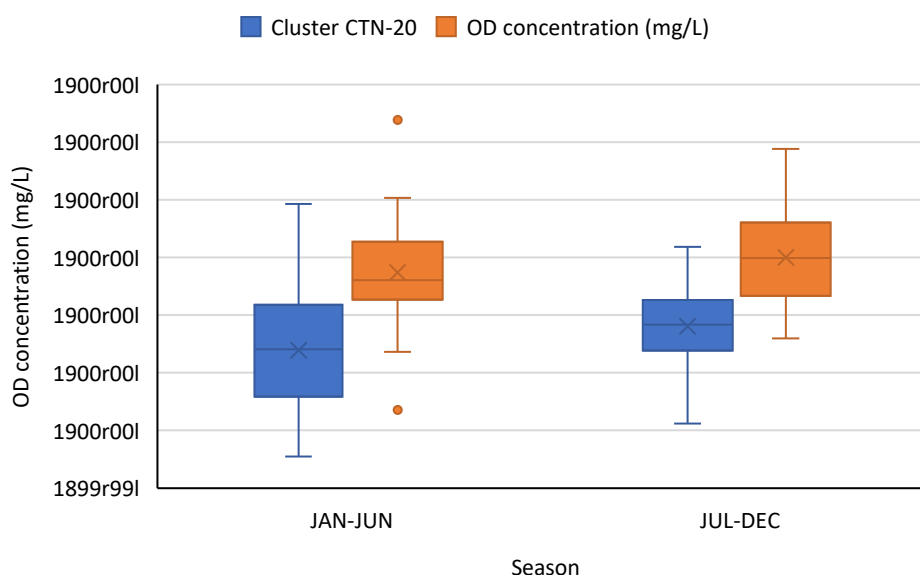


Figure 17. Box diagram for surface dissolved oxygen (DO) for CTN-20 and CTN clusters, between wet and dry seasons, 2016-2021.

This result may also be related to the thermal stratification of the reservoir. Low levels of hypolimnetic DO (hypoxia) were related to the thermal stratification of the water column in tropical reservoirs (Lima Neto *et al.*, 2022). The vertical profile of the temperature in the reservoirs can vary by season (Santos *et al.*, 2017; Lacerda *et al.*, 2018) also due to the entry of colder waters (Meireles *et al.*, 2007; Long *et al.*, 2019). The rainwater, colder than the stored water, reaches the reservoir and quickly sinks to the bottom, thus generating a stratified environment due to the differences in water density caused by temperature (Araújo *et al.*, 2011). The thermocline makes it difficult to oxygenate the water at the bottom of the reservoir because DO transport is compromised due to density difference and wind action (Meireles *et al.*, 2007). This may explain the role of reservoir depth in the spatial variation of DO.

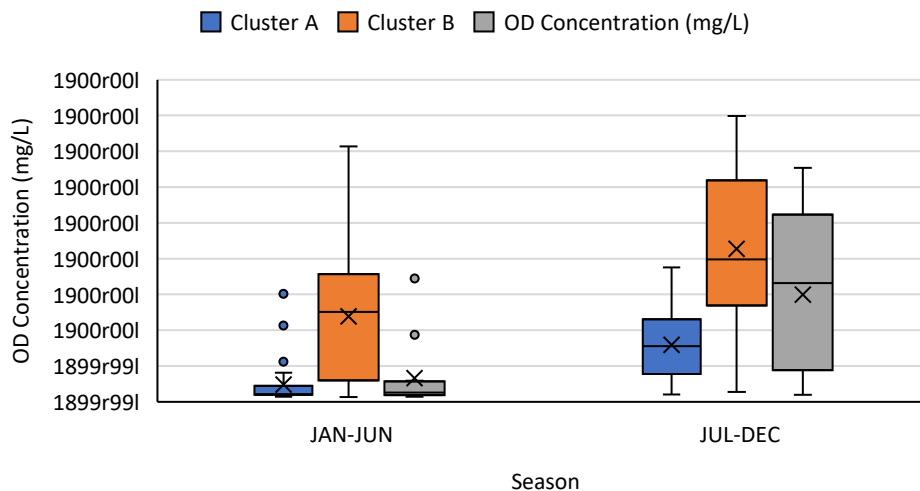


Figure 18. Box diagram for dissolved oxygen (DO) in the bottom for clusters A (CTN-08, CTN-20 and CTN-24), B (CTN-03 and CTN-23), and C (CTN-16) between the wet and dry seasons, 2016-2020.

Interannual analysis

The interannual analysis of the DO at the surface considered the CTN-20 and CTN clusters. The bottom of the reservoir was divided into three clusters: A (CTN-08, CTN-20 and CTN-24), B (CTN-03 and CTN-23), and C (CTN-16). The interannual analysis showed that, year after year, CTN-20 had the lowest oxygen levels (Figure 19).

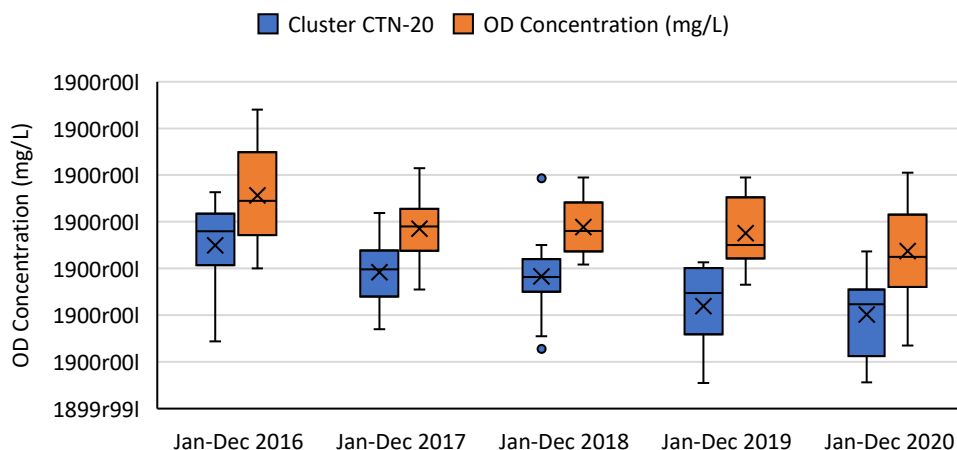


Figure 19. Box diagram for surface dissolved oxygen (DO) for CTN-20 and CTNS clusters between 2016-2020.

It was possible to observe a decrease in the OD levels of both clusters (CNT-20 and CTNs), following the low level of the reservoir due to the prolonged hydrological drought (see Figure 3). Regarding the analysis at the bottom of the reservoir, cluster A (CTN-08, CTN-20, and CTN-24) presented the lowest DO concentrations, with most values below 1.5 mg.L^{-1} (Figure 20).

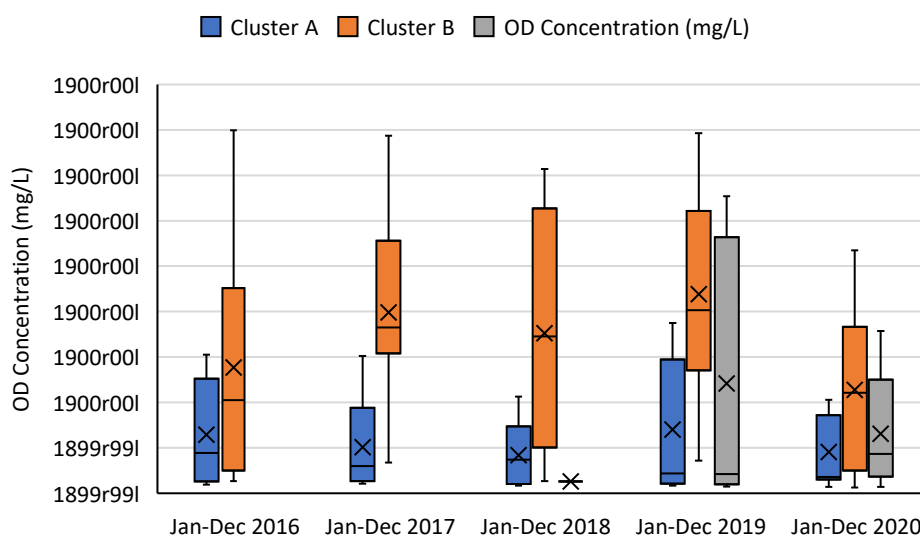


Figure 20. Box diagram for dissolved oxygen (OD) in the bottom for clusters A (CTN-08, CTN-20 and CTN-24), B (CTN-03 and CTN-23), and C (CTN-16) between 2016-2020.

The MK test indicated a negative trend (Kendall's: -0.520 and -0.366, respectively) of the DO concentrations in CTN-20 and CTNs. However, the two trends did not show statistical significance ($p\text{-value CTN-20} = 1,000$, and $p\text{-value CTNs} = 0.996 > \alpha = 0.01$).

The analyzes show a decline in DO levels in CTN-20, although the MK test showed a low significance. The tests demonstrate that the interannual variability is low concerning the spatial variation of DO at the surface and the bottom. Furthermore, seasonality is much more influential than the interannual DO variability. The MK test results for clusters A and B indicated a positive trend (Kendall's 0.003 and 0.182, respectively). However, there was no statistically significant trend in any of the clusters ($p\text{-value A} = 0.500$, $p\text{-value B} = 0.102 > \alpha = 0.01$).

Conclusions

The analysis of DO variability in the Castanhão reservoir made it possible to divide the surface into two spatial clusters, the CTN-20 and the other CTNs. The CTN-20 cluster, closer to the weir dam, had the lowest DO concentration, although most values are within the ideal range for Nile tilapia rearing. Through the spatial analysis at the bottom of the reservoir, cluster A (CTN-08, CTN-20, and CTN-24) had the lowest DO concentration.

Based on the temperature and salinity values, it was not possible to relate these variables to the variation in the concentration of [DO]. Cluster A had the stations with the highest depth, this variable may be related to low DO concentrations. Additional analyses are essential to verify the release of phosphorus from the reservoir settling, especially in the region of cluster A. The spatial analysis indicated a dominance in relation the seasonal at the surface, as the statistical tests did not show significant differences between the rainy and dry seasons. The seasonal analysis at the bottom showed that the reservoir is more degraded in the rainy season.

The interannual analysis showed a marked decrease in DO concentrations on the reservoir's surface over the analyzed period. Regarding the data at the bottom of the reservoir, cluster A was the most deteriorated concerning the DO concentration. The findings are relevant for the public management of water resources, as it presents a methodological proposal that enables the grouping of sampling stations. Besides, it is possible to reduce time and costs using water quality data from the Castanhão reservoir, which can be replicated for other reservoirs in the semi-arid region.

Bibliographical References

- Addinsoft (2021) *XLSTAT*, Statistical Software for Excel. Accessed on 28 jul. 2021. Available at: <https://www.xlstat.com>
- Araújo, F. G., Azevedo, M. C. C., Ferreira, M. N. L. (2011) Seasonal changes and spatial variation in the water quality of a eutrophic tropical reservoir determined by the inflowing river, *Lake and Reservoir Management*, **27**(4), 343-354. Accessed on 21 jun. 2024. Available at: <https://doi.org/10.1080/07438141.2011.627753>
- Bezerra, L. A. V., Paulino, W. D., Garcez, D. S., Becker, H., Sánchez-Botero, J. I. (2014) Limnological characteristics of a reservoir in semi-arid Northeastern Brazil subject to intensive tilapia farming (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758), *Acta Limnologica Brasiliensia*, **26**(1), 47-59. Accessed on 28 jun. 2024. Available at: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2014000100007>
- Cavalcante, H., Araújo, F., Becker, V., Barbosa, J. E. L. (2021) Internal phosphorus loading potential of a semiarid reservoir: an experimental study, *Acta Limnologica Brasiliensia*, **33**(1). Accessed on 31 jul. 2021. Available at: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X10220>
- COGERH, Ceará State Company of Water Resources Management (2011) *Inventário ambiental do açude Castanhão*. Accessed on 29 jun. 2024. Available at: <https://portal.cogerh.com.br/publicacoes-inventarios/>
- Chapra, S. C., Canale, R. P. (1991) Long-term phenomenological model of phosphorus and oxygen for stratified lakes, *Water Research*, **25**(6), 707-715. Accessed on 28 jul 2024. Available at: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90046-S)
- Costa, M. R. A., Attayde, J. L., Becker, V. (2016) Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes, *Hydrobiologia*, **778**(1), 75-89. Accessed on 03 mar. 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2593-6>

- Costa, A. C., Estácio, A. B. S., Souza Filho, F. A., Lima Neto, I. E. (2021) Monthly and seasonal streamflow forecasting of large dryland catchments in Brazil, *Journal of Arid Land*, **13**(3), 205-223. Accessed on 28 jul 2024. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0097-y>
- Cunha, C., Ferreira, M. (2013) Numerical simulation of the temperature dynamics at Rio Verde Reservoir, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **18**(1), 83-93. Accessed on 02 nov .2021. Available at: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000100010>
- DNOCS, National Department for Works Against Droughts (2017) *Relatório de Gestão* [online]. Accessed on 14 abr 2021. Available at: <https://www.gov.br/dnocs/pt-br/assuntos/noticias/castanhao-tem-maior-aporte-do-periodo>
- Farias Mesquita, J. B. Lima Neto, I. E., Raabe, A., Araújo, J.C. (2020) The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake, *Journal Hydrology (Amsterdam)* [online], **590**(11), 125456. Accessed on 06 ago 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125456>
- Ferreira, A. G., Mello, N. G. S. (2005) Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região, *Revista Brasileira de Climatologia*, **1**(1), 15-28. Accessed on 30 jul 2025. Available at: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58504?mode=full>
- Freire, R. H. F., Calijuri, M. C., Santaella, S. T. (2009) Longitudinal patterns and variations in water quality in a reservoir in the semi-arid region of NE Brazil: responses to hydrological and climatic changes, *Acta Limnologica Brasiliensia*, **21**(2), 251-262
- GOOGLE. Google Earth (2022) website. Accessed on 26 jul 2021. Available at: <http://earth.google.com>
- Jamovi Project (2021) *Jamovi*, (Version 1.6) Computer Software. Accessed on 27 jul. 2021. Available at: <https://www.jamovi.org>
- Lacerda, L. D., Santos, J. A., Marins, R. V., Silva, F. A. T. F. (2018) Limnology of the largest multi-use artificial reservoir in NE Brazil: The Castanhão Reservoir, Ceará State, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **90**(2), 2073-2096. Accessed on 26 jul 2021. Available at: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820180085>
- Lima Neto, I. E., Medeiros, P. H. A., Costa, A. C., Wiegand, M. C., Barros, A. R. M., Barros, M. U. G. (2022) Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes, *The Science of the Total Environment*, **815**(1), 152875. Accessed on 12 jan. 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152875>
- Li, C., Zhao, T., Ma, Z. (2014) Impacts of anthropogenic activities on climate change in arid and semiarid areas based on CMIP5 models, *Chinese Science Bulletin (Chinese Version)*, **59**(30), 2972-2988. Accessed on 28 jul 2024. Available at: <https://doi.org/10.1360/N972014-00039>
- Lins, R. P. M., Ceballos, B. S. O., Lopez, L. C. S., Barbosa, L. G. (2017) Phytoplankton functional groups in a tropical reservoir in the Brazilian semi-arid region, *Revista de Biologia Tropical*, **65**(3), 1129-1141. Accessed on 08 ago 2024. Available at: <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v65i3.29446>
- Liu, Y., Chen, W., Li, D., Huang, Z., Shen, Y., Liu, Y. (2011) Cyanobacteria-/cyanotoxin-contaminations and eutrophication status before Wuxi drinking water crisis in Lake Taihu, China, *Journal of Environmental Sciences*, **23**(4), 575-581. Accessed on 08 ago 2024. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60450-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60450-0)
- Long, L., Ji, D., Liu, D. F., Yang, Z. (2019) Effect of cascading reservoirs on the flow variation and thermal regime in the lower reaches of the Jinsha River, *Water*, **11**(5), 1008. Accessed on 08 ago 2024. Available at: <https://doi.org/10.3390/w11051008>
- Lu, J., Liu, T., Zhang, X., Gao, R., Liu, Y. (2021) A dynamic flux model for analyses of phosphorus exchange between overlying water and sedimentary deposits of a reservoir in the cold area of north China, *Ecological Engineering*, **161**(3), 106116. Accessed on 08 ago 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106116>
- Matos-Batista, T. P. B. (2021) Análise espaço-temporal do oxigênio dissolvido no açude Castanhão, Ceará, Brasil, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente (PGEA), Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, 113pp. Accessed on 02 dez, 2025. Available at: <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/handle/123456789/3151>

- Mamede, G. L., Araujo, N. A. M., Schneider, C. M., Herrmann, H. J. (2012) Overspill avalanching in a dense reservoir network, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**(19), 7191-7195. Accessed on 08 ago 2024. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.120039810>
- Marengo, J. A., Torres, R. R., Alves, L. M. (2017) Drought in Northeast Brazil – past, present, and future, *Theoretical and Applied Climatology*, **129**(3), 1189-1200. Accessed on 09 jul 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Meireles, A. C., Frischkorn, H., Andrade, E. M. (2007) Seasonal quality changes in waters from Edson Queiroz dam, Acaraú basin, in the semiarid of Ceará, *Revista Ciência Agronômica*, **38**(1), 25-31. Accessed on 19 nov 2021. Available at: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/145/140>
- Moura, D. S., Lima Neto, I. E., Clemente, A., Oliveira, S., Pestana, C. J., Melo, M. A., Capelo-Neto, J. (2020) Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semi-arid reservoirs, *Chemosphere*, **246**(9), 125686. Accessed on 30 jul. 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125686>
- Nascimento, S. C. O. (2007) *Avaliação da sustentabilidade do projeto de Piscicultura Curupati-Peixe no açude Castanhão, Jaguaribara-CE*, Master's Dissertation, Postgraduate Program in Development and Environment - PRODEMA, Departamento, Federal University of Ceará, 127 pp.
- Paulino, W. D., Teixeira, F. J. C. (2012) A questão ambiental e a qualidade da água nas bacias hidrográficas do Nordeste. Em: Centro de Gestão e Recursos Estratégicos, Agência Nacional de Água (Eds.), *A Questão da Água no Nordeste*, Corporate Financial Center, Brasília, 219-246.
- Pereira, B., Medeiros, P., de Araujo, J. (2023) Seca no Ceará 2012-2017. In Zanandrea, F., Kobiyama, M., Michel, G.P., Fleischmann, A.S., Collischonn, W. (Orgs.), *Desastres e água: eventos históricos no Brasil*, ABRHidro, Porto Alegre, 315-334.
- Pimenta, A., Albertoni, E., Palma-Silva, C. (2012) Characterization of water quality in a small hydropower plant reservoir in southern Brazil, *Lakes & Reservoirs Research & Management*, **17**(4), 243-251. Accessed on 15 out 2020. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/lre.12007>
- Rabelo, U. P., Dietrich, J., Costa, A. C., Simshäuser, M. N., Scholz, F. E., Nguyen, V. T., Lima Neto, I. E. (2021) Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model, *Journal of Hydrology*, **603**(12), 127103. Accessed on 12 ago 2024. Available at <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103>
- Rocha, M., Lima Neto, I. E. (2022) Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs, *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(7), 10027-10046. Accessed on 12 ago 2024. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16251-w>
- Santos, J. A., Oliveira, K. F., Araújo, I. C. F., Avelino, I. I. F., Cajuí, K. N. S., Lacerda, L. D., Marins, R. V. (2016) Phosphorus partitioning in sediments from a tropical reservoir during a strong period of drought, *Environmental Science and Pollution Research*, **23**(23), 24237-24247. Accessed on 30 jul 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7629-6>
- Santos, J. A., Marins, R. V., Aguiar, J. E., Chalar, G., Silva, F. A. T. F., Lacerda, L. D. (2017) Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions, *Journal Limnology*, **76**(1), 41-51. Accessed on 08 jul 2021. Available at: <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1433>
- Silva, G. F., Maciel, L. M., Dalmass, M. V., Gonçalves, M. T. (2015) *Tilápia-do-Nilo: Criação e cultivo em viveiros no estado do Paraná*, Grupo Integrado de Aquicultura e Estudos Ambientais, Curitiba, 290 pp.
- Vicente, I. S., Fonseca-Alves, C. E., 2013. Impact of introduced Nile tilapia (*Oerochromis niloticus*) on non-native aquatic ecosystems, *Pakistan Journal of Biological Sciences*, **16**(3), 121-126. Accessed on 22 jun. 2021. Available at: <https://doi.org/10.3923/pjbs.2013.121.126>
- Yanfen Y., Lei B., Bing W., Jing W., Suhua F. (2019) Reliability of the global climate models during 1961–1999 in arid and semiarid regions of China, *Science of The Total Environment*, **667**(1), 271-286. Accessed on 12 ago. 2024. Available <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.188>
- Wiegand, M. C. Nascimento, A. T. P.; Costa, A. C.; Lima Neto, I. E. (2021) Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability, *Journal of Arid Environments*, **184**(1), 104321. Accessed on 21 nov 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104321>

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ALTERNATIVAS DE REÚSO DE ÁGUAS CINZAS APÓS TRATAMENTO QUÍMICO

ALTERNATIVES FOR REUSING GRAY WATER AFTER CHEMICAL TREATMENT

Ranyere do Nascimento Lôbo¹

Rui Felipe de Miranda Rios²

Jéssica Paula Oliveira Rodrigues²

* Marcelo Mendes Pedroza³

Claudia da Silva Aguiar Rezende³

Elaine da Cunha Silva Paz³

Recibido el 7 de diciembre de 2024. Aceptado el 23 de agosto de 2025

Abstract

The scarcity of water resources is an issue that is becoming increasingly worrying over time, reflecting the significant reduction in the volumes of water stored in reservoirs in various regions. The reuse of gray water is widely adopted in several countries as a sustainable alternative to reduce the demand for drinking water. However, the lack of adequate water quality standards or guidelines hinders the appropriate reuse of graywater. This research aims to simulate a graywater reuse project, derived from domestic processes such as dishwashing, laundry and bathing - excluding toilet waste. This research was carried out at the Laboratory for Innovation in Waste Utilization and Energy Sustainability (LARSEN) at the Federal Institute of Tocantins (IFTO) - Palmas Campus. The treatment used in this research was structured in two stages: (1) Coagulation, Flocculation and Decantation and (2) Filtration of the effluent from the coagulation system in a sand filter, followed by adsorption on activated carbon. To this end, coagulation tests were carried out with aluminium plichloride at a concentration of 1% in order to optimize the removal of turbidity from the liquid, and factorial planning was carried out using the Fractional Factorial Design (FFD) to verify turbidity removal. The factors studied were pH of the grey water, coagulant dosage, slow mixing time and sedimentation time. The characterization of the raw and treated greywater was carried out, showing the efficiency of removal of parameters such as COD (from 259.1 to 26 mg/L), Volatile Solids (from 487 to 20.3 mg/L), Suspended Solids (from 120 to not detected), Turbidity (from 126 to 0.1 uT) and E. coli (from 9.2 to not detected). With the results obtained, and based on the 1997 NBR 13969 standard, the treated effluent can be used for washing cars, floors and sidewalks, flushing toilets, as well as irrigating gardens, orchards, cereals and pastures.

Keywords: reuse, greywaters, chemical treatment, residual waters, environment.

¹ Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), São Paulo, Brasil.

² Universidade Federal do Tocantins (UFT), Tocantins, Brasil.

³ Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética, Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins, Palmas – Tocantins, Brasil.

*Autor correspondal: Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) no Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Palmas – Tocantins, Brasil. 310 Sul, Av. LO 5, s/n - Plano Diretor Sul, Palmas – TO. CEP: 77021-090. Email: mendes@ifto.edu.br

Resumo

A escassez de recursos hídricos é uma questão que se torna cada vez mais preocupante com o passar do tempo, refletindo na redução significativa dos volumes de água armazenados em reservatórios de diversas regiões. O reaproveitamento de águas cinzas é amplamente adotado em diversos países como uma alternativa sustentável para diminuir a demanda por água potável. No entanto, a falta de padrões ou diretrizes de qualidade da água adequados dificulta a reutilização apropriada de águas cinzas. A presente pesquisa tem como objetivo simular um projeto de reúso de águas cinza, derivadas a partir de processos domésticos, como lavagem de louça, lavanderia e banho – excluindo resíduos de banheiros. Essa pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO) – Campus Palmas. O tratamento utilizado nesta pesquisa foi estruturado em duas etapas: (1) Coagulação, Floculação e Decantação e (2) Filtração do efluente proveniente do sistema de coagulação em filtro de areia, seguida de adsorção em carvão ativado. Para isso, foram realizados ensaios de coagulação com plicloreto de alumínio a uma concentração de 1% visando otimizar a remoção de turbidez do líquido, sendo feito o planejamento fatorial usando o Delineamento Fatorial Fracionado (DFF) para verificar a remoção de turbidez. Os fatores estudados foram: pH das águas cinzas, dosagem do coagulante, tempo de mistura lenta e tempo de sedimentação. Realizou-se a caracterização das águas cinzas na amostra bruta e tratada, onde percebeu-se a eficiência de remoção de parâmetros como DQO (de 259.1 para 26 mg/L), Sólidos Voláteis (de 487 para 20.3 mg/L), Sólidos Suspensos (de 120 para não detectado), Turbidez (de 126 para 0.1 uT) e E. coli (de 9.2 para não detectado). Com os resultados obtidos, e com base na norma NBR 13969 de 1997, o efluente tratado pode ser utilizado para lavagem de carros, pisos e calçadas, descarga de vasos sanitários, além de irrigação de jardins, pomares, cereais e pastagem.

Palavras-chave: reúso, águas cinzas, tratamento químico, águas residuais, meio ambiente.

Introdução

O aumento da população tem gerado uma demanda crescente por água em quantidade e qualidade. Entretanto, muitos mananciais estão cada vez mais poluídos e degradados, seja pela ausência de controle, seja pela falta de investimentos em infraestrutura para coleta, tratamento e destinação adequada de esgotos, bem como no manejo correto de resíduos sólidos (Mancuso *et al.*, 2003).

Diante desse cenário, tornam-se indispensáveis ações voltadas para a redução do desperdício e das perdas de água potável. Entre essas iniciativas, destacam-se a mudança nos hábitos de consumo, a conscientização da população sobre a adoção de novas atitudes e comportamentos, além da implementação de práticas e tecnologias inovadoras para o reúso da água.

O reúso permite, além de preservar a água potável para suprir as necessidades da população urbana e os usos industriais de maior relevância, promovendo uma melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis e ampliando a oferta de um recurso que se torna cada vez mais escasso (Semura *et al.*, 2005). O reaproveitamento consiste no processo de reutilização da água, tratada ou não, para o mesmo propósito ou para usos menos exigentes, como a lavagem de vias públicas e áreas industriais, irrigação de jardins e pomares, além do uso em descargas de sanitários, entre

outros (Minowa *et al.*, 2007). A segregação e reutilização de águas cinzas são algumas das abordagens para lidar com a sustentabilidade e gestão integral da água em diferentes partes do mundo onde a população enfrenta escassez aguda de água (Al-Jayyousi, 2003).

O termo "águas cinzas" refere-se à água utilizada em atividades domésticas que não apresenta contaminação por esgoto sanitário ou material fecal (Telles *et al.*, 2010). As águas cinzas são geradas a partir de processos domésticos, como lavagem de louça, lavanderia e banho – excluindo resíduos de banheiros (Eriksson *et al.* 2002).

Segundo Pangarkar *et al.* (2010), a reutilização de águas cinzas em uma residência representa a economia de até 50-80% do consumo total de água. Além disso, estima-se que aproximadamente 10% de toda a água consumida no meio urbano seja destinada à lavagem de roupas, destacando a relevância do estudo desse tipo de efluente. No caso específico das lavanderias industriais, embora o setor apresente um alto consumo de água, poucos estudos têm investigado a viabilidade de reciclagem. Pesquisas sobre o tratamento, reciclagem ou reúso desses efluentes têm sido realizadas, principalmente em países onde o custo da água, tanto para consumo quanto para descarte no meio ambiente, é mais elevado (Buss *et al.*, 2015).

Os efluentes de lavanderias contêm tanto as impurezas removidas das roupas quanto as substâncias utilizadas no processo de lavagem, como sabão, detergentes, produtos químicos, fragmentos de argila e pequenas partículas de fibras de tecido (Queiroga *et al.*, 2020).

O tratamento de águas cinzas segue um processo semelhante ao realizado nas estações de tratamento de esgoto. Ele tem como principais objetivos a remoção de sólidos presentes, como areia, óleos, graxas e sólidos sedimentáveis; a eliminação da matéria orgânica presente em sólidos particulados e dissolvidos; além da remoção de patógenos, nutrientes e fósforo. (Telles *et al.*, 2010).

O primeiro passo antes de considerar as possíveis aplicações de águas cinzas é caracterizar as propriedades físicas, químicas e microbianas das águas cinzas (Kimwaga, 2014).

A escolha da tecnologia mais adequada para o tratamento de águas cinzas se baseia na qualidade a ser alcançada. Reutilização de águas residuais domésticas para uso potável requer um maior grau de tratamento, incluindo o tratamento terciário. Mas a qualidade da água para vários usos não potáveis como, irrigação da paisagem, agricultura, descarga de banheiro e recarga de água subterrânea podem ser alcançados mais facilmente usando o tratamento convencional e técnicas econômicas como coagulação, filtração e biológica em sistemas de tratamento (Ajit, 2016).

Segundo Alexandre *et al.* (2013), as etapas de tratamento podem abranger diferentes etapas, a saber: (a) tratamento físico-químico (tratamentos preliminar e primário, com remoção de sólidos

em suspensão sedimentáveis, materiais flutuantes e uma parcela da matéria orgânica), (b) tratamento biológico (etapa constituída por processos bioquímicos, através de microrganismos, que podem ser aeróbicos ou anaeróbicos) e (c) tratamento terciário (remoção principalmente de nutrientes, organismos patogênicos, matéria orgânica remanescente, compostos não-biodegradáveis e os sólidos inorgânicos dissolvidos).

Atualmente, é viável reduzir os níveis de poluentes a patamares aceitáveis, tornando a água adequada para usos específicos por meio de operações e processos de tratamento. De forma geral, o reúso da água pode ser realizado de maneira direta ou indireta, por meio de ações planejadas ou não planejadas, e pode atender tanto a finalidades potáveis quanto não potáveis (Moruzzi, 2008).

Como a água usada para descarga do vaso sanitário, jardinagem e limpeza de pisos não requerem padrões de qualidade da água potável, até 46% da água doméstica pode ser economizada reutilizar águas cinzas para tais atividades (Boyjoo *et al.*, 2013).

No Brasil, destacam-se algumas ações. A lei nº 9433 de 8 de janeiro de 1997 estabelece, entre os objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos, a necessidade de garantir para as gerações atuais e futuras a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas aos seus respectivos usos (Fernandes, 2004).

A norma NBR 13969 de 1997 classifica as águas de reúso com base em seus principais usos e define critérios de qualidade específicos para cada finalidade pretendida. De acordo com esse documento, as águas de reúso são classificadas em quatro categorias: (a) Classe 1, destinada a usos que envolvem contato direto do usuário com a água, como lavagem de veículos; (b) Classe 2, para atividades como lavagem de pisos e calçadas, irrigação de jardins e manutenção de lagos e canais com finalidade paisagística; (c) Classe 3, utilizada em descargas de vasos sanitários; e (d) Classe 4, empregada em pomares, cultivos de cereais, forragens, pastagens para gado e irrigação realizada por escoamento superficial ou sistemas pontuais. A Resolução nº 54 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH – Estabelece as modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. A Resolução CNRH nº 121/2010 define as diretrizes e critérios específicos para o reúso direto não potável de água nas áreas agrícola e florestal.

Esse estudo tem como objetivo avaliar as alternativas de reúso de águas cinzas provenientes de lavanderia de roupas comercial após tratamento químico coagulação-floculação/decantação/filtração e adsorção em carvão ativado comercial, observando as legislações brasileiras relacionadas a esta prática.

Metodología

Local da pesquisa e obtenção da amostra

Esta pesquisa foi conduzida no Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética (LARSEN), vinculado ao Instituto Federal do Tocantins (IFTO) – Campus Palmas. As amostras de águas cinzas foram coletadas em uma lavanderia comercial, utilizando um recipiente com capacidade de 50 litros, no qual foram armazenados os efluentes provenientes de todas as etapas do processo de lavagem. A Figura 1 apresenta as principais atividades experimentais desenvolvidas neste estudo.

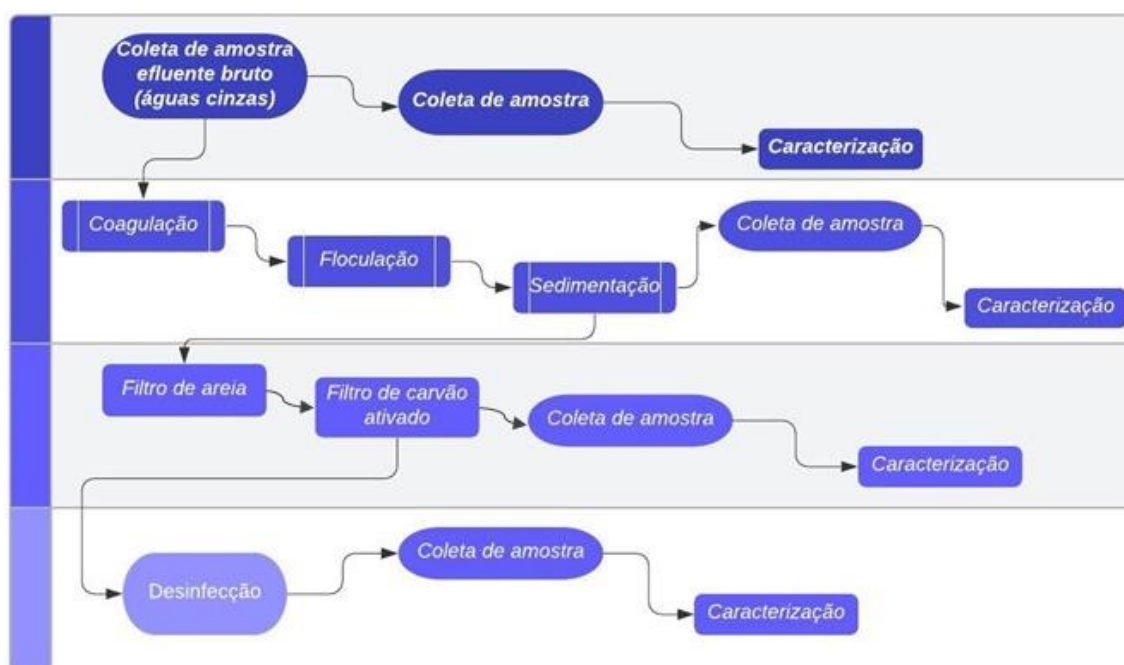


Figura 1. Desenho esquemático das atividades desenvolvidas durante a pesquisa

Realização do tratamento de águas cinzas através do processo Coagulação / Decantação / Filtração / Adsorção

Nesta etapa da pesquisa, foram conduzidos dois ensaios: (1) coagulação seguida de floculação e decantação, e (2) filtração do efluente em filtro de areia, seguida de adsorção com carvão ativado.

Os ensaios de coagulação/floculação/decantação foram realizados utilizando o aparelho *Jar Test*, marca Ethiktechnology, modelo 218-3LDB. Antes de iniciar os testes, foi feita a correção do pH das águas cinzas com solução de ácido clorídrico (1:9) para otimizar a ação do coagulante.

O coagulante utilizado nos ensaios foi o policloreto de alumínio a 1%. Em cada cuba do *Jar Test*, foram adicionados 2 litros de amostra.

Foi avaliado, por meio de planejamento multivariável, o efeito de quatro fatores nos ensaios de coagulação, floculação e sedimentação, visando otimizar a remoção de turbidez. Para isso, foi utilizado um Delineamento Fatorial Fracionado 2^{4-1} , com 8 experimentos e sem repetições (Tabela 1). Os fatores analisados foram: pH das águas cinzas (fator 1), dosagem do coagulante (fator 2), tempo de mistura lenta (fator 3) e tempo de sedimentação (fator 4).

Tabela 1. Ordem dos experimentos empregados no planejamento

Experimentos	Fatores			
	pH (-)	Dosagem do Coagulante (mg/L)	Tempo de mistura lenta (min)	Tempo de sedimentação (min)
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1

Os intervalos dos parâmetros (valores mínimos e máximos para os fatores) estão conforme estabelecidos por Pedroza (2020) e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Fatores e níveis empregados no planejamento experimental

Fatores	Níveis empregados	
	(-1)	(+1)
pH (-)	6	8
Dosagem do coagulante (mg/L)	150	350
Tempo de mistura lenta (min)	10	20
Tempo de sedimentação (min)	10	30

As velocidades de mistura rápida e lenta utilizadas nos testes foram de 160 e 30 RPM, respectivamente. O tempo de mistura rápida foi de 3 minutos. Após o período de sedimentação, amostras foram coletadas de cada cuba do *Jar Test* para a realização dos ensaios de pH, turbidez e sólidos.

Após a etapa de coagulação/sedimentação, o efluente foi direcionado para um filtro de areia e, em seguida, para uma coluna de adsorção com carvão ativado, ambos operados em série e em regime contínuo. Os filtros foram construídos com um tubo cilíndrico de plástico PVC, com as seguintes dimensões: altura total de 40 cm, altura do carvão na coluna de 11 cm e diâmetro de 2.0 cm, conforme as recomendações de Pedroza (2020). O sistema foi operado com uma vazão de 10 mL/min, conforme ilustrado na Figura 2.

Visando o reúso de forma segura do efluente produzido no processo aqui apresentado, foi adotada uma etapa de cloração do líquido empregando hipoclorito comercial a 2.5%, sendo adotada uma dosagem de 1.5 mg/L de cloro ativo.

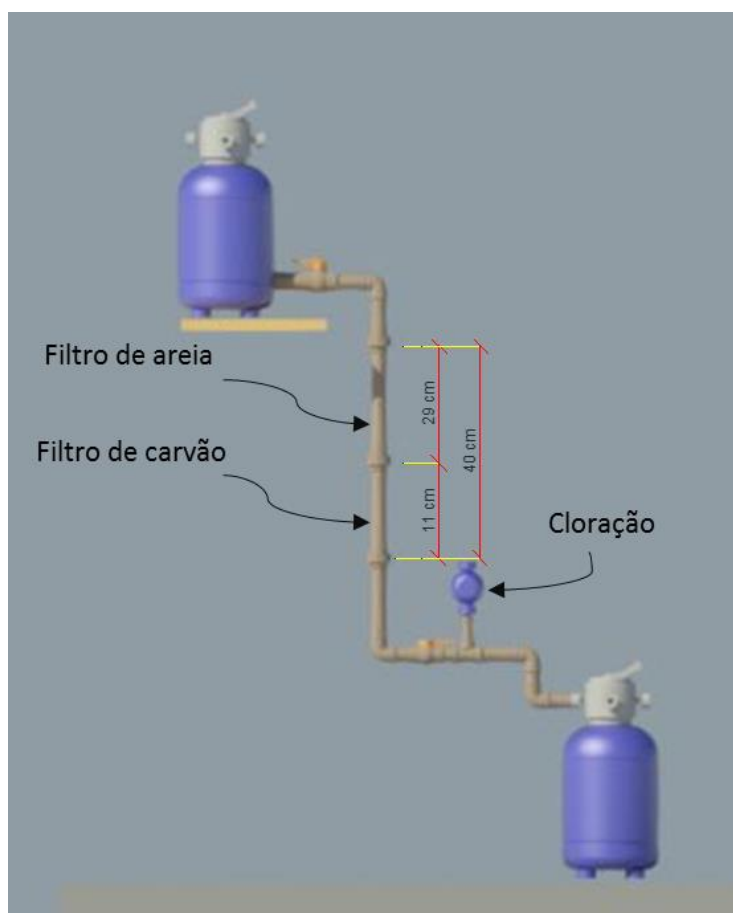


Figura 2. Desenho esquemático das atividades desenvolvidas durante a pesquisa. Fonte: Autores (2020)

Caraterização da amostra de águas cinzas e do efluente tratado

Foi realizado o monitoramento da qualidade do efluente tratado no sistema em estudo. Para atingir os objetivos deste trabalho experimental, foram coletadas amostras em três pontos distintos: P1 – reservatório de águas cinzas, P2 – efluente decantado do processo de coagulação/floculação e P3 – efluente final após o filtro de areia e a coluna de adsorção com carvão ativado. As metodologias utilizadas nos ensaios seguiram as recomendações da APHA (2005), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Metodologias aplicados na determinação das características de águas cinzas e efluente

Parâmetro analítico	Metodologia
Temperatura	Termômetro de mercúrio
pH	Eletrométrico
DBO ₅	Frascos Padrões
DQO	Frascos Padrões
Condutividade	Eletrométrico
Sólidos Totais	Gravimétrico
Sólidos Fixos	Gravimétrico
Sólidos Voláteis	Gravimétrico
Sólidos Sedimentáveis	Cone Imhoff
Sólidos Suspensos	Gravimétrico
Alcalinidade	Volumétrico
Turbidez	Nefelométrico
Cloro residual	Espectrofotométrico
Cloretos	Mohr
E. coli	Colilert

Resultados

A Tabela 4 apresenta os dados experimentais do planejamento multivariável empregado nessa pesquisa.

Com a execução desses experimentos, foram fornecidas respostas referentes aos fatores pré-estabelecidos. Foi mostrado que as combinações de fatores com menores dosagens do coagulante, e tempo de sedimentação maiores, tiveram uma maior redução na turbidez, enquanto as combinações de maior dosagem e menor tempo de sedimentação não tiveram redução satisfatória.

O tempo de mistura lenta tem pouca influência direta na redução da turbidez, o qual forneceu a informação de que esse tempo pode ser reduzido diminuindo o consumo de energia na operação do sistema.

Com base nos resultados alcançados da turbidez em função dos fatores, foram realizadas análises destes dados obtendo as características do efluente após os procedimentos e o Gráfico de Pareto, conforme a Figura 3, utilizando um nível de significância de 0.05.

Tabela 4. Valores de turbidez resultantes nos experimentos

Experimentos	Fatores				Turbidez (uT)
	pH (-)	Dosagem do Coagulante (mg/L)	Tempo de mistura lenta (min)	Tempo de sedimentação (min)	
1	-1	-1	-1	-1	18.0
2	+1	-1	-1	+1	9.0
3	-1	+1	-1	+1	15.4
4	+1	+1	-1	-1	31.0
5	-1	-1	+1	+1	6.2
6	+1	-1	+1	-1	15.3
7	-1	+1	+1	-1	25.0
8	+1	+1	+1	+1	13.0

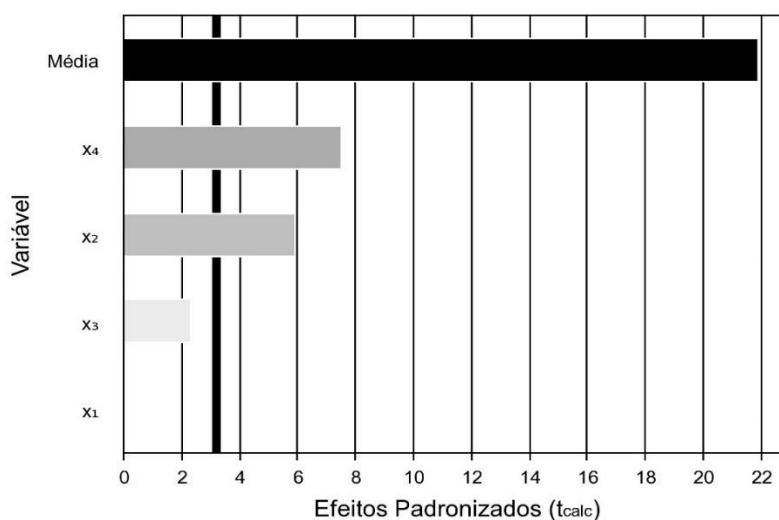


Figura 3. Efeitos da Variável

Os efeitos padronizados com maior nível de influência entre as variáveis, conforme ilustrado no gráfico de Pareto (Figura 3), foram x_2 - dosagem de coagulante e x_4 - tempo de sedimentação entre as variáveis. Já as demais variáveis não alcançaram valores que interferissem significativamente na turbidez.

A Tabela 5 apresenta os resultados calculados da média da turbidez e dos fatores com base no efeito, erro padrão, teste t de *student* e probabilidade.

Tabela 5. Resultado das características de águas cinzas e efluente

Nome	Efeito	Erro Padrão	t Calculado	p-valor
Média	16.61	0.76	21.86	0.0002
pH (-)	0.93	1.52	0.61	0.5858
Dosagem do coagulante (mg/L)	8.98	1.52	5.90	0.0097
Tempo de mistura lenta (min)	-3.48	1.52	-2.29	0.1063
Tempo de sedimentação (min)	-11.42	1.52	-7.52	0.0049

Foram observados na Tabela 5 que os fatores com maiores efeitos na variável principal consistem na dosagem do coagulante (5.90) e tempo de sedimentação (-11.42). Os sinais informam o sentido do efeito que a variável secundária tem com a principal – turbidez. Ou seja, sinal positivo do fator 2 indica que quanto maior a dosagem do coagulante maior é a turbidez do efluente. Já o sinal negativo, sentido oposto – quanto maior o tempo de sedimentação menor é a turbidez.

A caracterização das águas cinzas, na amostra bruta e após os processos de coagulação/floculação/sedimentação e filtração no tratamento do efluente, procedeu com os seguintes resultados, conforme Tabela 6.

Todos os parâmetros analisados tiveram redução significativa já na primeira fase do tratamento (coagulação/floculação/sedimentação). O parâmetro da alcalinidade teve uma redução de 56.83% na primeira fase do tratamento, já na fase de filtração houve remoção de apenas 58.06% em relação a amostra bruta.

Após todos os procedimentos da pesquisa, foram calculados a eficiência de remoção dos parâmetros analisados das águas cinzas, conforme a Figura 4.

Dentre os parâmetros pode-se destacar turbidez, DQO, DBO₅, sólidos voláteis, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos e *Escherichia coli* com resultados acima de 85% de remoção. A condutividade elétrica teve redução baixa, em torno de 18%.

Tabela 6. Resultados dos Parâmetros nos Pontos 1; 2 e 3.

PARÂMETRO ANALÍTICO	RESULTADOS		
	P1	P2	P3
Temperatura (°C)	26.0	25.5	25.9
pH (-)	7.3	6.2	6.3
DBO ₅ (mg/L)	69	22	10
DQO (mg/L)	259.1	145	26
Condutividade(uS/cm)	176	183	145
Sólidos Totais (mg/L)	1210	812	429
Sólidos Fixos (mg/L)	723	660	408.7
Sólidos Voláteis (mg/L)	487	152	20.3
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	0.2	ND	ND
Sólidos Suspensos (mg/L)	120	11	ND
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	227	98	95.2
Turbidez (uT)	126	17	0.1
Cloretos (mg/L)	124	136	115
Cloro residual (mg/L)	0.45	0.4	1.5 *
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	9.2	1	ND

* Após o processo de adsorção foi realizada a cloração do efluente como forma de reduzir a população de organismos patogênicos do líquido.

ND = Não Detectado.

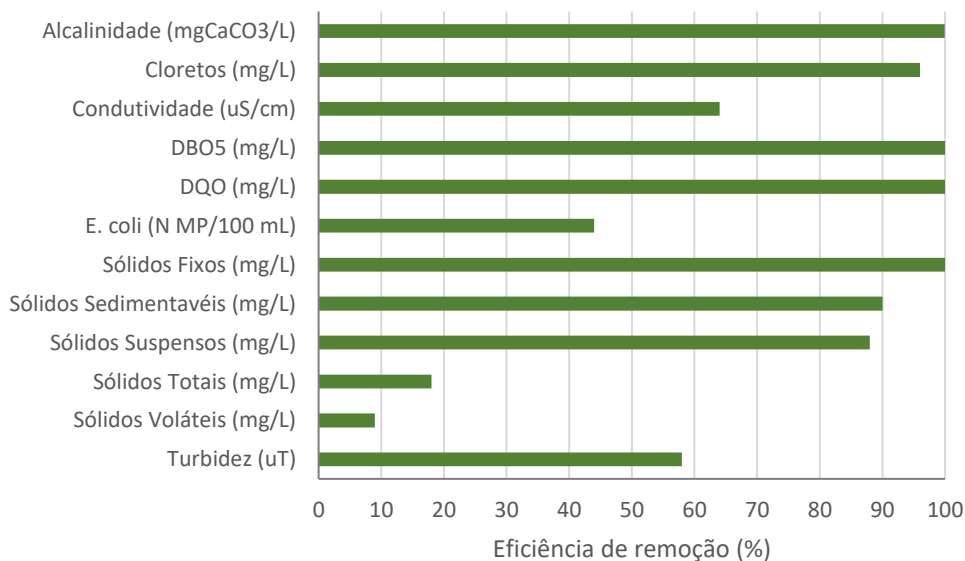


Figura 4. Eficiência de remoção no tratamento de águas cinzas.

Alternativas de reúso de águas cinzas

Essa etapa da pesquisa mostra as alternativas de reúso de águas cinzas após tratamento constituído das etapas de coagulação/sedimentação/filtração/adsorção/cloração adotadas. Foram observados os critérios de reúso, conforme Quadro 1, segundo as legislações dos seguintes países Austrália, Brasil, Canadá, Estados Unidos, Índia, Reino Unido e, também, da Organização Mundial de Saúde.

Para Nolde (2000), os 4 critérios importantes que devem ser atendidos para a reutilização de águas cinzas são segurança, higiene, estética e tolerância ambiental. O tipo de tratamento de águas cinzas a ser considerado depende da reutilização e seus requisitos específicos. Apenas poucas diretrizes foram estabelecidas para a reciclagem e reutilização de águas cinzas e eles se concentram principalmente em saúde e impactos ao meio ambiente (Li *et al.*, 2009).

Segundo Boyjoo (2013), as diretrizes de reutilização de águas cinzas devem incluir pelo menos parâmetros como pH, demanda bioquímica de oxigênio em 5 dias (DBO₅), sólidos totais suspensos (STS), turbidez, coliformes fecais e coliformes totais. Outros parâmetros como N, NH₄⁻, P, Cl₂ residual, sólidos totais dissolvidos (STD) e o conteúdo de detergente também podem ser considerados. Cada país deve atender adequadamente diretrizes nacionais para reutilização de águas cinzas.

No que diz respeito à reciclagem e reutilização de águas cinzas, o Brasil ainda não possui uma normatização técnica específica para sistemas de reúso de água. De maneira geral, são utilizados padrões internacionais ou diretrizes técnicas elaboradas por instituições privadas. Esse fator tem dificultado a implementação dessa prática no país, uma vez que a ausência de legislação e normatização específicas torna o trabalho dos profissionais mais desafiador (Giacchini, 2011). A norma NBR 13969 de 1997 cita as classes de água para reúso e os critérios para sua qualidade conforme a Quadro 1.

Na Índia, o Conselho Central de Controle da Poluição (CPCB) é responsável por estabelecer diretrizes e restrições para a reutilização de águas cinzas em descargas no solo e para resfriamento industrial (Vuppaladadiyam, 2018). Quando comparadas as características das águas cinzas tratadas, obtidas nessa pesquisa, com os valores estabelecidos pela legislação indiana, observa-se que os valores dos parâmetros pH e cloretos não se encontram em conformidade com tal documento, o que compromete o reúso do líquido para essas finalidades informadas. No entanto, segundo a normativa da Austrália, este tipo de efluente citado nessa pesquisa pode ser destinado a irrigação do subsolo, superficial, subterrânea, por aspersão e por gotejamento.

Em se tratando de reúso industrial, conforme critérios requeridos pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos, o efluente tratado dessa pesquisa atende os níveis propostos. Embora o valor do cloro residual se encontra superior a normativa norte americana, esse parâmetro revelou mais alto devido a adição do cloro para desinfecção do efluente, porém esse valor pode ser reduzido a 1 mg/L.

Uma outra alternativa de reutilização de águas cinzas tratadas é a lavagem de carros, pisos, ruas e calçadas. As referências propostas pela norma brasileira são atendidas pelo efluente tratado.

Quanto ao reúso predial destaca-se a reutilização de águas cinzas para descarga em vasos sanitário e para máquina de lavar roupa, conforme as diretrizes da Agência Ambiental do Canadá e Reino Unido respectivamente.

Quadro 1. Normas, guias e regulamentos de águas cinzas tratadas em diferentes países e suas aplicações

País	Instituição/ Legislação	Características das águas tratadas	Destinação da água tratada
Índia	Conselho Central de Controle da Poluição (CPCB, 2021)	pH (7.3 – 8.1); EC (489 – 550 uS cm); Turbidez (20.6 – 38.7 uT); SST (12 – 17.6 mg/L); NT (0.5 – 0.63 mg/L); Fosfato (1.52 – 3.36 mg/L); DBO ₅ (56 – 100 mg/L); DQO (244 – 284 mg/L); Cl ⁻ (7.4 – 12.9 mg/L).	Aplicação na agricultura e resfriamento industrial.
Austrália	<i>Code of Practice for the Reuse of Greywater in Western Australia</i> (Doh, 2010)	Águas cinzas tratadas e desinfetada: SST: 30 mg/L; Cter: 30 UFC/100 mL; DBO ₅ : 20 mg/L. Águas cinzas tratadas e desinfetada: SST: 30 mg/L; Cter: 10 UFC/100 mL; DBO ₅ : 20 mg/L. Águas cinzas com tratamento secundário: SST: 30 mg/L; DBO ₅ : 20mg/L e possível desinfecção.	Irrigação do subsolo; Irrigação superficial; Irrigação subterrânea. Irrigação superficial; Irrigação do subsolo; Irrigação subterrânea; Descarga em vasos ou mictórios; Uso na lavanderia. Irrigação por aspersão de superfície, irrigação por gotejamento de substratos, irrigação por gotejamento em valas de subsolo ou subsolo.

País	Instituição/ Legislação	Características das águas tratadas	Destinação da água tratada
Brasil	Norma Brasileira - NBR 13969/97	<p>Águas cinzas tratadas e desinfetada: pH 6 – 8; Turbidez < 5 uT; CTer < 200 NML/100mL; SDT < 200; Cl₂: 0.5 a 1.5 mg/L.</p> <p>Águas cinzas tratadas e desinfetada: Turbidez < 5 uT; CTer < 500 NMP/100mL; Cl₂ > 0.5 mg/L.</p> <p>Águas cinzas tratada e desinfetada: Turbidez < 10 uT; CTer < 500 NML/100mL.</p> <p>Águas cinzas sem tratamento: CTer < 5000 NML/100mL; OD > 2 mg/L.</p>	<p>Lavagem de carros, chafarizes.</p> <p>Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins.</p> <p>Descarga em vaso sanitário.</p> <p>Irrigação de pomares, cereais, forragens e pastagem para gado. As aplicações devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita.</p>
Estados Unidos – Agência de Proteção Ambiental	The Guidelines for water Reuse de (EPA, 2012; Kloss, 2008)	<p>Tratamento Secundário - Filtração – Desinfecção Cl₂: < 1 mg/L; pH: 6 – 9; DBO₅: 10 mg/L; Turbidez: ≤ 2 uT; Cter: Ausente em 100mL.</p> <p>Tratamento Secundário – Desinfecção Cl₂: < 1; pH: 6 – 9; DBO₅ ≤ 30 mg/L; SST: ≤ 30 uT; Cter: ≤ 200 NMP/100 mL.</p> <p>Tratamento Secundário - Filtração – Desinfecção Cl₂: < 1 mg/L; pH: 6 – 9; DBO₅: 10 mg/L; Turbidez: ≤ 2 uT; Cter: Ausente em 100mL.</p> <p>Tratamento Secundário – Desinfecção Cl₂: < 1 mg/L; pH: 6 – 9; DBO₅: 30 mg/L; Turbidez: ≤ 30 uT; Cter: ≤ 200 NMP/100 mL.</p>	<p>Reúso urbano - não restrito.</p> <p>Reúso urbano – restrito.</p> <p>Reúso agrícola - alimentos cultivados.</p> <p>Reúso agrícola - alimentos processados.</p>

País	Instituição/ Legislação	Características das águas tratadas	Destinação da água tratada
Estados Unidos – Agência de Proteção Ambiental	The Guidelines for water Reuse de (EPA, 2012; Kloss, 2008)	Tratamento Secundário - Desinfecção - Coagulação química e filtração química pode ser requerido Cl ₂ : < 1 mg/L; pH: 6 – 9; DBO ₅ : 30 mg/L; SST: ≤ 30 mg/L; Cter: ≤ 200 NMP/100 mL.	Reúso industrial.
		Tratamento Secundário – Desinfecção Cl ₂ : < 1 mg/L; DBO ₅ : 30 mg/L; SST: ≤ 30 mg/L; Cter: ≤ 200 NMP/100 mL.	Reúso ambiental.
Brasil	Fundação Nacional de Saúde - FUNASA (Brasil, 2007)	Ovos de Helmintos <1; <i>Escherichia coli</i> <100.000;	Irrigação restrita.
		Ovos de Helmintos <1; <i>Escherichia coli</i> <1.000.	Irrigação irrestrita das culturas (sendo <10.000 para cultivo de folhas ou irrigação por gotejamento).
Canadá - Departamento de Saúde Nova Gales do Sul	Guidelines for Household Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing (Beveridge, 2007)	DBO ₅ : 20 mg/L; SST: 20 mg/L; CF: <200 NMP/100 mL; Cl ₂ : <2 mg/L; Turbidez: <5 uT.	Descarga em vaso sanitário.
Reino Unido – Agência Ambiental	Greywater for Domestic Users: An Information Guide (Environment Agency, 2011)	pH: 5 – 9; Turbidez: <10; CF: <10 NMP/100mL; Cl ₂ : <2 mg/L.	Aplicação por pulverização: lavagem sob pressão, uso de aspersores de jardim e lavagem de carro.
		pH: 5 – 9; Turbidez: <10; CF: <1000 NMP/100mL; Cl ₂ : <2 mg/L.	Aplicação sem spray: Descarga em vaso sanitário.
		pH: 5 – 9; Turbidez: <10; CF: <1000 NMP/100mL; Cl ₂ : <0.5 mg/L.	Aplicação sem spray: Rega de jardim.
		pH: 5 – 9; Turbidez: <10; CF: <10 NMP/100mL; Cl ₂ : <2 mg/L.	Aplicação sem spray: Uso em máquina de lavar.

SST: Sólidos suspensos totais; DBO₅: Demanda bioquímica de oxigênio em 5 dias; NT: Nitrogênio total; DQO: Demanda química de oxigênio; Cl₂: Cloreto; EC: Condutividade elétrica; Cter: Coliformes termotolerantes; Cl₂: Cloro residual; OD: Oxigênio dissolvido; NT: Nitrogênio total; CF: Coliformes totais.

Conclusão

As águas cinzas provenientes de lavanderias podem ser reutilizadas, mas precisam passar por tratamento antes do reúso, pois suas características em estado bruto não atendem às exigências das legislações ambientais.

As águas cinzas de lavanderia, quando tratadas por coagulação/floculação/sedimentação, apresentaram valores que as classificam como adequadas para o reúso agrícola em alimentos processados, de acordo com a legislação dos Estados Unidos.

As águas cinzas quando submetidas ao tratamento químico de coagulação/floculação/sedimentação e posterior filtragem em filtro de areia e desinfecção apresentaram índices que as enquadram nos critérios estabelecidos pela Austrália, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido e na norma NBR 13969/97 do Brasil. Com base nisso esse efluente pode ser reutilizado para vários fins como, irrigação, descarga em vaso sanitário, lavagem de roupas, carros, ruas, pisos e calçadas, além de reúso industrial.

Referências bibliográficas

- Alexandre, E. C. F., Lemke de Castro, M. L., Pesquero, M. A. (2013) Caracterização e tratamento de águas cinza com fins não potáveis. *Revista de Biotecnologia & Ciência*, **2**, 106-116. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/biociencia/article/view/1614>
- Al-Jayyousi, O. R. (2003) Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, **156**, 181-192. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0)
- APHA (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st Edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC.
- Minister of Health (2010) *Canadian Guidelines for Household Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing*. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://www.canada.ca/content/dam/canada/health-canada/migration/healthy-canadians/publications/healthy-living-vie-saine/water-reclaimed-recycle-eau/alt/reclaimed-water-eaux-recyclees-eng.pdf>
- Boyjoo, Y., Pareek, V. K., Ang, M. (2013) A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water Science and Technology*, **67**, 1403-1424. <https://doi.org/10.2166/WST.2013.675>
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) *NBR 13969: Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro.
- Brasil (1997) *Base Legislação da Presidência da República - Lei no 9.433 de 08 de janeiro de 1997*. Casa Civil. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=9433&ano=1997&ato=a12ATVU90MjpWTbaf>
- Brasil (2007) *Aplicação Controlada de Água Residuária e Lodo de Esgoto no Solo, para Melhorar e Incrementar a Agricultura do Semi-Árido Nordeste*. Brasília: Funasa. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/635>
- Brasil, CNRH. (2010) *Resolução n. 121, de 16 de dezembro de 2010*. Diário Oficial da União, 2. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%20121.pdf>

- Brasil. Ministério do Meio Ambiente (2006) *Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 54*. Brasília, DF. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2054.pdf>
- Buss, M. V., Ribeiro, E. F., Schneider, I. A. H., Menezes, J. C. S. S. (2015) Tratamento dos efluentes de uma lavanderia industrial: avaliação da capacidade de diferentes processos de tratamento. *Revista de Engenharia Civil IMED*, **2**, 2-10. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/REC-IMED.V2N1P2-10>
- CNRH (2010) *Resolução n. 121*, de 16 de dezembro de 2010. Diário Oficial da União, 2. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%20121.pdf>
- CPCB, Central Pollution Control Board (2021) *Pollution Control Acts, Rules & Notifications Issued Thereunder*. Ministry of Environment, Forest and Climate Change, Government of India. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://cpcb.nic.in/7thEditionPollutionControlLawSeries2021.pdf>
- DOH, Department of Health (2010) *Grey water: Code of practice for the reuse of grey water in Western Australia*. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <http://www.public.health.wa.gov.au/3/667/2/greywater.pm>
- Environment Agency (2011) *Greywater for domestic users: an information guide*. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/ENVIRONMENT%20AGENCY%202011%20Greywater%20for%20Domestic%20Users.pdf
- EPA, U. S. E. P. A. (2012) *Guidelines for water reuse*. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://www.epa.gov/waterreuse/guidelines-water-reuse>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M. et Ledin, A. (2002) Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, **4**, 85-104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Fernandes, V. M. C. (2006) Padrões para reúso de águas residuárias em ambientes urbanos. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <https://enperspectiva.uy/wp-content/uploads/2023/02/Reuso-agua-cinzas-Prof.-Cartana.pdf>
- Giacchini, M. (2011) *Uso e Reúso da Água*. Série de Cadernos Técnicos, CREA-PR, 28. Acesso em 30 de novembro de 2025, disponível em: <http://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/uso-e-reuso-da-agua.pdf>
- Iniyar, M., Thayalnayaki, D., Santhosh, J. (2024) A Review on Grey Water Treatment. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, **11**, 2665-2668. <https://www.jetir.org/papers/JETIR2405F38.pdf>
- Kimwaga, R. J. (2014) Characterization of greywater and its implication for reuse: A case study of peri-urban and unplanned areas. *International Journal of Ecology*, **28**, 79-86. https://www.researchgate.net/publication/283251918_Characterization_of_greywater_and_its_implication_for_reuse_A_case_study_of_peri-urban_and_unplanned_areas
- Kloss, C. (2008) *Managing Wet Weather with Green Infrastructure*, U.S. Editora Environmental Protection Agency. 14 p.
- Li, F., Wichmann, K., Otterpohl, R. (2009) Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of The Total Environment*, **407**, 3439-3449. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2009.02.004>
- Lima, L. R. de, Sampaio, Y. de S. B., Souza, I. G. de M., Silva, J. A. G. da, Sousa, R. A. M. de, Santos, J. S. dos, Cordeiro, S. de L. et Silva, M. M. D. (2020) Custos Ambientais E a Externalidade Negativa Das Lavanderias Têxteis Do Polo De Confecções Do Agreste De Pernambuco / Environmental Costs and External a Negative of Laundry Textiles of Manufacture of Polo Agreste of Pernambuco. *Brazilian Journal of Development*, **6**, 89894-89913. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n11-415>
- Mancuso, P. C. S., Santos, H. F. dos. (2003) *Reúso de água*. Editora Manole Ltda. 579p. https://books.google.com/books/about/Reúso_de_água.html?hl=pt-BR&id=ATxDFRuxInUC

- Moruzzi, R. B. (2008) Reúso De Água No Contexto Da Gestão De Recursos Hídricos: Impacto, Tecnologias E Desafios. *OLAM - Ciência & Tecnologia*, **8**, 271-294.
<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/olam/article/view/2094>
- Moura, P. G., Aranha, F. N., Handam, N. B., Martin, L. E., Salles, M. J., Carvajal, E., Jardim, R. et Sotero-Martins, A. (2020) Water reuse: A sustainable alternative for Brazil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **25**, 791-808.
<https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020180201>
- Nolde, E. (2000) Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings – over ten years experience in Berlin. *Urban Water*, **1**, 275-284. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00023-6)
- Pangarkar, B. L., Parjane, S. B. et Sane, M. G. (2010) Design and economical performance of gray water treatment plant in rural region. World Academy of Science, *Engineering and Technology*, **37**, 896-900.
https://www.researchgate.net/profile/Bhausaheb-Pangarkar/publication/242542967_Design_and_Economical_Performance_of_Gray_Water_Treatment_Plant_in_Rural_Region/links/5877607708ae8fce492fb83a/Design-and-Economical-Performance-of-Gray-Water-Treatment-Plant-in-Rural-Region.pdf
- Pedroza, M. M., Junior, C. A. F., Rodrigues, C. R., Arruda, M. G., Paz, E. C. S. et Lôbo, R. N. (2020) Tratamento de águas cinzas pelo processo coagulação / decantação / filtração / adsorção. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, **12**, 139-148. <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/14878/209209213417>
- Semura, K. A., Riccitelli, M., Gonçalves, M. C. (2005) *Estudo para Implantação de Reúso e Proposição de Parâmetros de Qualidade para Usos Urbanos Não Potáveis a Partir das ETE's da RMSP*. In 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais. Campo Grande.
- Telles, D., Costa, R., Nuvolari, A., Teixeira, E., Ribeiro, F., Nascimento, J., Basso, L. (2010) Reúso da água: conceitos, teorias e práticas. Edgard Blucher. 29 pp.

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

EVALUACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EL GAVILÁN Y SU IMPACTO SOBRE LA PERCEPCIÓN DE OLORES DE LOS HABITANTES DE MANTA, PROVINCIA DE MANABÍ, ECUADOR

* Hugo Miguel Cobeña Navarrete ¹
Carlos Ricardo Delgado Villafuerte ¹
Johnny Manuel Navarrete Álava ¹
Francisco Javier Velásquez Intriago ¹
Nancy T. Hernández de Guerrero ²
Randí J. Guerrero-Ríos ³

EVALUATION OF THE EL GAVILÁN WASTEWATER TREATMENT PLANT AND ITS IMPACT ON THE ODOR PERCEPTION OF THE RESIDENTS OF MANTA, MANABÍ PROVINCE, ECUADOR

Recibido el 15 de enero de 2025. Aceptado el 26 de agosto de 2025

Abstract

The main objective of wastewater treatment plants (WWTP) is to contribute to the quality of life of the inhabitants by preserving the resource and the landscape. However, when these are poorly managed, they become urban stressors and affect the health of citizens. For this reason, it is desired to evaluate the impact of the El Gavilán WWTP on the adjacent population. To assess the impact, unstructured interviews and surveys were conducted with different sectors of society, in order to know the impact caused by the El Gavilán WWTP and their area of influence. It was determined that the El Gavilán WWTP is causing a negative impact on society, the main one being bad odors with a level 4 intensity and a generalized radius with a of more than 1 kilometer. Uncontrolled growth and the incorporation of industries into the drainage system, coupled with sewage system collapse due to garbage dumping, have caused complications in the management of the wastewater treatment plant, resulting in unpleasant odors and, consequently, a deterioration in the quality of life and health of residents. It is recommended that odor mitigation measures be incorporated.

Keywords: bad odors, quality life, unplanned growth

¹ Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador.

² Laboratorio de Ecología, Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela.

³ Laboratorio de Zoología de invertebrados, Facultad de Experimental de Ciencias, Universidad del Zulia (LUZ), Maracaibo, Venezuela.

*Autor correspondiente: Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López (ESPAM MFL). 10 de agosto #82 y Granda Centeno. Campus Calceta, Cantón Bolívar, Manabí. Ecuador. Email: hugoc28@espam.edu.ec

Resumo

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) tienen como principal objetivo contribuir a la calidad de vida de los habitantes al preservar el recurso y el paisaje. Sin embargo, cuando la gestión de estas es deficiente, se convierten en estresores urbanos y afecta la salud de los ciudadanos. Por esta razón, se desea evaluar el impacto de la PTAR El Gavilán en la población adyacente. Para evaluar el impacto se realizaron entrevistas no estructuradas y encuestas a distintos sectores de la sociedad, con la finalidad de conocer el impacto causado por la PTAR El Gavilán y el área de influencia de los mismos. Se determinó que la PTAR El Gavilán está causando un impacto negativo sobre la sociedad, siendo el principal de ellos malos olores con un nivel 4 de intensidad y un radio generalizado con más 1 kilómetro. El crecimiento descontrolado y la incorporación de industrias al sistema de drenaje, aunado al colapso del alcantarillado por el vertido de basura ha causado complicaciones en la gestión de la PTAR lo que ha ocasionado malos olores, y por ende, el deterioro de la calidad de vida de los habitantes, y por ende, de la salud. Se recomienda incorporar medidas de mitigaciones para los malos olores.

Palabras clave: malos olores, calidad de vida, crecimiento no planificado.

Introducción

En América Latina y el Caribe solo se tratan el 20% de las aguas residuales municipales, mientras que, en Europa se trata el 71% de las aguas residuales municipales e industriales (UNESCO, 2017). La gestión de las áreas urbanas y la formación de ciudades más sostenibles, es uno de los retos más importantes para la región (Pelorosso 2020). En América Latina, el tratamiento de las aguas residuales es por medio de lagunas de estabilización, debido al bajo costo de inversión implicado. Sin embargo, las investigaciones refieren que en la mayoría de los países abandonan las PTAR debido a los altos costos operativos (Hernández-Padilla *et al.*, 2017), que aunado al aumento poblacional, supone un riesgo para mantener en buen estado los recursos hídricos de la región.

La Provincia de Manabí es la segunda provincia más grande de la costa ecuatoriana luego del Guayas y se espera un crecimiento del 8.5% para el 2030 (INEC, 2023). Este aumento poblacional es debido al crecimiento económico por las actividades industriales y portuarias, siendo la principal ciudad en producción atunera de Ecuador (Gobierno Autónomo Descentralizado de Manta, 2021). Esta tasa poblacional se ve incrementada temporalmente por el turismo. En enero del 2022, Manta poseía la cuarta parte de los establecimientos turísticos de Manabí, siendo uno de los centros turísticos más importantes del país gracias a sus 14 playas (MINTUR, 2022).

En el pasado se han realizado diagnósticos en los cuerpos de agua, en lo que se ha determinado que existe contaminación de los recursos hídricos por vertimiento de aguas residuales, siendo necesario el control de la calidad para un manejo sustentable del agua (SENPLADES, 2017). Por esta razón, las autoridades de Manabí han priorizado el cumplimiento de los ODS con el fin de abordar

desafíos críticos, buscando un desarrollo sostenible e inclusivo (Prefectura de Manabí, 2023). En Manta aún falta un 17% de cobertura de servicios de agua potable y alcantarillado, resaltando que actualmente el territorio se encuentra ocupado en un 25 % aproximadamente (Gobierno Autónomo Descentralizado de Manta, 2021).

En Manta cuentan con una planta de tratamientos de aguas residuales (PTAR) llamada El Gavilán. La misma entró en funcionamiento en 1973 con una capacidad de carga inicial para 40.000 habitantes. En 1990 se adicionan dos lagunas facultativas aumentando la capacidad de carga para tratar 30.798 m³/día de agua residual domésticas, provenientes de 160.000 habitantes. En los años 2016 y 2017 se incluye una etapa de pretratamiento que consiste en filtración de sólidos en suspensión, contención de grasa, captación de odorantes y dosificación automática de microorganismo, sin embargo, la captación de olores no fue terminada (EPAM, 2020).

El acelerado crecimiento poblacional, la obra inconclusa de la PTAR El Gavilán y las construcciones de industrias han ocasionado deficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Por esta razón, se plantea evaluar el impacto ambiental que ocasiona sobre las comunidades vecinas, con la finalidad de generar la información científica necesaria que sirva como base para la elaboración de planes de acción, así como las condiciones de operatividad de la planta El Gavilán, con respecto a las normativas ecuatorianas actuales.

Metodología

Ubicación geográfica.

En la parte occidental de la provincia de Manabí, se encuentra la ciudad de Manta. La ciudad está ubicada en una altiplanicie, entre cerros y lomas. En Manta se encuentra uno de los puertos internacionales más importantes de Latinoamérica, por lo que la actividad comercial y los desechos que esto implica es alta, con respecto a otras localidades. Para el tratamiento de estos desechos, la ciudad de Manta cuenta con una PTAR piloto llamada El Gavilán. Esta planta se ubica geográficamente al sur-occidente de la ciudad, en el valle del río Manta, sector San Juan de Manta.

Metodología del estudio

Una de las principales fuentes de malos olores en las zonas urbanas son las PTAR siendo la detección esencial para evaluar el impacto sobre las poblaciones (Giuliani *et al.*, 2015). La evaluación de estos odorantes se realizó por medio de la percepción de los olores empleando el olfato humano. La ventaja de esta técnica radica en que recoge información sobre el nivel de desagrado que pueden tener determinados olores en las comunidades afectadas (Giraldo y Lozada, 2019), así como identificar las zonas afectadas (Sáenz *et al.*, 2016). En este sentido, se utilizó la escala de intensidad de olores de Giraldo y Lozada (2019): 1 Olor no detectable, 2 Débil

(es necesario inhalar frente al viento), 3 Moderado (fácilmente detectable y posiblemente desagradable), 4 Fuerte (olor desagradable pero soportable) y 5 muy fuerte (olor muy desagradable y puede causar náuseas).

El levantamiento de los datos se realizó mediante talleres, entrevistas no estructuradas y encuestas con preguntas abiertas. La identificación de los principales temas se utilizó la herramienta prospectiva de la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES). Esta herramienta es una matriz que sistematiza la percepción de los actores (Tabla 1). Para el análisis de la información, se enfatizó en la percepción de los actores claves, como son los vecinos de la PTAR o líderes barriales, administradores de las urbanizaciones; los funcionarios públicos con poder en la implementación de la política pública y técnicos con responsabilidad en la gestión.

Tabla 1. Instrumento percepción de actores. Identificación de problemáticas desafíos y potencialidades

Tipo	Problemática		Desafíos		Potencialidades	
	Identifique y describa los tres (3) problemas.		Identifique y describa los tres (3) desafíos.		Identifique y describa las tres (3) potencialidades.	
Directriz	¿Qué es un problema? Se refiere a los aspectos negativos que se presentan y que dificultan su desarrollo		¿Qué es un desafío? Se refiere a los retos en los cuales se deben centrar los esfuerzos.		¿Qué es una potencialidad? Se refiere a los elementos que pueden ser soporte para alcanzar el desarrollo del territorio.	
Temáticas	Problemática	Descripción	Desafío	Descripción	Potencialidad	Descripción

Una vez obtenida la percepción de la población por medio del instrumento, se procedió a realizar un análisis semántico. Este método facilita la categorización y agrupación de las palabras más usadas por la población muestreada (Hernández, 2015). Para el análisis semántico se empleó la herramienta *online Word Cloud Generator* (Davies, 2023). Esta herramienta permitió obtener una imagen conocida como nube semántica, la cual categoriza las principales palabras recogidas en las encuestas. En dicha nube el tamaño de las palabras indica proporcionalmente la frecuencia de aparición de cada palabra o término usado por la población.

Análisis de resultados

Durante el recorrido en la comunidad se evaluaron aspectos socioeconómicos y demográficos para comprender la organización del sector. Con la información obtenida se realizaron dos categorías de influencia de la planta; áreas de influencia directa (AID) y áreas de influencia indirecta (AII). Las AID y las AII fueron categorizados según: la cercanía a las lagunas de oxidación, las corrientes de viento y el cauce de las aguas tratadas (el río Manta). Conocida el área de

influencia, se categorizó la escala de afectación de los olores según Giraldo y Lozada (2019), la cual consta de 5 niveles: 1 en el sitio o en sus límites solamente, 2 a corta distancia < 25 m de la PTAR, 3 en las cercanías < 250 m, 4 en una amplia localización < 500 m o 5 generalizada, que afecta grandes áreas.

Diagnóstico de la planta de tratamientos de aguas residuales.

El diagnóstico de la PTAR se llevó *in situ* con el fin de comprobar y verificar el grado de cumplimiento de la normativa ambiental. Para obtener la información se desarrollaron entrevistas con los encargados de la operación y mantenimiento de la planta, en la que se consideraron los procesos que se manejan, estado de las instalaciones, equipamientos utilizados y manejo de desechos. Los hallazgos se clasificaron en conformidades y no conformidades según los criterios establecidos en las leyes y normativas ecuatorianas.

Resultados

Se identificaron 15 comunidades afectadas por la PTAR, de las cuáles, 9 comunidades son AID (Tabla 2). Se observó heterogeneidad dentro de los sectores de las AID y AII en aspectos sociodemográficos, económicos, sociales y cobertura de servicios. Esto evidencia una estructura urbana con distintos niveles de segregación. En la zona de estudio se observan barrios pobres como Jacobo Vera, Abdón Calderón, San Carlos y Jesús de Nazareth. Los barrios de clase media baja, como Santa Marta, tienen un déficit del 50% de alcantarillado, viéndose obligados a utilizar quebradas para verter las aguas servidas. Por otro lado, todas las urbanizaciones responden a un segmento social de clase media y media alta con disponibilidad de servicios PTAR.

Tabla 2. Áreas de influencia negativa de la PTAR El Gavilán.

Área de Influencia Directa	Área de Influencia Indirecta
Urb. Terrazas del Conde	Urb. Sariland
Urb. Villaventura	Urb. Loma Dorada
Urb. Ciudad del Sol	Barrio Los Eléctricos
Urb. Manta 2000	Barrio 5 de junio
Barrio San Juan de Manta	Barrio 8 de enero
Barrio Jesús de Nazareth	Barrio 24 de mayo
Barrio Abdón Calderón	
Barrio San Carlos	
Barrio Jacobo Vera	

Durante el estudio se entrevistaron 21 líderes comunitarios de los barrios, 5 administradores de urbanizaciones, 12 funcionarios públicos y 155 habitantes. Durante las entrevistas con los líderes

y administradores se contabilizó un total de 3.466 familias, lo que sumarian 17.415 habitantes solo en las ADI, sin incluir la urbanización de Manta 2000 y los barrios de San Carlos y Jacobo Vera, además de todos los barrios y urbanizaciones de las AII. Es probable que entre 25 mil a 30 mil habitantes están siendo afectados por la PTAR.

De los habitantes encuestados, el 96% coinciden que el principal efecto de la PTAR son los malos olores. Las opiniones recolectadas en las encuestas indican que los malos olores pueden percibirse fácilmente y en ocasiones son desagradables, sin evidencia de daños fisiológicos en los habitantes. En cuanto a la escala espacial, la afectación del área es generalizada (>500 m), con un radio de influencia directa aproximada de 1.341 km, y una afectación indirecta > 3.000 km (Figura 1). Las encuestas señalan que el 32% considera que la PTAR afecta el paisaje al contaminar el Río Manta, mientras que, el 31% percibe que afecta la playa.

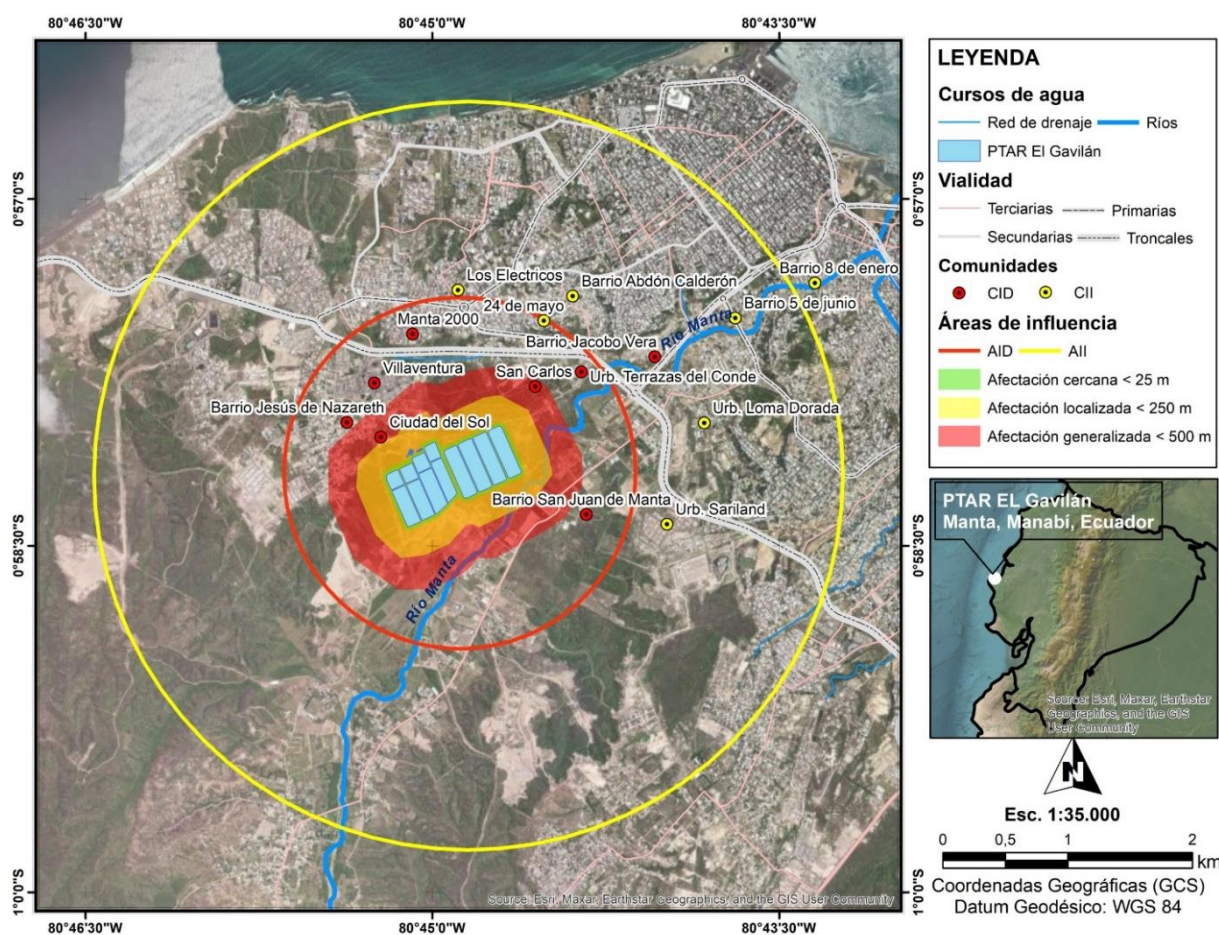


Figura 1. Áreas afectadas por la PTAR de Manta. Se muestra la comunidad impactada directamente (CID), comunidad impactada indirectamente (CII), área impactada directamente (AID) y área impactada indirectamente (AII)

La matriz de diagnóstico identificó diversos aspectos, entre los más relevantes referidos por los entrevistados, fueron la infraestructura de la PTAR. Las principales sugerencias y propuestas sobre la PTAR fueron: continuar con las mejoras del sistema de tratamiento con inversión pública, y reducir la presencia de sulfatos; desazolver el río Manta para evitar estancamiento del agua. El segundo aspecto fue sobre la EPAM, resaltando el crecimiento urbano no planificado, falta de inversión pública y problemas de gobernanza como: falta de autonomía en la gestión ambiental, desorganización institucional, tarifas no acordes al tipo caudal y mala administración de la PTAR por el manejo deficiente de desechos sólidos y líquidos y pobre tecnificación, coincidiendo con investigaciones previas (Velasco *et al.*, 2019).

La nube semántica permitió identificar la opinión de la comunidad. Se aprecia que el principal problema de la comunidad son los malos olores, el tratamiento aguas residuales, alcantarillado y basura. Sin embargo, se reflejan otros términos que puedan denotar preocupación por la salud y el medio ambiente (Figura 2a). Las encuestas dirigidas a los empleados de la PTAR destacan los temas de alcantarillado, tratamiento de las lagunas de oxidación y la responsabilidad ciudadana ante la contaminación con basura, adicionando los términos de pescado y grasa; a igual que el grupo anterior (Figura 2b). En cuanto a las encuestas dirigidas a los funcionarios de la EPAM la constante es alcantarillado y tratamiento, también se hicieron evidentes otros elementos técnicos como: ordenanzas, recursos, manejo, control, proyectos, normativa, procesos, suelo, gestión; es decir, factores que pueden afectar el desempeño óptimo de la PTAR (Figura 2c).



Figura 2. Nube de descriptores semánticos de las encuestas realizadas a los distintos actores involucrados en la problemática de la PTAR El Gavilán. figura 2a. componente social; figura 2b. empleados de PTAR y figura 2c. funcionarios públicos de la EPAM. Word Cloud Generator (Davies, 2023)

El diagnóstico a la planta permitió verificar el cumplimiento de 7 aspectos legales relacionados con el que los empleados tengan equipos de protección al trabajador; realizan monitoreo de las variables, mantienen las instalaciones en buen estado, con señalizaciones y limpias, y por último, realizan sus análisis de calidad en laboratorios acreditados por el SAE. Sin embargo, existen 6 no conformidades de un total de 15 aspectos evaluables que se encuentran dentro de las normativas

y vinculadas directamente con ambiente. Las inconformidades observadas se encuentran en el incumplimiento del Código Orgánico del Ambiente, el Reglamento al código orgánico del ambiente y el Reglamento de prevención, mitigación y protección contra incendios (Tabla 3).

Durante el diagnostico se pudo documentar que el tratamiento para mitigar los olores en la PTAR el Gavilán consiste en inocular las piscinas diariamente con microorganismo biorremediadores que ayuden a degradar los compuestos orgánicos, ya que las lagunas anaeróbicas son las principales emisoras de olores desagradables. El proyecto de la construcción de la PTAR El Gavilán contemplaba el aislamiento de las piscinas con una geomembrana para la captura y quema de los gases emitidos para reducir los malos olores, sin embargo, esta etapa del proyecto no ha sido construida.

Tabla 3. Lista de normativas incumplidas de la PTAR el Gavilán.

Marco Legal	Normativa y descripción	Observación
Código Orgánico del Ambiente	Art. 181. De los Planes de Manejo Ambiental. -. El plan de manejo cronológico debe verificar y solventar problemas ambientales causados por la planta.	El proyecto no dispone de Plan de Manejo Ambiental
	Art. 484, Inciso 3: Los operadores deberán reportar los resultados de los monitoreos de forma anual a la Autoridad Competente.	Los reportes no son constantes
Reglamento al código orgánico del ambiente	Art. 587, Inciso 2: Los residuos y desechos sólidos no peligrosos deberán ser clasificados en orgánicos, reciclables y peligrosos.	No realiza el manejo correcto de los desechos no peligrosos.
	Art. 600, Literal a: Disponer de instalaciones para el almacenamiento de residuos sólidos no peligrosos, con fácil accesibilidad para el traslado	No dispone de bodega para los desechos.
Reglamento de prevención, mitigación y protección contra incendios	Art. 19.- Todo establecimiento de trabajo deben contar con extintores de incendio adecuado a la clase de riesgo.	No dispone de extintores contra incendio en las áreas.
	Art. 51.- La edificación deben contemplar un sistema eléctrico sujeto a lo dispuesto en el artículo 45 de la Ley de Defensa Contra Incendios, el Código Eléctrico Ecuatoriano y por normas INEN	Cables del sistema eléctrico del proyecto se encuentran expuestos.

Discusión

Percepción de malos olores en PTAR

La percepción y la tolerancia de un determinado odorante se encuentra relacionado con las experiencias asociadas a este. Mientras que, la sensibilidad a ciertos odorante puede estar vinculado al tiempo de exposición (Lehtinen y Veijanen, 2010). En este sentido, las PTAR son susceptibles de

emitir malos olores por los procesos vinculados a dicha actividad. Sin embargo, el mal diseño de la planta de tratamiento o un manejo deficiente de las aguas residuales puede agravar la emisión de los olores. Entre los factores que pueden influir en la emisión de malos olores, se encuentran el pH, la temperatura, el tiempo de retención; las condiciones meteorológicas como la humedad y temperatura altas y los cambios atmosféricos (Lehtinen y Veijanen, 2010; Stellacci *et al.*, 2010).

Los principales odorantes emitidos son de origen anaeróbicos como sulfuro de hidrógeno y el amoníaco (Cheng *et al.*, 2005). Las PTAR que reciben descargas industriales con alto contenido de desechos orgánicos emiten olores más intensos por la alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que poseen esta clase de desechos (Giraldo y Lozada, 2019). En este sentido, la formación de sulfuros se da por la degradación de los tejidos orgánicos con alto contenidos de aminoácidos azufrados. Estos residuos degradados en ambientes anóxicos y a pH bajo generan sulfuros los cuales tienen un olor característico a huevos podridos (Calderón y Calderón, 2020). También puede haber presencia de aldehídos, escatol, inodol y ácidos grasos (Lebrero *et al.*, 2011) y en menor cantidad, mercaptanos como: metil tiol, dimetil sulfuro y el dimetil disulfuro (Dincer y Muezzinoglu, 2007).

Las inhalaciones de estos gases suponen efectos negativos sobre el bienestar físico, mental y moral que deben ser estudiados. En este sentido, los malos olores derivados de las PTAR repercuten directamente en la salud humana y calidad de vida (Demircan, 2018). Los olores emanados de la PTAR El Gavilán tienen un impacto sobre salud de nivel 3 según la escala de (Schiffman *et al.*, 2008). La misma se refiere a olores causante de incomodidad y desagrado más no existe una reacción física relacionada con estos. En este sentido la topografía de la zona influye en la dispersión de los olores. Elevaciones que van desde 60 m.s.n.m al noroeste y sureste de la planta, forman una depresión en sentido noreste desde la PTAR El Gavilán con una elevación de 17 m.s.n.m hacia el centro de la ciudad, específicamente hasta barrio 8 de enero con una elevación 8 m.s.n.m (Topographic-map, s.f.), haciendo que el olor tenga una escala generalizada. En este sentido, Sáenz *et al.*, (2016), estimaron un radio de escala generalizada, con una influencia de 800 m, donde el 83% percibió un olor fecal indicativo de compuestos nitrogenados como indol y escatol. Sin embargo, aunque las PTAR siempre emitirán algún tipo de olor es recomendable una distancia mínima de amortiguamiento de 300 m (Giraldo y Lozada, 2019).

En la actualidad se conocen de diversos métodos para mitigar las emisiones de odorantes de las PTAR. En las piscinas de tratamiento anaeróbicos deben cubrirse y reutilizar los gases, evitar turbulencias, acumulación de espumas en la superficie y lodos en las paredes, también se debe remover los lodos sedimentados y transferidos a tanques de aireación y disminuir la DBO por medio de la recirculación (Giraldo y Lozada, 2019). Otros métodos consisten en la disminución de la biomasa bacteriana al aumentar el pH a 8 empleando el óxido de calcio (CaO) con lo se puede reducir hasta un 90% de las emisiones de H_2S . Por otro lado, el vertimiento del agua ya tratada se recomienda la canalización completa hasta el sitio de desembocadura, esto reduciría un 90% los malos olores emitidos (Calderón y Calderón, 2020).

Las barreras vegetales también son un mecanismo eficiente para la disminución de la percepción de malos olores. Esta consiste en hileras estratificadas de arbustos y árboles de follaje denso con el propósito de elevar la corriente de aire y sus odorantes por encima de la copa de los árboles. Esta barrera mitiga los malos olores al minimizar la dispersión de los olores al controlar los vientos, aunado a beneficios adicionales como: cortinas rompevientos, sistemas de absorción de partículas, captan parte del CO₂ emitidos por la planta, regulan las condiciones microclimáticas, mientras que, mejora el paisajismo y delimita las áreas alrededor de la planta de tratamiento, lo que impide la cercanía de la población. Sin embargo, para la aplicación de las barreras vegetales debe tenerse en cuenta que la barrera debe estar ubicada perpendicular a los vientos predominantes, usar especies de rápido crecimiento, frondoso y de buena capacidad de rebrote para evitar huecos en la barrera, así como especies aromáticas nativas (Betancur, 2017; Loaiza, 2020).

Problemática ambiental

Las aguas residuales están compuestas por una mezcla de diversos efluentes de origen domésticos, comerciales, institucionales, industriales; a su vez, escorrentías que drenan por el alcantarillado. La alta carga de nutrientes en forma de materia orgánica, compuestos nitrogenados y su alto contenido de fósforos crean ambientes eutróficos y anóxicos desfavorable para la vida y producción acuática, y proporciona ambientes idóneos para la proliferación de organismos patógenos para el ser humano. En este sentido, Spellman (2009) menciona que el objetivo de una PTAR debe ser el garantizar la salud pública al abastecer y preservar el uso del agua, así como proteger la vida acuática. Es por esto que en el marco de desarrollo sostenible de las ciudades se considera importante el saneamiento de las aguas residuales.

El proceso deficiente de las aguas residuales en los países en desarrollo representa un problema para los ecosistemas acuáticos, mala calidad del aire y problemas de salud pública. La existencia de antibióticos y microorganismos resistentes a estos es un factor que no ha sido evaluado en este estudio, sin embargo, su consideración es necesaria ya que las PTAR son un reservorio de estos. La confluencia de aguas con alta carga bacteriana y concentraciones de antibióticos subinhibitorias producen genes de resistencia que en un ambiente rico en nutrientes favorecen la aparición de cepas microbianas con genes resistentes a antibióticos. Sin embargo, a pesar de la importancia de este tema y los riesgos que supone para la salud pública, son pocas las investigaciones desarrolladas en los países en desarrollo (Oliveira *et al.*, 2020).

El alto contenido de nutriente en las aguas residuales y en los lodos biológicos los convierte en una opción para el desarrollo agrícola, gracias al reciclaje de nutrientes y remediación suelos erosionados con abono orgánico. Sin embargo, es necesario lagunas de estabilización para las aguas residuales y posteriormente tratadas con un sistema de lagunas de maduración en serie para mejorar la calidad del agua (Tauzene *et al.*, 2018), así como el uso de pacas biogestoras para los lodos biológicos (Pulgarín-Muñoz y Wills-Betancur, 2019). Estos sistemas permiten disminuir el riesgo inherente a estas aguas por

su contenido de virus entéricos, bacterias y protozoarios patogénicos (García-Salazar, 2019). Estas son posibles soluciones que pueden ser implementadas para contribuir con un desarrollo sostenible en la región y mitigar los daños ocasionados por las PTAR.

Problemática social y planificación urbana

En América Latina existe ruptura de poder, siendo este asimétrico con una gestión de tipo *Top-down*. Aunado a esto, se ha resaltado que las empresas locales movilizan sus recursos para modificar las estrategias de gobernanzas y predominar sobre las necesidades comunitarias. En este sentido, es necesario legitimar representantes comunitarios y ofrecer la educación necesaria para una adecuada planificación territorial y evitar el detrimento de la calidad de vida de los sectores más vulnerables. De esta forma, la asimetría de poder que existe en las regiones periurbanas de América Latina pudiera equilibrarse y que las estrategias locales llevadas a cabo favorezcan a las comunidades locales (Ubilla-Bravo, 2020).

La heterogeneidad socioeconómica observada en el estudio es un fenómeno común en las poblaciones periféricas de latinoamericanas. Esta heterogeneidad trae problemas de convivencia entre las partes, ya que crea un tejido sociocultural fragmentado, donde habrá ciudadanos con sentido de pertenencia y sensibilidad ambiental, mientras que, también habrá ciudadanos cuyo principal objetivo es el propio a expensa del ambiente (Birche y Jensen, 2019). Esta configuración urbana no contribuye con la integración paisajística, ni mitigación de los problemas comunes, por esta razón, una de las herramientas para lograr la integración de ambos sectores es por medio de la educación ciudadana.

Los factores que impulsaron el crecimiento incontrolado de la Parroquia Manta pudieron ser el crecimiento económico y la industrialización (Bernal *et al.*, 2022). El crecimiento incontrolado conlleva a la administración pública a solventar las consecuencias puntuales y no a planificar un crecimiento urbano más estructurado y sostenible, por lo que deriva en un aumento de los costos de gobernanza (Xie *et al.*, 2020). La ausencia de una adecuada gestión territorial, antes el crecimiento poblacional acelerado, genera la ocupación de territorios pocos apropiados como los próximos a las lagunas de oxidación, convirtiéndose así en una problemática social y ambiental, incrementado el índice de pobreza y afectando la calidad de vida (Jordán y Simioni, 2003; Benavides y Mejía, 2022). Por estas razones, debe ser abordada por medio de cinco dimensiones: social, económica, política, ecológica y física (Rahman, 2016).

La vulnerabilidad de los pobladores ante las agencias inmobiliarias o empresas que no valoran el anclaje social para imponer cambios en el paisajismo (Serenó, 2020) y los malos olores producto de la mala gestión de la PTAR que afecta el ambiente; reducen la calidad de vida, y por ende, afectan la salud, y representan los principales estresores de la comunidad de la Parroquia de Manta (Vinje *et al.*, 2022). Por esta razón, es necesario construir un modelo de gestión de tipo *Bottom-up* que permita la creación de entornos favorables y que generen bienestar social (Eriksson, 2016; Molina y Martínez 2022).

En este sentido, la Carta de Ottawa reconoce la necesidad de generar procesos de empoderamiento social para ejercer control sobre los determinantes de la salud. El modelo salutogénico, es una gestión de tipo *Bottom-up* basado en la equidad ciudadana en la toma de decisiones que afectan la salud en la comunidad (Eriksson y Lindström, 2008; Mittelmarmark *et al.*, 2016). Esto plantea nuevos escenarios para la política pública en América Latina, que tengan como prioridad la calidad de vida y la salud colectiva sobre la economía y acumulación de riquezas. (Torres-Tovar, 2019) y que le permitan superar la dificultad para mantener un equilibrio entre las políticas ambientales y las estrategias de desarrollo económico y sociales (Benavides y Mejía, 2022).

Conclusiones

La PTAR El Gavilán está afectando la calidad de vida y, por ende, la salud de la población de Manta al emitir olores desagradable en la zona. Existe una escala generalizada de afectación mayor a 1 kilómetro de forma directa e indirecta, donde las AID son afectadas con olores en una intensidad de nivel 4 sin evidencia de afectación física, y con consecuencias paisajísticas a más de 3 kilómetros en las AII. Estos problemas fueron ocasionados por el incremento no planificado de la población, la incorporación de desechos industriales con alta materia orgánica al sistema de tratamiento de aguas residuales, la fragmentación del tejido social, así como diversas inconformidades en la gestión de la PTAR. Es necesario la implementación de medidas de mitigación a mediano plazo como barreras vegetales o captura de los gases odorantes que afecta a las comunidades aledañas y a largo plazo adecuar el sistema de tratamiento para recibir aguas de origen industrial, así como implementar medidas para reutilización de los nutrientes que contribuyan a la disminución del impacto ambiental percibidos por la comunidad de Manta.

Referencias bibliográficas

- Tauzene M, Candian L, Sanchez I. (2018) Quantitative microbial risk assessment for crops irrigated with wastewater from the WWTP of Ilha Solteira (SP) *Ingeniería y Desarrollo*, **36**(2), 359–377. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v36n2/2145-9371-inde-36-02-359.pdf>
- Benavides AM, Mejía N. (2022) Factores que obstaculizan la gestión urbana sostenible: estudio de un municipio en Colombia. *Estudios Demográficos y Urbanos*, **37**(1), 157–199. <https://doi.org/10.24201/edu.v37i1.2012>
- Bernal AM, Hernández YT, Beltrán JE. (2022) Reflexiones en torno a los factores que influyen en la expansión urbana: revisión de metodologías e instrumentos de investigación. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, **31**(2), 434–449. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.89742>
- Betancur DM. (2017) *Implementación de sistemas de tratamiento básico, para el manejo y control de olores ofensivos en la planta de tratamiento de aguas residuales, municipio del Retiro—Antioquia*. (Tesis pregrado) Programa de tecnología en saneamiento ambiental, Universidad Nacional Abierta y a distancia UNAD, Medellín, Colombia. 89 pp.
- Birch ME, Jensen K. (2019) La integración paisajística en el crecimiento urbano. Transformaciones en la periferia platense. *Bitácora Urbano Territorial*, **29**(3), 145–154. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n3.70121>

- Calderón DA, Calderón JS. (2020) *Desodorización de planta de tratamiento de agua residual de Barrio Villas del Nuevo Siglo, en la Mesa-Cundinamarca*. (Tesis de Ingeniería) Programa de Ingeniería civil, Universidad Piloto de Colombia, Cundinamarca, Colombia. 74 pp.
- Cheng X, Peterkin E, Burlingame GA. (2005) A study on volatile organic sulfide causes of odors at Philadelphia's Northeast Water Pollution Control Plant. *Water Research*, **39**(16), 3781-3790. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.009>
- Demircan G. (2018) Effects of the odour from wastewater treatment plants on resident's living comfort and property values: Case of Narlıdere-İzmir (Thesis of Master) School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, İzmir, Turkey. 107 pp.
- Davies, J. (2023) How the Word Cloud Generator Works1. Recuperado el 18 de julio de 2023. Desde: <https://www.jasondavies.com/wordcloud>
- Dincer F, Muezzinoglu A. (2007) Odor Determination at Wastewater Collection Systems: Olfactometry versus H₂S Analyses. *CLEAN - Soil, Air, Water*, **35**(6), 565-570. <https://doi.org/10.1002/clen.200700057>
- Empresa pública de aguas manta (EPAM) 2020. Proyecto planta de tratamiento de aguas residuales El Gavilán: línea base socioeconómica. Manabí, Ecuador
- Eriksson M. (2016) The Sense of Coherence in the Salutogenic Model of Health. *The Handbook of Salutogenesis*, 91–96. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04600-6_11
- Eriksson M, Lindström B. (2008) A salutogenic interpretation of the Ottawa Charter. *Health promotion international*, **23**(2), 190-199. <https://doi.org/10.1093/heapro/dan014>
- García-Salazar EM. (2019) El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Estudios Sociales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, **29**(54) <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>
- Giraldo EA, Lozada DL. (2019) Origen de los olores en plantas de tratamiento de aguas residuales. Consultado el 1 de agosto. Desde: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/981>
- Giuliani S, Zarra T, Naddeo V, Belgiorno V. (2015) A novel tool for odor emission assessment in wastewater treatment plant. *Desalination and Water Treatment*, **55**(3), 712–717. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.942383>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de Manta. (2021) Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Manta 2020-2035, Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial con especial énfasis en la gestión del riesgo Manta.
- Hernández C. (2015) Nuevos recursos para la investigación cualitativa: Software gratuito y herramientas colaborativas. *Opción*, **31**(5), 453-471.
- Hernández-Padilla F, Margini M, Noyola A, Guereca-Hernandez L, Bulle C. (2017) Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. *Journal of Cleaner Production*, **142**(4), 2140-2153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.068>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2023) Proyecciones Poblacionales. Consultado el 15 de julio de 2023. Desde: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales>
- Jordán R, Simioni D. (2003) *Gestión urbana para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe (CEPAL)* 252 pp.
- Lebrero R, Bouchy L, Stuetz R, Muñoz R. (2011) Odor Assessment and Management in Wastewater Treatment Plants: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **41**(10), 915-950. <https://doi.org/10.1080/10643380903300000>
- Lehtinen J, Veijanen A. (2010) Odour monitoring by combined TD–GC–MS–Sniff technique and dynamic olfactometry at the wastewater treatment plant of low H₂S concentration. *Water, Air, y Soil Pollution*, **218**: 185-196. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0634-3>
- Loaiza E. (2020) Barreras Vegetativas para la Mitigación de Olores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. *Revista Científica Investigación Andina*, **20**(1) <https://doi.org/10.35306/rev.%20cien.%20univ.v1i1.878>
- Ministerio de Turismo del Ecuador (MINTUR) (2022) Turismo en Cifras - Portal Servicios MINTUR. Turismo.gob.ec. Consultado el 20 de julio. Desde: <https://servicios.turismo.gob.ec/index.php/turismo-cifras/>

- Mittelmark MB, Bull T, Bouwman L. (2016) Emerging Ideas Relevant to the Salutogenic Model of Health. The Handbook of Salutogenesis, 45–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04600-6_6
- Molina JC, Martínez E. (2022) Sentido Comunitario de la Coherencia en asentamientos informales: aprendizajes y reflexiones desde Medellín (Colombia) *Hacia La Promoción de La Salud*, **27**(1), 52–66. <https://doi.org/10.17151/hpsal.2022.27.1.5>
- Oliveira SL, Silveira RM, Rodrigues IC, Lima WG, Rodrigues LG, Paiva MC. (2020) Domestic wastewater treatment plants as sources of macrolide-lincosamide-streptogramin B- and penicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in Brazil. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, **49**(2) <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v49n2.88854>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (2017) *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. 12 pp.
- Pelorusso R. (2020) Modeling and Urban Planning: a Systematic Review of Performance-Based Approaches. *Sustainable Cities and Society* **52**: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101867>
- Pulgarín-Muñoz CE, Wills-Betancu BA. (2019) Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras. *Producción + Limpia*, **14**(1), 33–45. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v14n1/1909-0455-pml-14-01-33.pdf>
- Prefectura de Manabí. (2023) Informe Local Voluntario 2023. Prefectura de Manabí. Recuperado el 10 de julio de 2025 de https://gold.uclg.org/sites/default/files/field-document/manabi_2024_es.pdf
- Rahman AU. (2016) "Sostenibilidad urbana a través de la planificación estratégica: un caso de planificación metropolitana en la ciudad de Khulna, Bangladesh." *Journal of Urban Management* **5**(1), 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2016.06.001>
- Schiffman JD, Schauer CL. (2008) A review: electrospinning of biopolymer nanofibers and their applications. *Polym Rev*, **48**, 317–352. <https://doi.org/10.1080/15583720802022182>
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) (2017) Plan Nacional para el Buen Vivir 2017-2021. Disponible en: <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf> 159 p.
- Sereno CA. (2020) Anclajes territoriales en un espacio de borde: el caso del rururbano de la ciudad de Bahía Blanca (Buenos Aires, Argentina) *Perspectiva Geográfica*, **25**(2), 56–79. <https://doi.org/10.19053/01233769.11032>
- Stellacci P, Liberti L, Notarnicola M, Haas CN. (2010) Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants. *Desalination*, **253**(1-3), 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.034>
- Spellman, F. (2009) Handbook of water and wastewater treatment plant operations. (2da. ed.) United States of the America: Lewis Publishers.
- Topographic-map (s.f.) Mapa topográfico Manta. Recuperado el 10 de julio de 2025 de <https://es-ec.topographic-map.com/map-r1g3q/Manta/?center=-0.9696%2C-80.72715&zoom=14&base=2&popup=-0.98049%2C-80.73802>
- Torres-Tovar CA. (2019) Territorio, sostenibilidad y planeación. *Bitácora Urbano Territorial*, **29**(2), 7–10. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-79132019000200007
- Ubilla-Bravo G. (2020) Relaciones de poder entre los actores del periurbano en torno al Plan Regulador Comunal: analizando la gobernanza territorial. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, **29**(2), 455–472. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n2.75249>
- Velasco G, Moncayo J, Chuquer D. (2019) Diagnóstico del sistema de tratamiento de aguas residuales de manta. *infoANALÍTICA*, **7**(1), 27–39. <https://doi.org/10.26807/ia.v7i1.93>
- Vinje HF, Langeland E, Bull T. (2022) Aaron Antonovsky's Development of Salutogenesis, 1979–1994. The Handbook of Salutogenesis, 29–45. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79515-3_5
- Xie H, Zhang Y, Duan K. (2020) Evolutionary overview of urban expansion based on bibliometric analysis in Web of Science from 1990 to 2019. *Hábitat International*, **95**, 102100. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.102100>

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PROJETO-PILOTO PARA ESTRUTURAÇÃO DA REDE MINEIRA DE LOGÍSTICA REVERSA

Mônica de Abreu Azevedo ¹
* Nina Rosa Fernandes Diniz ²
João Victor Alves Gomes Silva ¹
Diego da Silva Marques ¹

PILOT PROJECT FOR STRUCTURING THE MINAS GERAIS' REVERSE LOGISTICS NETWORK

Recibido el 27 de enero de 2024. Aceptado el 5 de septiembre de 2025

Abstract

Reverse Logistics is defined in the National Solid Waste Policy (Law 12305/2010) as the "return of products after use by the consumer, independently of the public urban cleaning and solid waste management service" which must be carried out by manufacturers, importers, distributors and traders of packaging and pesticide residues; cells and batteries; tires; packaging and waste of lubricating oils; fluorescent, sodium and mercury vapor and mixed light lamps; and electronic products and their components. Minas Gerais is the fourth largest Brazilian state with the largest number of municipalities, characterized by its large size and population dispersion. Of the 853 municipalities in Minas Gerais, 80% are considered small municipalities, with a population of less than 25 thousand inhabitants, which are not regularly served by reverse logistics (IBGE, 2010). The Minas Gerais' Reverse Logistics Network is an initiative proposed for the development of a strategy for implementing reverse logistics in all municipalities, including small ones. A pilot project was developed in 17 municipalities, with the joint action of reverse logistics institutions in itinerant collection campaigns, with the centralization of waste to optimize collection and transportation logistics. This article presents the results of the surveys carried out to characterize the 42 tons of waste collected and the strategies employed for popular mobilization and participation, in order to provide information and consolidate a proposal for the implementation of Reverse Logistics in Minas Gerais, ensuring broad coverage of the state.

Keywords: Reverse Logistics, sustainability, solid waste, hazardous waste, Minas Gerais' network.

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

² Divisão de Gerenciamento de Resíduos, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

* Autor correspondente: Divisão de Gerenciamento de Resíduos, Universidade Federal de Viçosa. Avenida Peter Henry Rolfs, s/n. Campus Universitário, Viçosa, Minas Gerais. 36570-900. Brasil. Email: nina.diniz@ufv.br

Resumo

A Logística Reversa é definida na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12305/2010) como o “retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos” que deve ser realizada pelos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de embalagens e resíduos de agrotóxicos; pilhas e baterias; pneus; embalagens e resíduos de óleos lubrificantes; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; e produtos eletroeletrônicos e seus componentes. Minas Gerais é o quarto maior estado brasileiro e com o maior número de municípios, caracterizado por sua grande extensão e dispersão populacional. Dos 853 municípios, 80% são considerados municípios de pequeno porte, com população menor que 25 mil habitantes, que não são atendidos regularmente pela logística reversa (IBGE, 2010). O Projeto Rede Mineira de Logística Reversa foi uma iniciativa proposta para o desenvolvimento de uma estratégia para implantação da logística reversa em todo o estado, incluindo municípios de pequeno porte. Para tanto, foi desenvolvido um projeto-piloto em 17 municípios, com a atuação conjunta das instituições de logística reversa em campanhas de coleta itinerante, com a centralização dos resíduos para otimização da logística de coleta e transporte. Neste artigo são apresentados os resultados dos levantamentos realizados para a caracterização das 42 toneladas de resíduos coletados e das estratégias empregadas para a mobilização e participação popular, a fim de propiciar informações e consolidar uma proposta para a implantação da Logística Reversa em Minas Gerais, garantindo o amplo atendimento do estado.

Palavras-chave: Logística Reversa, sustentabilidade, resíduos sólidos, resíduos perigosos, rede mineira.

Introdução

A Lei Nº 12305/2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, com a definição de princípios, objetivos e instrumentos para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos e as responsabilidades dos geradores e do Poder Público (Brasil, 2010). Um dos instrumentos apresentados na política é a logística reversa, considerada obrigatória para os seguintes tipos de resíduos: “embalagens e resíduos de agrotóxicos; pilhas e baterias; pneus; embalagens e resíduos de óleos lubrificantes; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; e produtos eletroeletrônicos e seus componentes”. Essa obrigatoriedade é apresentada no Art. 33 da lei, que traz ainda como responsáveis por sua implementação os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes (Brasil, 2010).

A logística reversa é um instrumento importante para a gestão dos resíduos sólidos. Silva & Silva (2024) ressaltam que “apesar dos avanços legais, a implementação eficaz dessas políticas ainda enfrenta desafios significativos”, destacando a falta de infraestrutura adequada, incerteza macroeconômica, fragilidade institucional e deficiência de campanhas educativas fundamentais para aumentar a conscientização pública e incentivar a participação ativa dos cidadãos na devolução segura de resíduos.

O Decreto 10936/2022, que regulamenta a PNRS, apresenta como um dos instrumentos para implementação da logística reversa os atos firmados entre o Poder Público e os atores envolvidos no ciclo de vida dos produtos, chamados de acordos setoriais (Brasil, 2022). Sendo assim, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes têm se reunido, em sua maioria, para compor instituições gestoras que assinam os acordos setoriais com o poder público e executam a gestão da sua logística reversa, como o Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias (InpEV), para logística reversa de embalagens e resíduos de agrotóxicos; a Reciclanip, para os pneus inservíveis; o Instituto Jogue Limpo, para embalagens plásticas de óleo lubrificante usadas e óleo lubrificante usado ou contaminado; a Reciclus, para lâmpadas e a Green Eletron, para pilhas, baterias, eletrônicos e seus componentes.

No Brasil, o Acordo Setorial para implantação do Sistema de Logística Reversa de Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista foi assinado pela Reciclus com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e publicado no Diário Oficial da União (DOU) do dia 12/03/2015. O objetivo é dar destino final às lâmpadas descartadas por pessoas físicas, ou seja, usuários domésticos, nos Pontos de Entrega Voluntária (PEV) em municípios acima de 25 mil habitantes. São apenas 109 cidades mineiras contempladas, cerca de 13% do estado. Os demais municípios seriam atendidos por campanhas com frequência não especificadas no acordo (Brasil, 2015).

O Acordo Setorial para implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes, incluindo pilhas e baterias, foi assinado pela Green Eletron com o MMA do Governo Brasileiro, no dia 31/10/2019, publicado no DOU de 19/11/2019. Nele consta uma lista de municípios alvo para atendimento com Pontos de Entrega Voluntária com municípios com população acima de 80 mil habitantes, correspondendo a 44 cidades mineiras, ou seja, apenas 5% dos municípios do estado.

Apesar dos demais acordos setoriais afirmarem que atuam em todo o território mineiro, o que se percebe na prática é que a população de pequenas cidades mineiras não tem conhecimento ou fácil acesso ao descarte de pneus, embalagens e resíduos de agrotóxicos ou embalagens e resíduos de óleos lubrificantes. Ressalta-se que dos 853 municípios de Minas Gerais, 80% são considerados municípios de pequeno porte, com população menor que 25 mil habitantes (IBGE, 2010) e, portanto, não são contemplados com pontos de entrega voluntária para a logística reversa. Além disso, as campanhas de educação ambiental de cada instituição gestora são isoladas, o que diminui o alcance dessa população e pulveriza o investimento, sendo, ao fim, diversos desses resíduos enviados erroneamente na coleta convencional de resíduos sólidos urbanos, sobrecarregando o município na logística e não tendo a destinação final adequada (Azevedo *et al.*, 2024).

O Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais (COPAM) lançou a Deliberação Normativa 249/2024 com “diretrizes e obrigações mínimas para estruturação, implementação,

operacionalização, aprimoramento, monitoramento e divulgação dos Sistemas de Logística Reversa de produtos e embalagens pós-consumo colocados no mercado mineiro pelos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico, seus componentes e suas embalagens; pilhas e baterias portáteis; baterias chumbo-ácido automotivas, industriais e de motocicletas; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio, de vapor de mercúrio e de luz mista; embalagens de óleos lubrificantes; embalagens em geral de plástico, papel, papelão, metais e vidro; medicamentos domiciliares de uso humano, vencidos ou em desuso, e suas embalagens; e pneus inservíveis” (COPAM, 2024).

Nesta deliberação normativa ficou estabelecida a atuação da logística reversa de lâmpadas em 100% dos municípios acima de 20 mil habitantes até 2026; para pneus inservíveis a atuação deve ser em 100% dos municípios com população acima de 50 mil habitantes a partir de 2025 e a realização de duas campanhas itinerantes a cada semestre em cada Unidade Regional de Gestão de Resíduos (URGR); para eletroeletrônicos e seus componentes, a atuação em 100% dos municípios com mais de 80 mil habitantes, a partir de 2025, e a realização de, pelo menos, uma campanha itinerante a cada semestre em cada URGR (COPAM, 2024).

A grande extensão territorial com vários pequenos municípios dispersos é um desafio para a execução da logística reversa no estado de Minas Gerais. Nesse contexto, propõe-se a união dos municípios em redes para que sejam atendidos por coleta itinerante de todos os resíduos de logística reversa de uma só vez, com a centralização em um único ponto para otimizar a coleta e a destinação de maiores quantidades de resíduos. Esta proposta visa potencializar as ações de educação ambiental e mobilização popular e aumentar a quantidade de resíduos coletados pela estrutura de logística reversa, viabilizando e criando sustentabilidade econômica e financeira para as operações, uma vez que a estrutura da logística reversa deve ocorrer de forma independente dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos de acordo com a legislação vigente (Brasil, 2010).

A Rede Mineira de Logística Reversa (RMLR) é um projeto de pesquisa em extensão universitária que objetiva criar e testar uma modelagem para proporcionar o atendimento de todos os 853 municípios mineiros com a logística reversa de todas as 6 tipologias de resíduos perigosos elencadas como obrigatórias na PNRS.

Metodologia

A metodologia desenvolvida para a estruturação da Rede Mineira de Logística Reversa e execução do projeto-piloto é apresentada no fluxograma da Figura 1.

REDE MINEIRA DE LOGÍSTICA REVERSA

FLUXOGRAMA

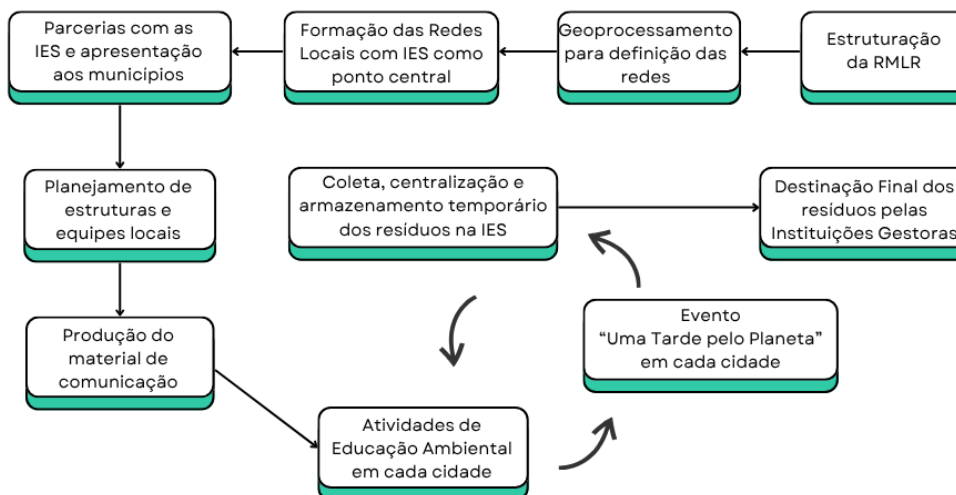


Figura 1. Fluxograma sobre a estruturação da Rede Mineira de Logística Reversa

Fase 1 - Estruturação da Rede Mineira de Logística Reversa (RMLR)

A RMLR foi estruturada por meio de técnicas de geoprocessamento para identificar os municípios com a presença de uma Instituição de Ensino Superior (IES) no estado de Minas Gerais, seja municipal, estadual ou federal, e os municípios mais próximos para compor uma rede com a IES como ponto central. A elaboração e avaliação da RMLR envolveu a participação de professores e técnicos das seguintes universidades: Universidade Federal de Viçosa (UFV), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Universidade Federal de São João del-Rey (UFSJ), Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Cefet-BH).

Após o mapeamento das redes de cada IES, focou-se na realização de uma única rede para iniciar a validação do modelo. A rede escolhida foi composta pelas cidades no entorno do campus Viçosa da UFV. O projeto-piloto Rede UFV - campus Viçosa foi aprovado no edital nº 11/2022 de Apoio a Projetos de Extensão em Interface com a Pesquisa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), contemplando 17 municípios e a UFV, tendo sido executado durante o ano de 2023. Na Tabela 1 são apresentados alguns dados e informações sobre os municípios envolvidos no projeto e a UFV.

Tabela 1. Dados demográficos e Socioeconômicos dos municípios contemplados no Projeto-Piloto Rede UFV – Campus Viçosa e da Universidade Federal de Viçosa

Município	População (2022)	IDHM (2010)	Escolaridade (6+ anos) %	Saneamento Básico Adequado (%)	Renda Média (R\$)
Amparo do Serra	4521	641	78.50%	45.20%	1050
Cajuri	4093	617	82.10%	52.80%	1210
Canaã	4678	649	83.40%	58.30%	1320
Coimbra	7054	669	85.20%	62.10%	1450
Guaraciaba	10987	623	80.90%	55.70%	1290
Jequeri	12345	601	79.30%	48.90%	1180
Oratórios	4493	637	81.70%	53.60%	1250
Paula Cândido	9876	637	84.60%	60.50%	1410
Pedra do Anta	3765	624	77.80%	47.30%	1090
Porto Firme	11234	634	83.90%	59.80%	1380
Presidente Bernardes	5432	632	78.20%	46.70%	1070
Santo Antônio do Grama	4210	633	80.10%	50.40%	1150
São Geraldo	10456	651	85.00%	61.30%	1430
São Miguel do Anta	6789	644	83.20%	57.90%	1360
Teixeiras	11987	675	86.30%	63.70%	1520
Urucânia	10123	633	82.50%	56.40%	1310
Viçosa	80669	775	91.50%	78.20%	2450

IES	Alunos matriculados	Professores	Técnicos- administrativos	Área física total (ha)	Projetos de pesquisa concluídos*
UFV – campus Viçosa	15332	1283	1587	2372.97	1598

* *Projetos de pesquisa concluídos no ano de 2023 na Universidade Federal de Viçosa – Campus Viçosa. Fontes: População (2022): Dados do Censo Demográfico (IBGE 2022); IDH (2010): Atlas do Desenvolvimento Humano (Atlas Brasil, 2010); Escolaridade: Percentual da população com 6 anos ou mais de estudo (IBGE 2022); Saneamento Básico Adequado: Percentual de domicílios com abastecimento de água, esgotamento sanitário e coleta de lixo adequados (IBGE 2022); Renda Média: Valor aproximado com base na renda domiciliar per capita (IBGE 2022); UFV: UFV em números – Edição 2024 (Base de dados 2023).*

Fase 2 – Ações de Educação Ambiental e Mobilização Popular

A metodologia de atuação nos municípios foi estruturada com ações de educação ambiental, realizadas durante uma semana que precedia a realização do evento de mobilização e participação popular intitulado “Uma Tarde pelo Planeta”, durante o qual era realizada a coleta dos resíduos sujeitos à logística reversa e encerradas as atividades em cada município. Na Figura 2 é apresentado o resumo esquemático da metodologia de ação do projeto.



Figura 2. Metodologia de atuação apresentada para as equipes das prefeituras dos 17 municípios contemplados no projeto-piloto Rede UFV - campus Viçosa

O evento “Uma Tarde pelo Planeta” aconteceu na praça central ou em outro local de eventos cedido pelo município, sendo gratuito para a população. Havia nos eventos um caminhão de transporte de resíduos perigosos para coleta dos resíduos da logística reversa trazidos pela população. Uma caminhonete foi usada para divulgação, coleta *in loco* e coleta dos resíduos dispostos em pontos de acúmulos identificados durante as visitas. Todos os resíduos foram alocados no caminhão e transportados para o abrigo temporário de resíduos da UFV.

Um programa de comunicação foi estruturado para a produção do material utilizado nas campanhas de educação ambiental e no evento final. Foi elaborado um Manual de Identidade Visual do projeto, para garantir padronização em todas as produções gráficas e de mídias sociais. A produção gráfica foi composta por panfletos (14cm x 20cm), folders (20cm x 28cm); cartazes (tamanho A3); banner (0.8m x 2.0m) e uma testeira de palco (6.15m x 1.00m).

Os cartazes foram distribuídos em pontos estratégicos de divulgação, como praças, comércios, postos de saúde e sede da prefeitura. Os panfletos foram entregues para cada estudante de toda rede de ensino. Em alguns municípios, também foram entregues panfletos aos agentes de saúde para distribuição nas moradias visitadas naquela semana da educação ambiental no município. Panfletos também foram deixados nos comércios locais, quando solicitado pelos comerciantes.

Os folders foram distribuídos principalmente nos comércios que realizam a venda dos produtos obrigados à logística reversa, como oficinas, lojas de autopeças, lava-jatos, postos de gasolinas, garagens de veículos da prefeitura ou de empresas, lojas de utilidades gerais, lojas de consertos de eletroeletrônicos em geral, relojoarias, comércios do ramo veterinário e agropecuário, lojas de eletricitas e materiais de construção. Também foram distribuídos folders nas casas legislativas, órgãos da prefeitura, EMATER, sindicatos e para os funcionários responsáveis pela limpeza urbana e triagem dos resíduos.

Para atuação nas redes sociais, foram criadas contas para o projeto no *Instagram* e *Facebook*. Também ocorreram divulgações em grupos de *Whatsapp* com o auxílio da equipe da prefeitura. As redes sociais foram o principal meio de divulgação do evento “Uma Tarde pelo Planeta”, com um cronograma de postagens semanais para cada uma das 17 cidades contempladas.

Fase 3 - Atuação do Projeto nos Municípios

O projeto iniciou com visitas a todos os municípios contemplados para apresentação ao Prefeito e às Secretarias de Educação, Meio Ambiente e Cultura sobre a metodologia de atuação do projeto e as contrapartidas do município, caso aceitassem participar.

Para a etapa de Educação Ambiental, as contrapartidas necessárias foram: disponibilização do levantamento de todas as escolas urbanas e rurais com especificação de quantidade de alunos por turma e professores; apoio para divulgação nos setores do executivo, legislativo e judiciário (todos os setores da prefeitura, da câmara de vereadores e do Fórum); orientação da localização dos comércios locais e possíveis depósitos dos resíduos de logística reversa; suporte para divulgação nas igrejas e com os líderes locais e; designação de um profissional facilitador para acompanhar as visitas de educação ambiental.

Para a etapa do evento, as contrapartidas necessárias foram: a assinatura do alvará de autorização do evento; a cessão do espaço para realização do evento e o ponto de luz (ou facilitação do intermédio com a Cemig); o reforço na segurança (ou facilitação do intermédio com a Polícia Militar); a designação de um profissional facilitador para a divulgação (responsável pela colagem e retirada dos cartazes); a divulgação em massa do evento e cessão de espaço nas estruturas de comunicação: redes sociais, rádio local, carro/moto alto falante e reuniões públicas como missas, cultos, reunião da câmara de vereadores e em auditórios escolares (ou facilitação do intermédio com as organizações citadas); a limpeza do espaço após a realização do evento; o convite de um ou dois artistas locais de relevância cultural para participação no dia do evento; a distribuição de água durante o evento (ou facilitação do intermédio com a instituição responsável pelo abastecimento de água), a presença de profissional da saúde em caso de emergência durante o evento (ou facilitação do intermédio com hospital ou posto de saúde local); e o acesso a banheiros públicos.

A partir das visitas e o aceite dos municípios, foram planejadas as estruturas e equipes de cada município e selecionados os fornecedores para produção da marca Rede Mineira de Logística Reversa, das peças de comunicação online e impressa, para a realização dos eventos, e para coleta e transporte dos resíduos de logística reversa. É importante ressaltar que o projeto não realizou parcerias com associações e cooperativas de catadores de materiais recicláveis por contemplar somente a coleta de resíduos perigosos, o que exigiria treinamento e capacitação dos catadores, além do fornecimento de todos os EPIs necessários para a segurança do trabalho e saúde ocupacional.

Paralelamente foram realizadas reuniões e acordos de participação com a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), as instituições gestoras da logística reversa de resíduos perigosos e a administração da UFV para estruturação do abrigo de armazenamento temporário dos resíduos, estando de acordo com o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010).

Resultados e discussão

Fase 1 – Estrutura Proposta para a Rede Mineira de Logística Reversa

A partir da análise por geoprocessamento, foi obtido o mapeamento dos municípios com IES públicas no estado de Minas Gerais e dos municípios com população inferior a 25 mil habitantes no entorno dessas instituições (Figura 3). Esse mapeamento possibilitou a estruturação de redes locais para coleta de resíduos perigosos tendo como ponto central as IES mapeadas. Os municípios assinalados em vermelho têm potenciais instituições para abrigo e armazenamento temporário dos resíduos, sendo interessante ressaltar a ampla distribuição de IES no território.

Visto que a logística reversa, especialmente de lâmpadas e eletroeletrônicos, é apenas para pessoas físicas (resíduos domiciliares), as IES não são contempladas por serem empresas públicas. Mas como são instituições públicas com recursos cada vez mais escassos, muitas não têm condições de licitar serviços de destinação adequada desses resíduos, sendo muitas vezes acumulados nas próprias instituições sem previsão de destinação adequada.

Portanto, essas redes foram estruturadas para propiciar campanhas de educação ambiental e coleta dos resíduos de logística reversa dos municípios, com seu armazenamento temporário na IES próxima. Em contrapartida pela cessão do espaço, a IES também poderia destinar seus resíduos neste abrigo. Desse modo, em vez de realizarem o recolhimento dos resíduos em cada um dos pequenos municípios, a coleta pelas instituições gestoras ocorreria apenas no abrigo temporário na IES de todo o material acumulado dos municípios que compõem aquela rede.

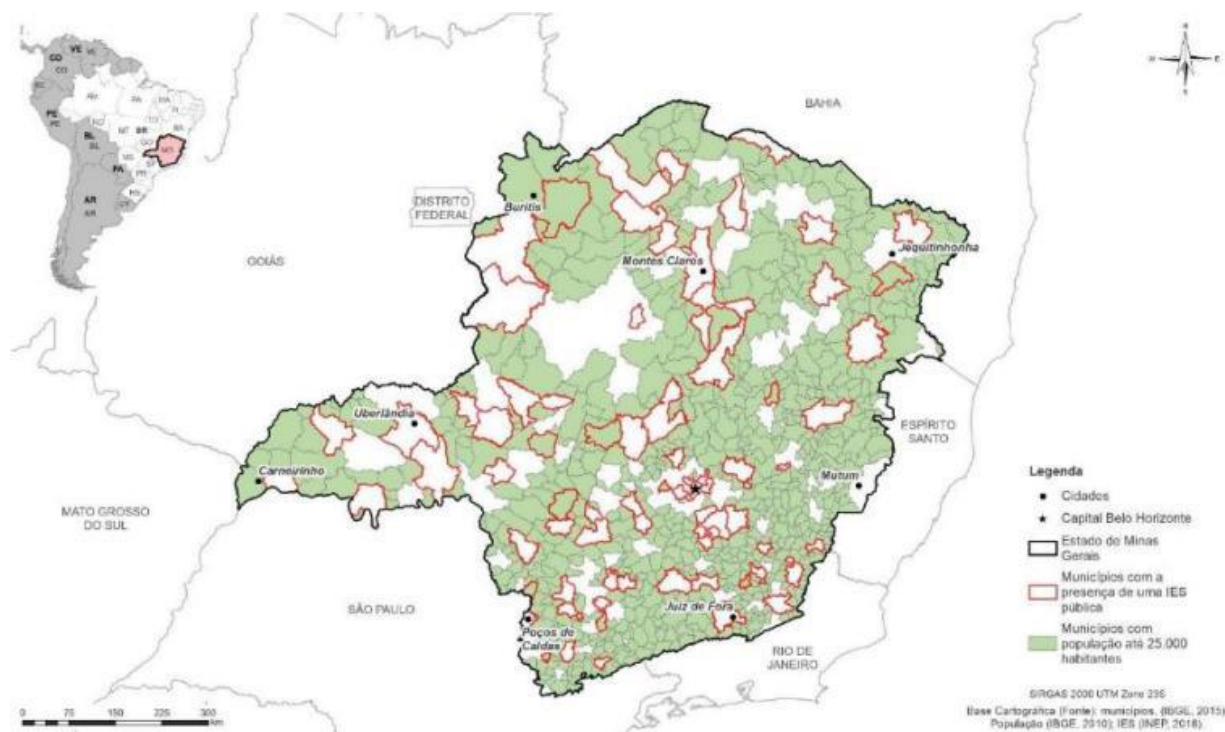


Figura 3. Mapeamento dos municípios com a presença de uma Instituição de Ensino Pública e ilustração dos municípios mineiros de pequeno porte

Visto que a logística reversa, especialmente de lâmpadas e eletroeletrônicos, é apenas para pessoas físicas (resíduos domiciliares), as IES não são contempladas por serem empresas públicas. Mas como são instituições públicas com recursos cada vez mais escassos, muitas não têm condições de licitar serviços de destinação adequada desses resíduos, sendo muitas vezes acumulados nas próprias instituições sem previsão de destinação adequada.

Portanto, essas redes foram estruturadas para propiciar campanhas de educação ambiental e coleta dos resíduos de logística reversa dos municípios, com seu armazenamento temporário na IES próxima. Em contrapartida pela cessão do espaço, a IES também poderia destinar seus resíduos neste abrigo. Desse modo, em vez de realizarem o recolhimento dos resíduos em cada um dos pequenos municípios, a coleta pelas instituições gestoras ocorreria apenas no abrigo temporário na IES de todo o material acumulado dos municípios que compõem aquela rede.

A rede elaborada para o projeto-piloto (Figura 4) foi composta por 17 municípios: Paula Cândido, Presidente Bernardes, Porto Firme, Guaraciaba, Teixeiras, Amparo do Serra, Oratórios, Urucânia,

Figura 4. Projeto-piloto UFV - campus Viçosa.

395

nas Câmaras Legislativas Municipais, nas Unidades Básicas de Saúde e em empresas e entidades públicas de assistência rural, totalizando 888 estabelecimentos (Tabelas 3 e 4).

Ao final das 17 campanhas, foi avaliado o quantitativo recolhido de cada tipo de resíduo de logística reversa em cada um dos municípios em função da população. Esta avaliação foi feita em função do peso e da unidade de cada tipo de resíduo coletado. Também foi levantado o envolvimento da população em relação à logística reversa por meio de questionários estruturados, com perguntas aos participantes sobre o meio pelo qual eles tiveram informação e conhecimento do evento; se eles participaram do evento, destinando seus resíduos à estrutura de logística reversa do projeto e quais os tipos de resíduos gerados e destinado, e qual o destino dado a esses materiais na ausência do projeto. A estrutura de logística e de armazenamento temporário no campus Viçosa da UFV, necessárias para centralização dos diversos resíduos coletados, e o processo de destinação final de cada um deles com a respectiva instituição gestora responsável foi descrito. Os resultados desses levantamentos são apresentados e discutidos a seguir.

Como resultado do programa de comunicação social, foram distribuídos à população dos 17 municípios: 48441 panfletos, 3925 mil folders, 435 cartazes, 1 banner e 1 testeira de palco. O modelo de folder produzido é apresentado na Figura 5.

Tabela 2. Quantitativo de escolas contempladas com a educação ambiental da Rede Mineira de Logística Reversa

Município	Escolas Municipais	Escolas Estaduais	Escolas Particulares	Total	Alunos
Cajuri	4	1	0	5	765
Pedra do Anta	2	1	0	3	529
Coimbra	2	1	0	3	1289
Presidente Bernardes	10	3	0	13	813
Canaã	4	2	0	6	844
Amparo do Serra	3	1	0	4	798
São Geraldo	3	3	0	6	912
Santo Antônio do Grama	2	1	0	3	616
Paula Cândido	3	2	0	5	1328
Guaraciaba	6	4	0	10	1404
Oratórios	3	1	0	4	1035
São Miguel do Anta	4	2	0	6	1119
Urucânia	4	3	0	7	679
Teixeiras	9	2	1	12	2070
Porto Firme	9	3	0	12	1542
Jequeri	7	5	0	12	1863
Viçosa	20	10	13	43	6632
Total	95	45	14	154	24238

Tabela 3. Estabelecimentos contemplados com a educação ambiental - Parte 1

Município	Oficinas / Auto-peças	Borracharias	Postos de combustíveis	Técnicos de eletrônicas	Comércios	Casas agropecuárias e agroveterinárias	Garagens
Cajuri	2	2	2	2	3	3	3
Pedra do Anta	3	0	1	2	3	4	2
Coimbra	8	2	3	5	4	8	1
Presidente Bernardes	9	0	0	3	2	3	1
Canaã	8	2	2	3	5	2	1
Amparo do Serra	3	1	1	3	3	2	2
São Geraldo	15	1	3	9	8	2	2
Santo Antônio do Grama	5	1	1	2	3	2	2
Paula Cândido	18	5	3	7	4	3	1
Guaraciaba	11	1	2	4	3	4	1
Oratórios	6	1	1	2	5	0	1
São Miguel do Anta	8	2	2	3	7	4	1
Urucânia	11	4	1	4	11	4	4
Teixeiras	23	1	4	13	17	2	1
Porto Firme	9	2	3	6	10	3	1
Jequeri	11	3	2	7	8	2	0
Viçosa	82	4	4	49	33	14	1
Totais:	232	32	35	124	129	62	25

Tabela 4. Estabelecimentos contemplados com a educação ambiental - Parte 2

Município	Escolas	Estação de triagem / transbordo	Câmara Municipal	Unidades Básicas de Saúde*	Ferro Velho	Manutenção de máquinas	Lava Jato
Cajuri	5	1	1	1	0	0	0
Pedra do Anta	3	1	1	2	3	0	0
Coimbra	3	1	1	2	0	2	0
Presidente Bernardes	13	1	0	4	0	0	0
Canaã	6	1	0	1	0	1	0
Amparo do Serra	4	1	0	1	0	1	1
São Geraldo	6	1	0	3	2	0	1
Santo Antônio do Grama	3	1	0	3	0	0	0
Paula Cândido	5	1	0	4	0	2	0
Guaraciaba	10	1	1	1	1	0	2
Oratórios	4	1	0	2	2	0	1
São Miguel do Anta	6	1	1	1	1	1	1
Urucânia	7	1	1	2	0	1	1
Teixeiras	12	1	1	4	2	1	0
Porto Firme	12	1	0	3	0	1	0
Jequeri	12	1	0	3	0	1	1
Viçosa	43	0	1	2	1	0	1
Totais:	154	16	8	39	12	11	9

*Postos de Saúde da Família, Hospitais, Secretarias de Saúde, Emater e Sindicatos



Figura 5. Conteúdo interno do folder distribuído na Educação Ambiental

Nas mídias sociais, foram realizadas 84 publicações no *Instagram* e *Facebook* e 38 produções para *Whatsapp*, com a divulgação por meio da rede de contato de pessoas da cidade visitada, normalmente representantes de prefeituras, secretarias e demais habitantes da comunidade local. A conta do *Instagram* (<https://www.instagram.com/redemineiralr>) acumulou 2415 seguidores e a do *Facebook* (<https://www.facebook.com/profile.php?id=100092838056699&mibextid=ZbWKwL>) conta com 35 seguidores. Entre 17 de agosto a 29 de outubro, três últimos meses de eventos, foram alcançadas 24347 contas no *Instagram* com as divulgações, um bom exemplo de engajamento e conscientização ambiental por meio das redes sociais.

De 11 de junho a 29 de outubro de 2023, todos os 17 municípios incluídos no Projeto Piloto UFV - campus Viçosa, foram contemplados com as ações do projeto da RMLR. Em cada município foram realizadas as atividades de educação ambiental (Figura 6) de segunda à sexta-feira por meio de apresentações, palestras e distribuição dos materiais gráficos nas escolas, comércios, estabelecimentos públicos, entre outros, e a divulgação do evento "Uma Tarde pelo Planeta", realizado aos domingos à tarde.



Figura 6. Atividades de Educação Ambiental realizadas pela Rede Mineira de Logística Reversa nas escolas e nos eventos Uma Tarde pelo Planeta

O evento “Uma Tarde pelo Planeta” proporcionou diversão e cultura aliada à conscientização ambiental e, para isso, diversos profissionais estiveram envolvidos. Jogos, gincanas e brincadeiras foram levados pela equipe de recreação para entretenimento das crianças e adolescentes, além de brinquedos como pula-pula, tobogã inflável e piscina de bolinhas durante quatro horas no espaço central de eventos cedido pelo município.

Todos os municípios foram contemplados com a apresentação teatral infantil “O ciclo da logística reversa: uma odisseia de devoluções”, desenvolvida especialmente para o projeto para comunicar de forma lúdica e atrativa a importância da logística reversa em nosso dia a dia e como devemos proceder com os nossos resíduos. A apresentação dos artistas locais ficou a critério das municipalidades, sendo realizados shows de cantores ou grupo musical, apresentação de banda lírica, capoeira, atividades folclóricas (congado) ou até atividades de ginástica para terceira idade.

Os resíduos recolhidos durante o evento “Uma Tarde pelo Planeta” foram transportados e armazenados no Campus Viçosa da UFV. Em contrapartida pela cessão do espaço, a UFV teve seus resíduos de logística reversa recolhidos pelo projeto e, com isto, destinados de forma correta sem custo para a instituição.

Cada uma das instituições gestoras dos resíduos de logística reversa foi responsável pelo transporte e destinação adequada dos resíduos coletados pelo projeto nos 17 municípios. Como os resíduos foram armazenados e acumulados no Campus Viçosa da UFV, a instituição gestora realizou uma rota única de logística, o que otimizou e reduziu os custos operacionais, mas de forma a garantir o atendimento de todos os municípios.

Fase 3 – Resultados da Atuação do Projeto nos Municípios

Resíduos perigosos coletados

Na Tabela 5 é apresentado o quantitativo total de resíduos coletados no projeto piloto por tipologia de resíduo. Foram coletadas 58816 unidades de resíduos perigosos, que corresponderam a um peso total de 42941.53 kg. Em termos de unidades coletadas, as lâmpadas corresponderam ao maior percentual, com 48.33 %, seguido das pilhas e baterias (26.47 %). No entanto, em termos de peso, os pneus representaram 50.94 % do peso coletado, seguido dos eletroeletrônicos, com 32.99 % (Figura 7). Lâmpadas, pilhas e baterias são resíduos pequenos e leves, com tempo de vida curto, o que contribui para uma maior geração. Além disso, a população tem educação ambiental há mais tempo sobre os danos ambientais e na própria saúde que esses resíduos podem causar, sendo mais comum ver o armazenamento deles em casas, escolas e órgãos públicos até que seja encontrado um destino ambientalmente seguro. Os pneus são materiais mais pesados, e com tempo de vida maior, portanto, tendem a ser descartados com uma frequência menor, mas representam grande contribuição em termos de peso. Já no caso dos eletroeletrônicos, estes são constituídos por itens de variados tipos, desde pequenas unidades, como fones de ouvidos, até unidades maiores, como freezers e ar condicionados, com grande quantidade de televisores, computadores e impressoras. Percebeu-se que a comunidade associa os resíduos eletroeletrônicos maiores ao descarte em ferro velho e os menores em lixeiras comuns.

Tabela 5. Resumo do quantitativo de resíduos coletados no Projeto - piloto UFV - campus Viçosa da RMLR

Resíduo	Quantitativo coletado		Percentual coletado	
	Unidades	Peso (kg)	Por unidade	Por peso
Pilhas e baterias	15566	2018.63	26.47	4.70
Lâmpadas	28424	4150.95	48.33	9.67
Filtros, óleos lubrificantes e suas embalagens	1168	730.90	1.99	1.70
Eletroeletrônicos	8763	14167.65	14.90	32.99
Pneus	4895	21873.40	8.32	50.94
Total	58816	42941.53	-	-

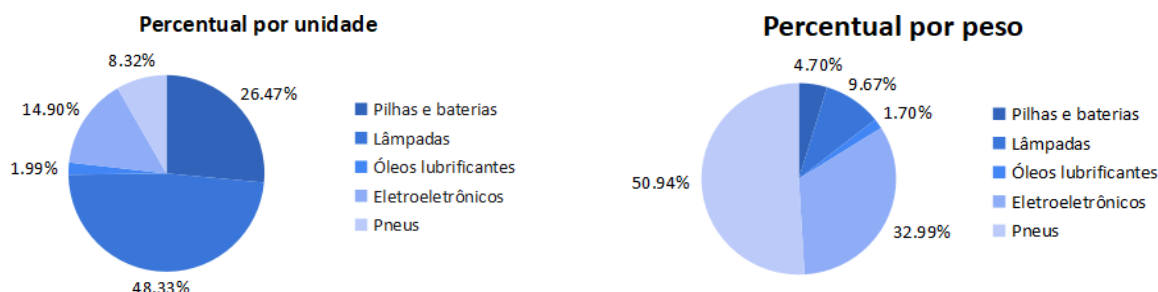


Figura 7. Percentagem dos resíduos coletados, distribuídas por tipologia, unidade e peso

Em relação aos resíduos e embalagens de agrotóxicos, cabe destacar que esta tipologia não foi coletada nas ações do projeto, uma vez que o Inpev, entidade gestora, no Brasil, do Sistema Campo Limpo e do Sistema Brasileiro de Logística Reversa de Embalagens e Resíduos de Agrotóxicos, tem uma ampla atuação na região de abrangência do projeto, em todos os 17 municípios contemplados, realizando coletas periódicas na região. No município de Coimbra, há um Ponto de Recebimento de Embalagens e Resíduos de Agrotóxicos do Inpev, para o qual são destinados esses resíduos. Desta forma, durante a realização das campanhas de educação ambiental, bem como do evento de coleta, não foram identificados nos municípios resíduos de agrotóxicos e embalagens acumulados, com exceção do município de Viçosa. Desse modo, as ações do projeto para esta tipologia de resíduo restringiram às campanhas e atividades de educação ambiental, que contemplavam informações sobre a estrutura da logística reversa praticada pelo Inpev.

Na Tabela 6 são apresentados os quantitativos de resíduos coletados por município e na UFV. Observou-se uma grande variabilidade, seja por peso ou por unidade, nestes quantitativos. Isso foi associado ao diferente nível de envolvimento e participação dos órgãos públicos municipais e dos cidadãos na etapa de educação ambiental. Percebeu-se que os maiores resultados quantitativos foram obtidos nos municípios nos quais houve maior interação dos representantes municipais, especialmente das equipes da Secretaria de Educação e da Secretaria de Meio Ambiente, com a equipe do projeto. Esta situação ocorreu nos municípios de Presidente Bernardes, Paula Cândido e Porto Firme, nos quais foram coletados, respectivamente, 1515.85 Kg, 4308.85 Kg e 6431.63 kg.

No município de Presidente Bernardes, um caminhão foi disponibilizado pela prefeitura para recolher os resíduos da área rural, favorecendo a inclusão e participação da população rural nas ações do projeto. No município de Paula Cândido houve uma intensa participação da equipe local na divulgação das ações do projeto em redes sociais, especialmente em grupos de *Whatsapp* e por meio de motoradio na área urbana municipal. Em Porto Firme, foi realizada uma gincana pelas escolas para estimular a separação dos resíduos pelas famílias em suas casas. Os resíduos foram acumulados nas escolas e recolhidos no dia do evento “Uma Tarde pelo Planeta”, além do recolhimento dos resíduos entregues pela população no próprio evento.

Tabela 6. Quantitativo dos resíduos coletados por tipo de resíduo e município

Município	Pilhas e baterias		Lâmpadas		Filtros, óleos lubrificantes e suas embalagens		Eletroeletrônicos		Pneus		Total	
	Und*	Peso (kg)	Und	Peso (kg)	Und	Peso (kg)	Und	Peso (kg)	Und	Peso (kg)	Und	Peso (kg)
Amparo do Serra	685	11.85	61	10.35	4	0.65	138	353.45	25	110.10	913	486.40
Cajuri	4	0.15	22	4.95	6	8.90	61	438.50	294	1261.20	387	1713.70
Canaã	280	5.65	30	1.75	17	1.10	244	274.85	67	602.95	638	886.30
Coimbra	259	11.15	5	0.60	23	10.40	44	354.65	100	949.85	431	1326.65
Guaraciaba	234	4.45	43	6.20	0	0	393	318.65	16	108.25	686	437.55
Jequeri	484	9.90	9	0.50	2	2.10	620	1009.05	1	5.50	1116	1027.05
Oratórios	1197	20.05	171	27.05	2	35	280	371.95	8	84.75	1658	538.80
Paula Cândido	5656	121.40	6	0.20	0	0	74	172.75	1966	4014.50	7702	4308.85
Pedra do Anta	130	5.65	8	0.90	16	5	36	225.55	109	1103.05	299	1340.15
Porto Firme	955	41.28	31	2.65	60	4.75	603	849.90	1295	5533.05	2944	6431.63
Presidente Bernardes	605	17.20	107	11.20	4	0.85	303	993.95	129	492.65	1148	1515.85
Santo Antônio do Grama	334	8.10	58	2.95	58	21.10	72	336.90	83	678.85	605	1047.90
São Geraldo	16	2.15	87	16.35	69	18.15	17	122.45	50	890.90	239	1050
São Miguel do Anta	472	5.10	20	0.90	16	4.10	138	96.75	13	59.30	659	166.15
Teixeiras	0	0	0	0	30	4.60	31	28.60	179	187.80	240	221
Urucânia	654	4.40	21	3.20	44	48.85	251	329.15	46	812.60	1016	1198.20
Viçosa	3173	128	370	21.20	813	345.35	4124	3885	283	900.10	8763	5279.65
UFV	428	1622.15	27375	4040	4	220	1334	4005.55	231	4078	29372	13965.70
Totais:	15566	2018.63	28424	4150.95	1168	730.90	8763	14167.65	4895	21873.40	58816	42941.53

* Und - Unidade

Observação: destaque, em negrito, para os municípios que apresentaram maior quantidade de resíduos coletados e destinados à logística reversa

Na Tabela 7 é apresentada a distribuição amostral da quantificação dos resíduos feita por unidade coletada para cada tipologia de resíduo avaliado no Projeto RMLR. Os diagramas boxplot dessa distribuição são apresentados na Figura 8.

Tabela 7. Distribuição amostral dos resultados de quantificação por unidade de resíduos coletados

Resíduo	Distribuição Amostral				
	1º quartil	3º quartil	Mediana	Valor Mínimo	Valor Máximo
Pilhas e baterias	234	685	472	0	5656
Lâmpadas	9	61	30	0	370
Filtros, óleos lubrificantes e suas embalagens	4	44	16	0	813
Eletroeletrônicos	61	303	138	17	4124
Pneus	25	179	83	1	1966

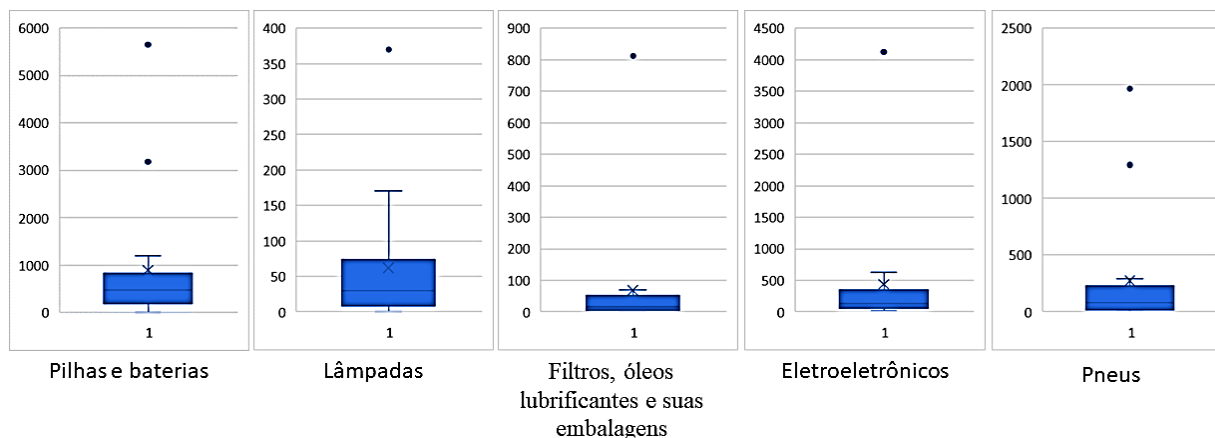


Figura 8. Diagramas Boxplot da distribuição amostral por tipologia de resíduo coletado

Na Tabela 8 é apresentada a relação de resíduos gerados por habitantes em cada município atendido pelo projeto. A média geral de todas as tipologias de resíduos sujeitos à logística reversa coletados pelo projeto foi de 0.3 unidades por habitantes e 0.22 quilos por habitante. De acordo com o Relatório Global de Resíduos Eletrônicos da ONU (Balde *et al.*, 2024), a média de geração de resíduos eletrônicos no Brasil, que inclui eletroeletrônicos, lâmpadas, pilhas e baterias, em 2022 foi de 4.4 quilos por habitantes. A média de coleta e destinação pela logística reversa desses resíduos é de 0.74 quilos por habitante, ou seja, apenas 17% dos resíduos gerados são destinados de forma correta. Mesmo com o baixo percentual de atendimento pela logística reversa para os

resíduos eletroeletrônicos, o Brasil é o líder na América Latina. No Continente Americano, a média de resíduos coletados e destinados à logística reversa é de 30%, Na Europa, 42.8%; na Oceania, 41.4%; na Ásia, 11.9% e África, 0.7%, fazendo com que a média mundial para a logística reversa de resíduos eletroeletrônicos seja de 22.3% (Balde *et al.*, 2024).

Tabela 8. Relação do quantitativo de resíduos coletados por habitantes e destinados à logística reversa

Município	População (habitantes)	Unidades/habitantes	Peso/habitantes
Pedra do Anta	3311	0.090	0.405
Cajuri	4088	0.095	0.419
Santo Antônio do Grama	4229	0.143	0.248
Amparo do Serra	4541	0.201	0.107
Canaã	4715	0.135	0.188
Presidente Bernardes	4850	0.237	0.313
Oratórios	4917	0.337	0.110
São Miguel do Anta	6334	0.104	0.026
Coimbra	7117	0.061	0.186
Paula Cândido	8659	0.889	0.498
Guaraciaba	9753	0.070	0.045
São Geraldo	10282	0.023	0.102
Porto Firme	10569	0.279	0.609
Urucânia	10600	0.096	0.113
Teixeiras	12255	0.020	0.018
Jequeri	12419	0.090	0.083
Viçosa	76430	0.115	0.069
Total	195069	0.302	0.220

Observação: destaque, em negrito, para os municípios que apresentaram maior taxa per capita de resíduos coletados e destinados à logística reversa

Considerando o quantitativo de resíduos eletroeletrônicos gerados, a taxa de geração per capita de resíduos e a quantidade destinada à logística reversa, de acordo com os dados apresentados por Balde *et al.* (2024), foi calculado a taxa per capita de destinação para a logística reversa, dado aos resíduos eletroeletrônicos para efeito de comparação com os resultados obtidos pelo Projeto Rede Mineira de Logística Reversa. Ressalta-se que não foram encontrados dados numéricos referentes à geração de resíduos eletroeletrônicos em Minas Gerais, apenas dados da quantidade total de resíduos eletroeletrônicos movimentados em Minas Gerais no ano de 2022 (SEMAD, 2024), destacando-se a relevância dos dados gerados por esta pesquisa para o Estado (Tabela 9).

Pela análise dos dados apresentados na Tabela 9, verifica-se que a taxa de reciclagem obtida pelo projeto para os municípios mineiros foi de 0.22 kg/habitante, sendo inferior à taxa mundial, mas significativamente superior à taxa calculada para o Estado de Minas Gerais, de 0.06 kg/habitante. Essa diferença indica a necessidade e a importância de realização prévia de ações e campanhas de educação ambiental e de mobilização popular para a coleta e destinação adequada desses resíduos perigosos.

Tabela 9. Relatório Global de resíduos eletroeletrônicos em 2022 (Adaptado de Balde *et al.*, 2024)

Local	Geração de resíduo perigoso* (Kg)	Resíduo destinado à logística reversa (Kg)	Taxa de geração per capita (Kg/hab)	Percentual destinado à logística reversa (%)	Taxa per capita destinada à logística reversa** (Kg/hab)
Mundial	62 bilhões	13.8 bilhões	7.8	22.3	1.73
África	3.5 bilhões	25 milhões	2.5	0.7	0.18
Ásia	30 bilhões	3.6 bilhões	6.6	11.9	0.78
Oceania	707 milhões	292 milhões	16.1	41.4	6.66
Europa	13 bilhões	5.6 bilhões	17.6	42.8	7.53
Américas	14 bilhões	4.3 bilhões	14.1	30	4.23
Brasil	2.4 bilhões		4.4	17	0.74
Taxa per capita destinada à logística reversa no Estado de Minas Gerais, Brasil (Kg/hab)***					0.06
Taxa per capita destinada à logística reversa nos 17 municípios mineiros do Projeto-Piloto para estruturação da Rede Mineira de Logística Reversa (Kg/hab)****					0.22

*e-waste global (eletroeletrônicos; lâmpadas; pilhas e baterias); **Calculado pelos autores; ***Calculado pelos autores baseado na quantidade total de resíduos eletroeletrônicos movimentados em Minas Gerais no ano de 2022 e do Censo 2022 do IBGE; ****Resíduos coletados e destinados pela RMLR (eletroeletrônicos; lâmpadas; pilhas e baterias; pneus; filtros, óleos lubrificantes e suas embalagens)

A análise estatística realizada para verificar a correlação entre o quantitativo de resíduos coletados em unidade e a população municipal apresentou um coeficiente de Pearson de 0.72, indicando que há uma correlação forte entre as variáveis população e unidades coletadas, ou seja, quanto maior a população, menor a quantidade proporcional de resíduos coletada. Essa tendência pode ser verificada pela análise do gráfico da Figura 9: quando foi realizado o atendimento em Viçosa, cidade com a maior população, não houve um aumento significativo na quantidade coletada.

É importante ressaltar que, no município de Viçosa, já está implementada a logística reversa de lâmpadas; pilhas e baterias; filtros, óleos lubrificantes e suas embalagens. Apesar do município não ser atendido pela logística reversa de eletroeletrônicos, há uma grande quantidade de estabelecimentos comerciais prestadores de assistência técnica que recolhem os equipamentos que não são mais funcionais, e realizam a venda para empresas recicladoras. A coleta de pneus é realizada pela Prefeitura Municipal, que encaminha esses resíduos para a empresa Reciclanip, responsável por sua logística reversa no Brasil. Portanto, isso caracteriza que a demanda por projetos de campanha itinerante é de fato maior em municípios de pequeno porte.

A análise de correlação entre o quantitativo de resíduos coletados em peso e a população municipal apresentou um coeficiente de correlação de Pearson de 0.53, indicando que há uma correlação moderada entre as variáveis população e em peso, ou seja, quanto maior a população, menor a quantidade proporcional coletada (Figura 10).

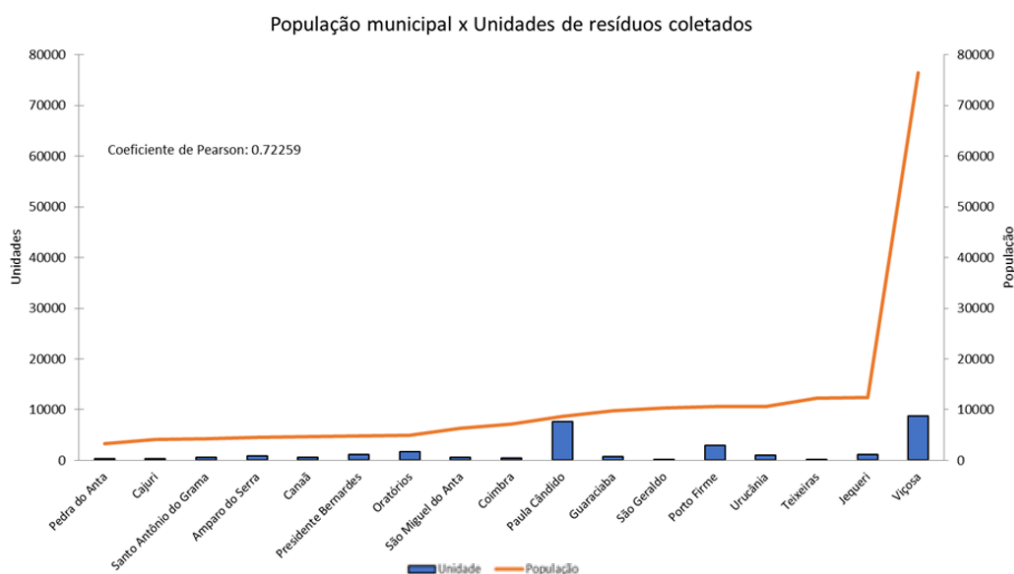


Figura 9. Relação entre população e quantidade de resíduos coletados em unidades



Figura 10. Relação entre população e quantidade de resíduos coletados em peso

Avaliação da percepção da população local em relação à logística reversa

Os questionários para avaliar o envolvimento e participação da população em relação à logística reversa foram aplicados em 9 cidades e contaram com a resposta de 34 entrevistados. Os participantes foram questionados sobre como tomaram conhecimento do evento, se haviam levado algum resíduo, qual o tipo de resíduos levaram e qual o destino seria dado ao resíduo, se não houvesse o projeto. Os entrevistados disseram saber do evento “Uma Tarde pelo Planeta” por meio do folder, entregue nas escolas durante as atividades de educação ambiental; pelas mídias sociais; por meio da mobilização realizada com o carro de som, no dia do evento, e por amigos e parentes. Apenas 8% dos entrevistados não levaram algum resíduo para ser descartado no dia do evento. Dos 31 entrevistados que levaram resíduos, apenas uma pessoa disse ter entregue embalagens de óleo lubrificante, todas as demais levaram algum tipo de resíduo: eletroeletrônicos, lâmpadas, pilhas e/ou baterias, todas essas tipologias consideradas, mundialmente, somente como resíduos eletroeletrônicos, diferentemente da classificação no Brasil. Nota-se que 7 entrevistados ressaltaram a importância e a atratividade das brincadeiras e atividades, realizadas durante o evento, para uma ação de educação ambiental desenvolvida de forma lúdica para as crianças.

Abrigo de armazenamento temporário de resíduos

A NBR 12235/1992 apresenta as exigências para o armazenamento temporário dos resíduos perigosos, o qual deverá “ser feito de modo a não alterar a quantidade/qualidade do resíduo” (ABNT, 1992, p.2). A norma descreve critérios quanto ao acondicionamento e caracterização dos resíduos, à localização do abrigo, ao isolamento, à sinalização, à iluminação e força, à comunicação, ao acesso, ao treinamento, ao manuseio dos resíduos e ao controle da poluição. A Tabela 10 traz um resumo dos principais itens observados na referida norma.

O abrigo de armazenamento temporário de todos os resíduos perigosos foi instalado no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) da Universidade Federal de Viçosa. Após os eventos “Uma Tarde pelo Planeta”, os resíduos eram transportados por empresa especializada em logística de resíduos perigosos e dispostos no abrigo.

O abrigo temporário de resíduos perigosos foi montado com tenda plástica com fechamento nas laterais em pátio cimentado com sistema de drenagem de água pluvial (Figura 11), com dimensões 15m x 15m x 3m, de modo a garantir sua impermeabilização e a proteção contra agentes naturais, contando com placas de sinalização para alerta de presença de resíduo perigoso (Figura 12). Cada tipo de resíduo foi armazenado separadamente, mas dentro do mesmo espaço. Os pneus e eletroeletrônicos foram alocados diretamente no piso cimentado ou em grandes bolsas, conhecidas como bigbags. As lâmpadas, pilhas e baterias, e as embalagens e filtros de óleos lubrificantes foram armazenadas em bombonas, alocadas em cima de bacias de contenção de vazamentos, conforme exigências da NBR 12235/1992.

Tabela 10. Condições para o armazenamento temporário de resíduos perigosos segundo a NBR 12235/1992*

Descrição da etapa/procedimento realizado	Critérios da norma
Acondicionamento em contêineres ou tambores	Preferencialmente em áreas cobertas, bem ventiladas, colocados sobre base de concreto ou material que impeça a lixiviação e percolação.
Acondicionamento a granel	Em construções fechadas e impermeabilizadas.
Características dos resíduos	Análise prévia das propriedades físicas e químicas dos resíduos antes do seu armazenamento. Elaboração de plano de amostragem de resíduos.
Localização	Local em que: perigo de contaminação ambiental minimizado; aceitação da população seja maximizada, esteja de acordo com o zoneamento da região. Considerar condições de operações industriais da vizinhança que ofereçam riscos de atingir os resíduos estocados, bem como riscos potenciais de fenômenos naturais ou artificiais.
Isolamento e sinalização	Sistema de isolamento que impeça o acesso de pessoas estranhas. Sinalização de segurança para os riscos de acesso. Áreas definidas, isoladas e sinalizadas para resíduos compatíveis.
Iluminação e força	A instalação deve estar suprida com iluminação e força.
Comunicação	Sistema de comunicação interno e externo, além de permitir seu uso em ações de emergência
Acessos	Acessos protegidos, e que permitam o uso em quaisquer condições climáticas
Treinamento	Capacitação sobre a operação da instalação de armazenamento
Manuseio	Utilização de Equipamento de Proteção Individual para o manuseio de resíduos perigosos
Controle da poluição	Uso de equipamentos e estruturas para controle de poluição ou sistemas de tratamento de poluentes ambientais. O uso de bacias de contenção, contêineres e/ou tambores com materiais compatíveis, locais impermeabilizados e estruturas para evitar escoamento superficial são algumas medidas adotadas nesse controle.

*ABNT, 1992.

Os resíduos que chegavam ao abrigo de armazenamento temporário eram descarregados na área de recebimento, separados de acordo com sua categoria e armazenados corretamente. Diversos resíduos recicláveis foram identificados nessa etapa, como caixas de papelão usadas pelos cidadãos para armazenar e transportar os resíduos até o evento ou embalagens plásticas que acumulavam as pilhas e baterias. Esses resíduos foram encaminhados para as associações de catadores de Viçosa.



Figura 11. Abrigo temporário de armazenamento de resíduos na Universidade Federal de Viçosa



Figura 12. Sinalização de segurança.

Destinação Final

O processo de destinação final de cada um dos resíduos de logística reversa foi realizado pela respectiva instituição gestora responsável no Brasil pela coleta e destinação final do resíduo (Figura 13). A Reciclanip coletou e destinou os pneus inservíveis, o Instituto Jogue Limpo coletou e destinou as embalagens plásticas de óleo lubrificante usadas e apoiou na coleta do óleo lubrificante usado ou contaminado pela empresa TASA Ambiental; a Reciclus coletou e destinou as lâmpadas e a Green Eletron coletou e destinou as pilhas, baterias, eletrônicos e seus componentes.

Todas as instituições gestoras foram parceiras do projeto e realizaram suas atividades sem ônus para os municípios ou para a UFV, além de fornecerem ao projeto os certificados de destinação (Figura 14).



Figura 13. Coleta de pneus e coleta de eletroeletrônicos para destinação final pela instituição gestora responsável.



Figura 14. Certificado de Destinação fornecido pela instituição gestora Reciclus

Conclusões

A Rede Mineira de Logística Reversa é um projeto de pesquisa em extensão universitária que objetiva criar e testar uma modelagem para proporcionar o atendimento de todos os 853 municípios mineiros com a logística reversa de todas as tipologias de resíduos perigosos em campanha de coleta itinerante com a centralização nas Instituições de Ensino Superior.

A atuação de todas as instituições gestoras de resíduos de logística reversa conjuntamente promove a eficiência e eficácia da educação ambiental da população sobre a amplitude dos resíduos que eles devem separar para a logística reversa. Isto significa que todos os recursos financeiros das instituições gestoras para o estado de Minas Gerais podem ser usados em conjunto e, assim, proporcionar a atuação em todos os municípios mineiros com educação ambiental e coleta de todos os resíduos perigosos de uma única vez, facilitando para a população e otimizando para a logística de coleta e destinação final.

O projeto-piloto possibilitou o atendimento a 17 municípios mineiros, todos com populações inferiores a 25 mil habitantes, à exceção de Viçosa. Também foi contemplado no projeto o campus Viçosa da UFV. Ao todo, foram coletadas 58816 unidades de resíduos perigosos, que corresponderam a um peso total de 42941.53 kg. Todos os resíduos perigosos coletados pelo projeto (pilhas e baterias; pneus; embalagens e resíduos de óleos lubrificantes; lâmpadas e produtos eletroeletrônicos e seus componentes) foram destinados de forma adequada, em parceria com as instituições gestoras responsáveis.

Apesar de ser líder em logística reversa de eletroeletrônicos na América Latina, o Brasil ainda tem muito o que ampliar no atendimento aos municípios, principalmente os menores, e entende-se que a estratégia proposta pela Rede Mineira de Logística Reversa pode impulsionar esse processo em Minas Gerais e ser estendida aos demais estados brasileiros e outros países da América Latina com as adaptações necessárias às suas especificidades, mas contribuindo grandemente para uma efetiva educação ambiental e coleta unificada de resíduos perigosos.

Agradecimentos

À FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo financiamento concedido que possibilitou a execução deste projeto.

Referencias bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) *NBR 12235: Armazenamento de resíduos sólidos perigosos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 14 pp.
- Atlas Brasil (2010) Índice de Desenvolvimento Humano Municipal 2010. Acesso em: 01 de agosto de 2025.
- Disponível em: <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>

- Azevedo, M. A., Diniz, N. R., Silva, J. V. A. G., Marques, D. S. (2024) Projeto-piloto para estruturação da rede mineira de logística reversa. *7º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade*, Curitiba, PR, Brasil.
- Brasil (2010) *Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*, Diário Oficial da União, Brasília, DF, Brasil. Acesso em: 13 de janeiro de 2025. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- Brasil (2015) *Acordo Setorial para implantação do Sistema de Logística Reversa de Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista*, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, Diário Oficial da União, de 12 de março de 2015, Seção 3, número 48, pag 150, Brasília, DF, Brasil. Acesso em: 10 de janeiro de 2025. Disponível em: https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Publicacao-do-Extrato-do-Acordo-Setorial-de-Lampadas-no-DOU-12_03_2015.pdf
- Brasil (2022) *Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*, Diário Oficial da União, Brasília, DF, Brasil. Acesso em: 10 de janeiro de 2025. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm#art91
- Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., D'Angelo, H., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Khatriwal, D. S., Cortemiglia, V. L., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N., Wagner, M. (2024) *Global E-waste Monitor 2024*. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Geneva/Bonn. Acesso em 15 de janeiro de 2025. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/12/GEM_2024_EN_11_NOV-web.pdf
- COPAM, Conselho Estadual de Política Ambiental (2024) *Deliberação Normativa nº 249, de 30 de janeiro de 2024. Define as diretrizes para implementação, operacionalização e monitoramento dos sistemas de logística reversa no estado de Minas Gerais, e altera a Deliberação Normativa Copam nº 217, de 06 de dezembro de 2017*, Diário Oficial do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Acesso em 14 de janeiro de 2025. Disponível em: <https://www.pesquisalegislativa.mg.gov.br/LegislacaoCompleta.aspx?cod=208902&marc=>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) *Censo Demográfico de 2010*. Acesso em: 15 de janeiro de 2025. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) *Censo Demográfico de 2022*. Acesso em: 15 de janeiro de 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/22827-censo-demografico-2022.html>
- SEMAD, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2024) *Panorama dos resíduos sólidos no estado de Minas Gerais com base nos dados do sistema MTR-MG Ano-base 2022*, Belo Horizonte, MG. Acesso em: 01 de agosto de 2025. Disponível em: http://legados.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2024/MTR/V_FINAL_PanoramaSistemaMTR_ano_base2022_08_03_24_completa.pdf
- Silva, L. A. da, Silva, L. C. O. (2024) Solid waste public policies and environmental technological innovation: A narrative review on the implementation of reverse logistics. *Research, Society and Development*, **13**(10), e29131047002. Acesso em: 13 de janeiro de 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i10.47002>
- UFV: UFV em números – Edição 2024 (Base de dados 2023) Acesso em: 01 de agosto de 2025. Disponível em: <https://ppo.ufv.br/wp-content/uploads/2024/07/UFV-em-numeros-ano-base-2023.pdf>

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

UM ESTUDO DE CASO SOBRE A PERCEPÇÃO DE SERVIDORES EM UMA INSTITUIÇÃO PÚBLICA DA ÁREA DA SAÚDE ACERCA DE SUAS ATITUDES AMBIENTAIS

Ana Carolina Teles de Aquino ¹
Otávio Augusto Antunes Dias ²
Fabiana Cristina Lima Barbosa ²
Valdir Lamim-Guedes ³
* Marcos Paulo Gomes Mol ¹

A CASE STUDY ABOUT PERCEPTION OF EMPLOYEES IN A PUBLIC HEALTH INSTITUTION ABOUT THEIR ENVIRONMENTAL BEHAVIOR

Recibido el 14 de FEBRERO de 2025. Aceptado el 15 de septiembre de 2025

Abstract

The assessment of a group's environmental practices is fundamental for understanding the impact of Environmental Education (EE) on it. The present study diagnosed the self-declared perceptions of employees at a public health institution in Belo Horizonte regarding the internal EE Program. Using quantitative questionnaires and Principal Component Analysis in R software, variables such as recycling, waste segregation, conscious consumption, use of water and energy, motivation and satisfaction were analyzed. The results showed a greater perception of sustainable attitudes related to water, followed by energy and consumption, while selective collection was less prominent. Two correlation groups were identified: one with satisfaction, selective collection, segregation and consumption, and another with water and energy. The motivation was more associated with waste segregation. Identifying these specific insights can improve program performance, reinforcing the construction of an EA culture adapted to institutional needs.

Keywords: environmental education, perception study, public employees, awareness.

¹ Fundação Ezequiel Dias, Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, Belo Horizonte, Brasil.

² Fundação Ezequiel Dias, Diretoria de Planejamento, Gestão e Finanças, Belo Horizonte, Brasil.

³ Universidade do Estado de Santa Catarina / Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Florianópolis / Chapecó Santa Catarina, Brasil.

*Autor correspondente: Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento. Fundação Ezequiel Dias – FUNED. Rua Conde Pereira Carneiro, 80. Bairro Gameleira. Cidade Belo Horizonte. Estado Minas Gerais. Código Postal (CEP) 30510-010. Brasil. Email: marcos.mol@funed.mg.gov.br

Resumo

A avaliação das práticas ambientais de um grupo é fundamental para compreender o impacto da Educação Ambiental (EA) neste. O presente estudo diagnosticou as percepções autodeclaradas de servidores de uma instituição pública de saúde em Belo Horizonte sobre o Programa de EA interno. Utilizando questionários quantitativos e Análise de Componentes Principais no software R, foram analisadas variáveis como coleta seletiva, segregação de resíduos, consumo consciente, uso de água e energia, motivação e satisfação. Os resultados mostraram maior percepção sobre atitudes sustentáveis relacionadas à água, seguidas por energia e consumo, enquanto a coleta seletiva teve menor destaque. Dois grupos de correlação foram identificados: um com satisfação, coleta seletiva, segregação e consumo, e outro com água e energia. A motivação se associou mais à segregação de resíduos. Identificar essas percepções específicas pode melhorar o desempenho do programa, reforçando a construção de uma cultura de EA adaptada às necessidades institucionais.

Palavras-chave: educação ambiental, estudo de percepção, servidores públicos, conscientização.

Introdução

A complexidade da relação entre o ser humano e a natureza é tema constante de reflexão e pesquisa (Da Silva & Micaela, 2015; Silveira & Lorenzetti, 2021). As atividades extrativistas por exemplo que, anteriormente, visavam somente o subsídio local se tornaram, com o avanço tecnológico e industrial, amplas cadeias interdependentes que sustentam grandes economias e potências ao redor do mundo. Tais intervenções tecnológicas e industriais, direta ou indiretamente, levam a alteração da qualidade ambiental, modificando processos naturais e sociais (Sánchez, 2020). Dentre alguns dos efeitos negativos em relação à alteração da qualidade ambiental, pode-se citar: a ameaça à vida nos ecossistemas, a intoxicação da atmosfera com gases prejudiciais, a destruição dos solos através de usos indevidos e as alterações climáticas, repercutindo no bem-estar, saúde e segurança humana (Balsalobre-Lorente *et al.*, 2023; Khan *et al.* 2022).

No cenário brasileiro, do final dos anos 1970 adiante, a elaboração de leis, decretos, artigos constitucionais, especialmente o 225º artigo, órgãos regulamentadores e políticas instituíram não somente as responsabilidades estatais e civis quanto aspectos e impactos ambientais, mas também, a necessidade da conscientização social acerca desses temas (Sarlet *et al.*, 2017; Fracalanza *et al.*, 2013). Do ponto de vista organizacional, a necessidade de cumprir com as diretrizes legais estabelecidas levaram as organizações a incorporarem ações de responsabilidade ambiental, sendo os esforços, antes direcionados para reparação de danos ambientais, direcionados para a prevenção da ocorrência destes. Isso por si só, no final do século XX, resultou no engajamento com a formulação de políticas ambientais internas, compromissos com adoção de práticas sustentáveis e até mesmo na adoção de um Sistema de Gestão Ambiental, práticas essas consideradas extremamente decisivas no aumento da competitividade entre as instituições (Carvalho & Dias, 2013). Neste contexto, Dias (2006) define a Gestão Ambiental como um conjunto de medidas e procedimentos que permitem a identificação dos problemas ambientais gerados pelas empresas, a revisão dos critérios de atuação e

a incorporação de novas práticas sustentáveis. Associada à Gestão Ambiental está a Educação Ambiental (EA), ferramenta que possibilita a mudança de atitudes frente às questões ambientais nas esferas individual, coletiva e organizacional, permitindo maior avanço das práticas sustentáveis (Sales & Cantarino, 2011; Alcântara, 2012).

O conceito de Educação Ambiental tem sido categorizado de diversas maneiras: educação ambiental popular, crítica, política, comunitária, para o desenvolvimento sustentável, dentre outros (Carvalho, 2004). De acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais para Educação Ambiental (Brasil, 2012), ela pode ser definida da seguinte forma: *Art. 2º A Educação Ambiental é uma dimensão da educação, é atividade intencional da prática social, que deve imprimir ao desenvolvimento individual um caráter social em sua relação com a natureza e com os outros seres humanos, visando potencializar essa atividade humana com a finalidade de torná-la plena de prática social e de ética ambiental (Brasil, 2012, s.p.).*

Os primeiros objetivos da EA foram oficialmente estabelecidos através do Programa Internacional de Educação Ambiental derivado do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) aprovado em 1972. Tais mobilizações, possibilitaram o reconhecimento da EA como instrumento para auxiliar no desenvolvimento de um meio ambiente que harmonize os aspectos humanos e naturais (Barbieri & Silva, 2011), com um escopo visando a obtenção da conscientização, do conhecimento, da atitude, das habilidades e capacidades de avaliação, assim como, da motivação (UNESCO, 1975). No contexto nacional, uma das diretrizes explícitas em torno da EA é a Política Nacional de Educação Ambiental (Brasil, 2009). Esta estabeleceu objetivos que garantiram tópicos como: a compreensão integrada do meio ambiente com as variáveis ecológicas, políticas, psicossociais e culturais, juntamente com a consciência crítica, a promoção da cidadania, a democratização do conhecimento, o fortalecimento do vínculo entre a ciência, a responsabilidade e a sustentabilidade. Dentre algumas de suas incumbências, os estabelecimentos (sejam de categoria pública ou privada), devem dispor de programas de capacitação dos colaboradores, visando a melhoria e o controle efetivo sobre o ambiente de trabalho, assim como os efeitos do processo produtivo no meio ambiente.

Dos programas ativos na categoria pública brasileira, pode-se citar a Agenda Ambiental na Administração Pública (A3P) e, particularmente no estado de Minas Gerais, o Programa AmbientAÇÃO, sendo esse último exclusivo dos serviços públicos e gerenciado por uma área específica dentro da estrutura hierárquica do governo estadual. Com mais de 60 instituições certificadas, o programa AmbientAÇÃO busca reforçar os valores de atitude consciente e qualidade de vida no trabalho atuando nos pilares ambientais, de saúde e de segurança (Lara *et al.*, 2015; De Almeida & Mol, 2019). A iniciativa também dispõe de manuais de boas práticas para a implementação de ações de educação ambiental, sistema de registro de indicadores mensais de consumo de materiais de escritório, consumo de água, energia e redução da emissão de gases estufa, permitindo a geração de relatórios de acompanhamento do alcance

de metas e os pontos que merecem atenção. Além desses indicadores, também são realizadas campanhas, premiações e parcerias entre as instituições participantes por meio do Fórum Interinstitucional AmbientAÇÃO. Ressalta-se que as ações e os manuais de implementação e boas práticas tem a função de nortear o trabalho a ser executado e não há obrigatoriedade de implementação de todas as ações sugeridas, e cada instituição possui características únicas que podem demandar adaptação da boa prática de acordo com a realidade local. Ademais, o sistema de registro de indicadores tem a função de facilitar o acompanhamento e resultados que estão sendo alcançados pela instituição que implementa as ações.

Uma maneira de compreender e avaliar o efeito de um Programa de Educação Ambiental em uma organização pode se dar a partir da análise da Percepção Ambiental. A Percepção Ambiental (PA) pode ser definida como a tomada de consciência do indivíduo sobre o meio ambiente, através de uma perspectiva subjetiva de valores e significados (Da Silva & Ayach, 2021). Dessa maneira, a PA pode ser utilizada como um instrumento da EA, pois, é possível através dela compreender a relação do indivíduo com o meio ambiente, assim como, conhecer os conceitos, valores, perspectivas e frustrações. Tais informações são extremamente importantes para planejar e desenvolver ações ambientais com base na realidade captada, seja em instituições públicas ou privadas (Salviano, 2020; Palma, 2005; Alves, 2022; Guimarães *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o nível de envolvimento autodeclarado dos funcionários em relação às práticas de educação ambiental realizadas em uma instituição de saúde pública, localizada em Belo Horizonte (MG), bem como a importância dessas práticas.

Metodologia

A empresa objeto desse estudo é uma instituição pública de saúde com atuação em produção de medicamentos, pesquisas na área da saúde e análises de vigilância sanitária, epidemiológica e ambiental. Possui em seu corpo de funcionários aproximadamente 1.000 pessoas, incluindo estagiários, bolsistas de iniciação científica e funcionários de empresas terceirizadas que possuem atividades com dedicação exclusiva na instituição. A realização deste estudo de caso no empreendimento justifica-se pela complexidade de atividades e devido à carência de trabalhos científicos investigando prestadores de serviços de saúde sob a ótica que este trabalho se propôs.

Neste estudo, adotou-se o cálculo amostral conforme a Equação 1 a seguir, alcançando o tamanho entre 91 a 100 participantes para validação dos resultados.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2 \cdot (N-1) + Z^2 \cdot p \cdot (1-p)} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

n = tamanho da amostra

N = tamanho da população (1000 funcionários)

Z = valor crítico do nível de confiança (para 95% de confiança, $Z=1.96$)

p = proporção estimada da característica (baixa: 0.7)

e = margem de erro (ex.: 5% $\rightarrow e=0.05$)

A instituição é integrante, desde 2008, do Programa AmbientAÇÃO idealizado e implantado pelo governo estadual nos prédios públicos do estado. O programa visa a redução no consumo de água, energia, papel e copos descartáveis além de incentivar a coleta seletiva e ações de qualidade de vida no trabalho. Para o desenvolvimento das atividades sugeridas pelo Programa a instituição possui uma comissão interna, com integrantes de áreas diversas incluindo um funcionário da área de meio ambiente. Essa comissão cria campanhas educativas para a redução do consumo de recursos (água e energia) e materiais (copo descartável e papel A4), divulgação de informações e textos na rede interna e momentos de interação que incluem exibição de filmes e documentários sobre meio ambiente e realização de oficinas artesanais utilizando resíduos recicláveis. Dentre as diversas ações destaca-se a implantação da coleta seletiva, minimizando o encaminhamento de resíduos para o aterro sanitário. Em toda a instituição há disponibilização de kits de coleta seletiva composto por três lixeiras para separação (papel, reciclável e não reciclável) em toda a instituição, sendo essa uma ação permanente e já incorporada pelos funcionários. Ao longo dos anos de realização de ações de educação ambiental a instituição foi reconhecida pelo governo estadual recebendo uma homenagem especial pela sua participação no Programa, por ser a instituição com o menor índice de consumo de papel A4, foi premiada na categoria “Exemplos, Ações ou Atitudes Sustentáveis” e na categoria “Uso sustentável dos Recursos Naturais”.

De modo a obter informações sobre a percepção acerca da colaboração dos funcionários com as práticas de EA incentivadas na instituição, foi aplicado um questionário individual com perfil quantitativo (Quadro 1). Foi realizado um pré-teste com 23 participantes, de modo a aprimorar o instrumento de pesquisa e atingir resultados mais objetivos e fidedignos (Chagas, 2000). Posteriormente, o formulário foi disponibilizado de maneira online e física, sendo sua versão digital divulgada na plataforma interna da instituição, juntamente com a exibição de um QR Code nos televisores de áreas comuns e computadores, visando a ampliar a publicidade desta ação. Já o modelo físico, foi aplicado nas áreas externas comuns da organização durante o horário de almoço, particularmente para captar os colaboradores que possuem acesso reduzido aos computadores durante o expediente de trabalho. O questionário foi aplicado durante os meses de fevereiro e março de 2024, com perguntas distribuídas conforme apresentado no Quadro 1. Destaca-se que de forma geral, como o programa AmbientAÇÃO é um programa voltado para as questões ambientais e de qualidade de vida no trabalho, parte-se de pressuposto que a EA é abordada em todas as perguntas que abordam a vertente ambiental. Essas perguntas instigam o respondente a fazer relação entre seus conhecimentos, participação e entendimento sobre as ações de educação ambiental.

Quadro 1. Perguntas, assunto e caráter adotados no questionário sobre as percepções ambientais

Pergunta	Investigação	Caráter
1	Vínculo com a instituição	Múltipla escolha
2	Área (diretoria) que atua	Múltipla escolha
3	Conceitos que relaciona com a temática ambiental	Múltipla escolha (máximo 5 alternativas)
(4 a 8)	Nível de contribuição autodeclarado em relação a fatores de consciência ambiental internos (4: coleta seletiva; 5: segregação correta de resíduos; 6: reutilização e/ou redução no consumo de materiais; 7: consumo de água; 8: consumo de energia)	Escala Likert de 10 pontos (0 para contribuição “baixa” e 10 para contribuição “alta”)
9	Nível de conhecimento autodeclarado a respeito do Programa AmbientAÇÃO	Escala Likert de 10 pontos (0 para contribuição “baixa” e 10 para contribuição “alta”)
10	Se relaciona temáticas de consciência ambiental com o Programa AmbientAÇÃO	Múltipla escolha
11	Satisfação com o Programa AmbientAÇÃO	Escala Likert de 10 pontos (0 para contribuição “baixa” e 10 para contribuição “alta”)
12	Motivação para se envolver em ações/intervenções/campanhas sobre o tema EA	Escala Likert de 10 pontos (0 para contribuição “baixa” e 10 para contribuição “alta”)
13	Justificativa caso a motivação autodeclarada na resposta anterior seja baixa	Campo de preenchimento aberto
14	Formatos de conteúdo para adquirir conhecimento sobre meio ambiente e sustentabilidade	Múltipla escolha
15	Campanhas realizadas pelo Programa AmbientAÇÃO consideradas de maior prioridade	Múltipla escolha (máximo 3 alternativas)

Com a finalidade de analisar os índices de colaboração, motivação e satisfação dos servidores com as temáticas ambientais, foram utilizados os dados informados pelos entrevistados na Escala de Likert armazenados no software Excel 2016. Posteriormente, esses dados foram interpretados estatisticamente através da Análise de Componentes Principais (ACP) no Software R studio (versão 3.5.3) através do pacote FactoMineR. A ACP, corresponde a uma análise multivariada das interações existentes entre as diversas variáveis analisadas e permite reduzir um conjunto de dados originais em um novo conjunto de variáveis, com menor perda possível da informação (Hongyu *et al.*, 2016). Nessa metodologia, o sentido, módulo, direcionamento e ângulo entre autovetores compostos pelas variáveis permitem a interpretação qualitativa das mesmas (Johnson & Wichern, 2002). Assim, autovetores com

mesmo sentido e próximos entre si, por exemplo, indicam a existência de uma correlação positiva entre as variáveis. Enquanto o índice de contribuição de cada variável, pode ser analisado considerando o módulo de seu autovetor e suas correlações, por sua vez, podem ser verificadas comparando seus sentidos. Variáveis em sentidos semelhantes apresentam correlação positiva e, em sentidos distintos, correlação negativa (Santos, 2018). Neste estudo, optou-se pela ACP devido à possibilidade de análise das correlações entre as variáveis e entre os respondentes, similar ao que foi adotado em trabalhos científicos de mesma natureza, conforme Santos *et al.* 2020, obtendo assim excelentes perspectivas de discussões dos resultados. Desta maneira, os resultados são mais facilmente apresentados e dispensa a apresentação de estatísticas descritivas.

A partir da matriz que contém esses componentes, é possível dimensionar visualmente a correlação entre esses componentes utilizando o auxílio de gráficos. O Quadro 2 indica as variáveis correlacionadas no ACP e as temáticas envolvidas.

Quadro 2. Variáveis aplicadas e suas respectivas correlações

Variável analisada	Temática associada
coleta_seletiva	Contribuição autodeclarada para com a coleta seletiva interna
segregacao_residuos ¹	Contribuição autodeclarada para com a segregação correta de resíduos
consumo	Contribuição autodeclarada para com a redução ou reutilização de materiais em geral.
agua	Contribuição autodeclarada para com o consumo consciente de água
energia	Contribuição autodeclarada para com o consumo consciente de energia
satisfacao	Contribuição autodeclarada para com o consumo consciente de energia
motivacao	Motivação autodeclarada para participar das ações de Educação Ambiental

^[1] Foi mantida a grafia do software o qual não adiciona acentos nas variáveis

Também foi desenvolvida com base nas respostas, uma nuvem de palavras (wordcloud) com os principais conceitos relacionados ao tema “meio ambiente” selecionados pelos participantes (5 dentre 19 alternativas). O uso dessa ferramenta em pesquisas de consciência ambiental, auxilia na análise qualitativa visual das definições mais associadas com a temática, sem limitação de faixa etária ou grau de instrução (Simsar, 2021; Goel, 2023).

Resultados

A aplicação do questionário contou com a participação de 110 respondentes e revelou que, quando perguntados sobre como a pessoa avalia a própria contribuição para a coleta seletiva, 94 respondentes se enquadraram em uma nota igual ou superior a 7 na escala de 0 a 10, indicando bom nível de participação nessa ação implementada na instituição. Em relação à segregação correta de resíduos 93 respondentes informaram um nível de contribuição igual ou superior a 7, para a reutilização e/ou redução do consumo de materiais foram 81 respondentes com nível de contribuição igual ou superior a 7, para o consumo de água foram 92 respondentes nível de contribuição igual ou superior a 7 e para o consumo de energia foram 88 respondentes com nota igual ou superior a 7.

Para melhor compreender os objetivos e a periodicidade das atividades realizadas pelo Programa AmbientAÇÃO, a Tabela 1 abaixo apresenta as ações internas registradas no SIGA (Sistema Integrado de Gestão AmbientAÇÃO) plataforma digital do programa, acessível aos participantes do programa desde 2021. As atividades estão organizadas em três categorias: educativas (destinadas a instruir e capacitar os colaboradores), processuais (voltadas para a manutenção e aprimoramento de procedimentos ambientais implementados antes do programa) e implantação (referentes às novas ações adotadas a partir da adesão ao programa). Vale ressaltar, que as ações catalogadas pelo programa são de sugestão geral para todas as instituições participantes, podendo incluir desde campanhas até reformas estruturais. Já as ações realizadas pela instituição, são aquelas efetivadas e registradas a partir das ações catalogadas.

Tabela 1. Ações internas documentadas pela instituição investigada registradas no sistema digital do Programa AmbientAÇÃO (2021-2024)

Categoria pertencente	Quantidade de ações catalogadas	Quantidade de ações realizadas
Água	17	0
Energia	16	0
Materiais	22	3
Qualidade de vida	11	4
Resíduos	40	15
Total	22	

Vale destacar que as ações catalogadas pelo Programa AmbientAÇÃO foram propostas exclusivamente para prédios públicos e administrativos, o que abarca uma parte das atividades da instituição analisada neste estudo. Contudo, a instituição investigada possui áreas finalísticas voltadas à saúde, o que implica um caráter diferenciado ao empreendimento e justifica a pouca adesão de ações conforme apresentado na Tabela 1.

Com a finalidade de conhecer o perfil dos participantes, a Tabela 2 descreve o quantitativo de colaboradores entrevistados, assim como, seus respectivos vínculos com a instituição estudada.

Tabela 2. Quantitativo e vínculo dos entrevistados

Vínculo	Quantitativo
Funcionário efetivo	60% (66)
Funcionário contratado	11.8% (13)
Estagiário/bolsista	20% (22)
Terceirizado	8.2% (9)
Total	100% (110)

A Figura 1 representa as palavras que mais se relacionam com o tema “Meio Ambiente” segundo os participantes. A questão buscou relacionar os conceitos que os respondentes já possuem com a temática ambiental e, conforme esperado, a palavra “Desenvolvimento sustentável” é a que apresenta maior associação com 73.6% de indicações, seguido de “Futuro” e “Preservação”. Interessante reportar que a quarta palavra mais indicada foi “Qualidade de vida” a frente de palavras como “Reciclagem”, “Biodiversidade”, “Mudanças climáticas”, “Poluição” e “Desmatamento”.

A respeito da percepção geral dos colaboradores da instituição sobre as temáticas ambientais, a Figura 2 ilustra a intensidade e correlação entre as prioridades de contribuição quanto aos fatores de consciência ambiental, motivação e satisfação, representados pelas variáveis do Quadro 2. Quanto à percepção geral, considerando todos os participantes, sobre a colaboração com temáticas relacionadas à EA, a variável mais expressiva foi *agua*, seguida por *energia* e *consumo*. O menor grau de percepção de colaboração foi por parte da variável *coleta_seletiva*. Foram observados, no geral, dois grupos de forte correlação. O primeiro representado pelas variáveis *satisfacao*, *coleta_seletiva*, *segregacao_residuos* e *consumo* e o segundo pelas variáveis *energia* e *agua*. No caso do primeiro grupo, pode-se sugerir que, quando satisfeito com o programa AmbientAÇÃO interno, o indivíduo tende a colaborar com as práticas de coleta seletiva, segregação correta de resíduos e consumo consciente de materiais. E quanto ao segundo grupo, foi possível inferir que, quando em condições de colaborar com o consumo consciente de energia, os entrevistados também colaboram com o consumo consciente de água. Já quanto à variável *motivacao*, sua maior correlação foi com *segregacao_residuos*, indicando que, quando motivado a participar de ações de educação ambiental, o indivíduo também colabora com a segregação correta de resíduos. Não houve correlação entre a variável *motivacao* com as variáveis *energia* e *agua*.

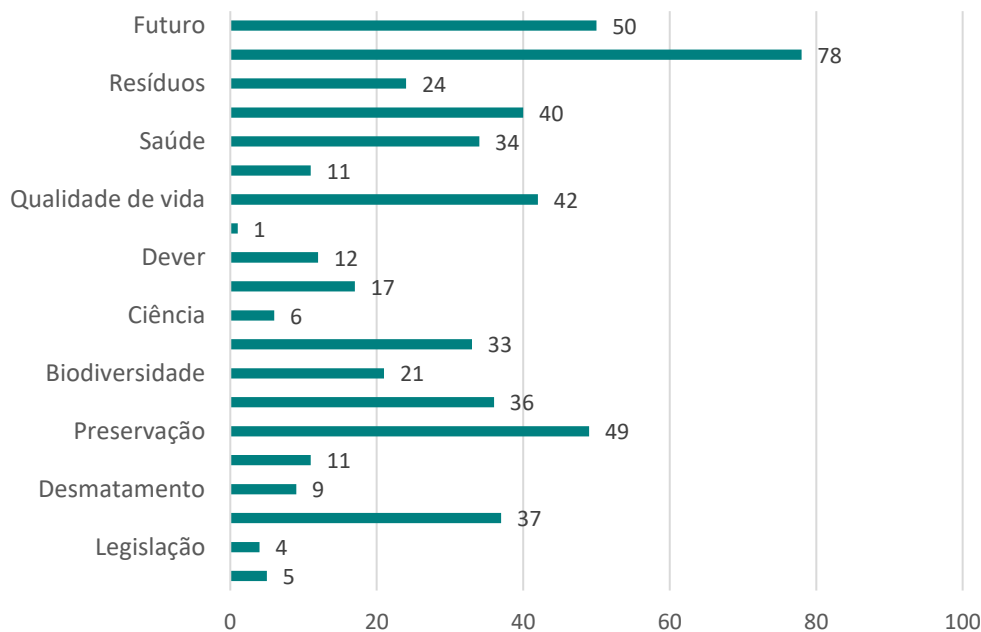


Figura 1. Gráfico de barras apontando os conceitos mais relacionados com meio ambiente segundo entrevistados

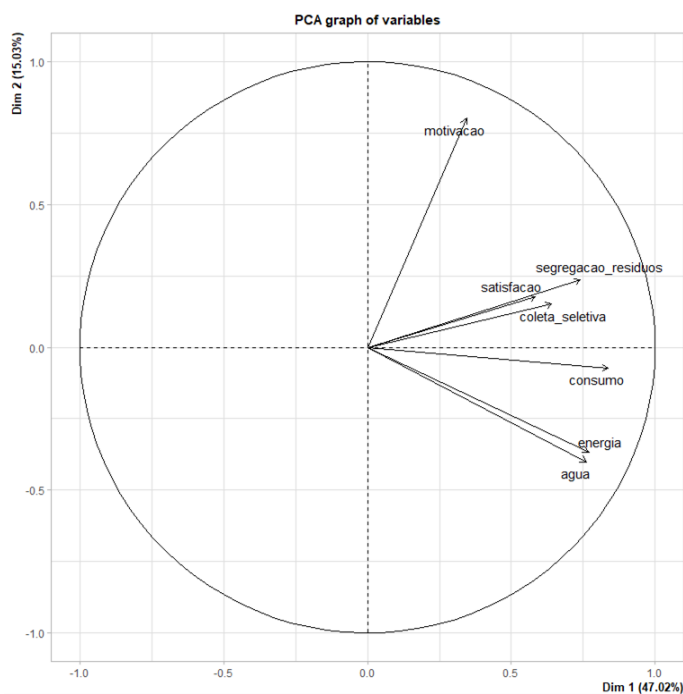


Figura 2. Percepção geral dos colaboradores da instituição em relação às variáveis de contribuição sobre EA

Quanto aos resultados mediante filtro por vínculo com a instituição, ou seja, analisando os agrupamentos de respostas em função do cargo ocupado pelos participantes, a Figura 3 apresenta os gráficos obtidos para cada categoria.

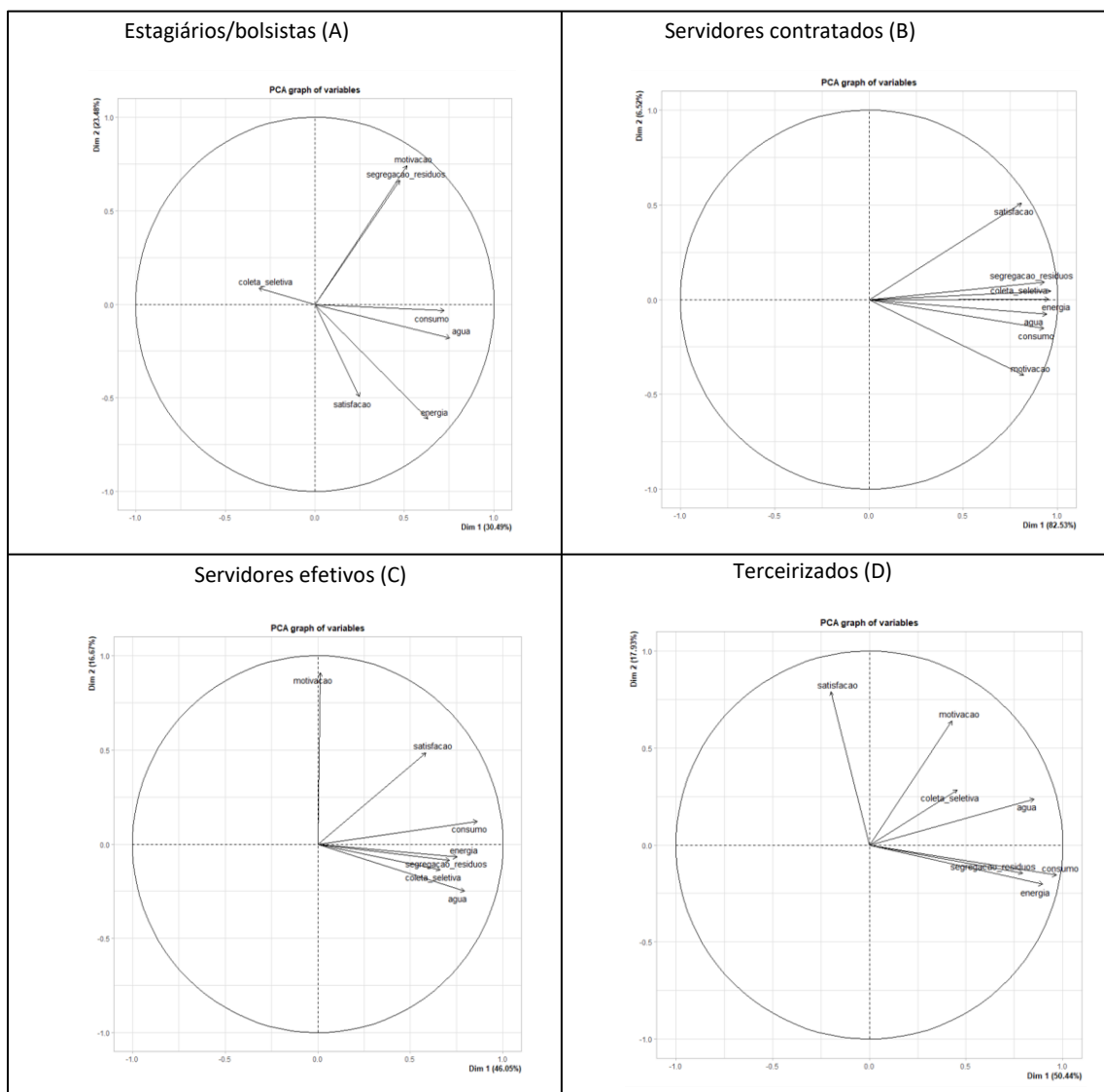


Figura 3. Resultados em relação às variáveis de percepção sobre EA considerando vínculo com a instituição

De acordo com a Figura 3 (A), no caso dos Estagiários/bolsistas, a maior percepção de contribuição foi por parte da variável energia assinalando uma maior prioridade de autodeclaração favorável ao consumo energético consciente por parte desse grupo. Dentre todas as variáveis pesquisadas, *motivacao* foi a mais expressiva, indicando um alto interesse em se envolver com ações de EA, algo relativamente esperado pensando no perfil do grupo que muitas vezes está motivado para aprender novidades. Não foram observadas fortes correlações entre as variáveis totais, havendo somente uma fraca relação entre *satisfacao* e *motivacao*, podendo sugerir que o interesse pelas atividades de EA não está fortemente relacionado com a satisfação em relação ao programa interno vigente. Também foi observada, uma correlação inversa entre *agua* e *coleta_seletiva*, o que pode indicar que, quando contribuintes no consumo consciente de água, os Estagiários/bolsistas tendem a não colaborar com a coleta seletiva, e vice-versa, o que poderia ser explicado por algum entendimento equivocado sobre alguns dos processos. Das variáveis de contribuição, *coleta_seletiva* foi a que apresentou menor autovetor, o que aponta uma deficiência na percepção de colaboração com essa prática por parte desse grupo.

Em se tratando dos Servidores contratados, Figura 3 (B), houve uma significativa correlação entre as variáveis de contribuição, o que indica uma tendência de colaboração conjunta entre as temáticas de segregação correta de resíduos, coleta seletiva e consumo consciente de água, energia e materiais. Em termos de intensidade, *coleta_seletiva* foi a mais significativa, indicando que, para os Servidores contratados, essa prática é a de maior colaboração. A relação entre as variáveis *motivacao* e *satisfacao* aumentou em relação aos Estagiários/bolsistas, com prevalectimento de *satisfacao* em frente a *motivacao*. Isso significa que para os Servidores contratados, a motivação em participar de ações de EA depende da satisfação com o programa interno, sendo essa mais significativa. O servidor contratado pode vir com a visão de outros locais de trabalho, e isso pode sugerir diferentes vivencias em relação a EA.

Partindo para os Servidores efetivos, Figura 3 (C), há uma maior correlação entre *satisfacao* e *motivacao* em comparação com Servidores contratados e Estagiários/bolsistas, indicando mais uma vez, que a satisfação com o desempenho do programa afeta no interesse pelas ações de EA. Foram também observadas correlações positivas entre as percepções de colaboração, sendo a variável consumo a mais significativa, seguida por *agua* e *energia*. Tal resultado pode indicar uma tendência maior em colaborar com o consumo consciente de materiais frente às outras variáveis. Por fim, em relação aos colaboradores Terceirizados, Figura 3 (D), ainda que positivamente correlacionadas, *satisfacao* possui mais influência que motivação, indicando novamente que a avaliação de desempenho do programa Ambiental interno afeta diretamente o interesse pelas ações de EA. O grupo de correlação mais intensa foi formado por energia, *segregacao_residuos* e consumo, sendo este o mais expressivo dos autovetores. Isso indica que, ao colaborarem com o consumo consciente de energia e materiais, os terceirizados também contribuem com a segregação correta de resíduos. Essas variáveis podem ter sido priorizadas devido às ações de EA desenvolvidas na instituição, que muitas vezes estão associadas a estes temas. A variável *coleta_seletiva* foi a menos expressiva no campo das contribuições para o grupo.

Já quanto aos resultados mediante setor institucional, a Figura 4 (A) apresenta o conjunto dos PCAs obtidos para este filtro setorial. Na área de Pesquisa e Desenvolvimento, *motivacao* e *satisfacao* apresentaram correlação inversa, com *motivacao* sendo a de menor módulo entre todas as variáveis. Isso mostra uma contradição entre as variáveis, sugerindo que quanto mais motivados em relação às ações de EA, menos satisfeitos estão em relação ao desempenho do programa AmbientAÇÃO, o que não faz muito sentido na prática e provavelmente está relacionado a algum entendimento equivocado sobre o programa AmbientAÇÃO. Em termos de contribuição, foram encontrados dois grupos com correlações positivas (*consumo* e *energia*; *segregacao_residuos* e *coleta_seletiva*), assinalando que quando contribuinte do consumo consciente de materiais, também contribuem com o consumo consciente de energia, e que, quando contribuintes da segregação correta de resíduos, também contribuem com a coleta seletiva. Entre as variáveis, *segregacao_residuos* foi a mais expressiva seguida por *agua*, indicando uma maior percepção de colaboração com a segregação correta de resíduos e o *consumo* consciente de água.

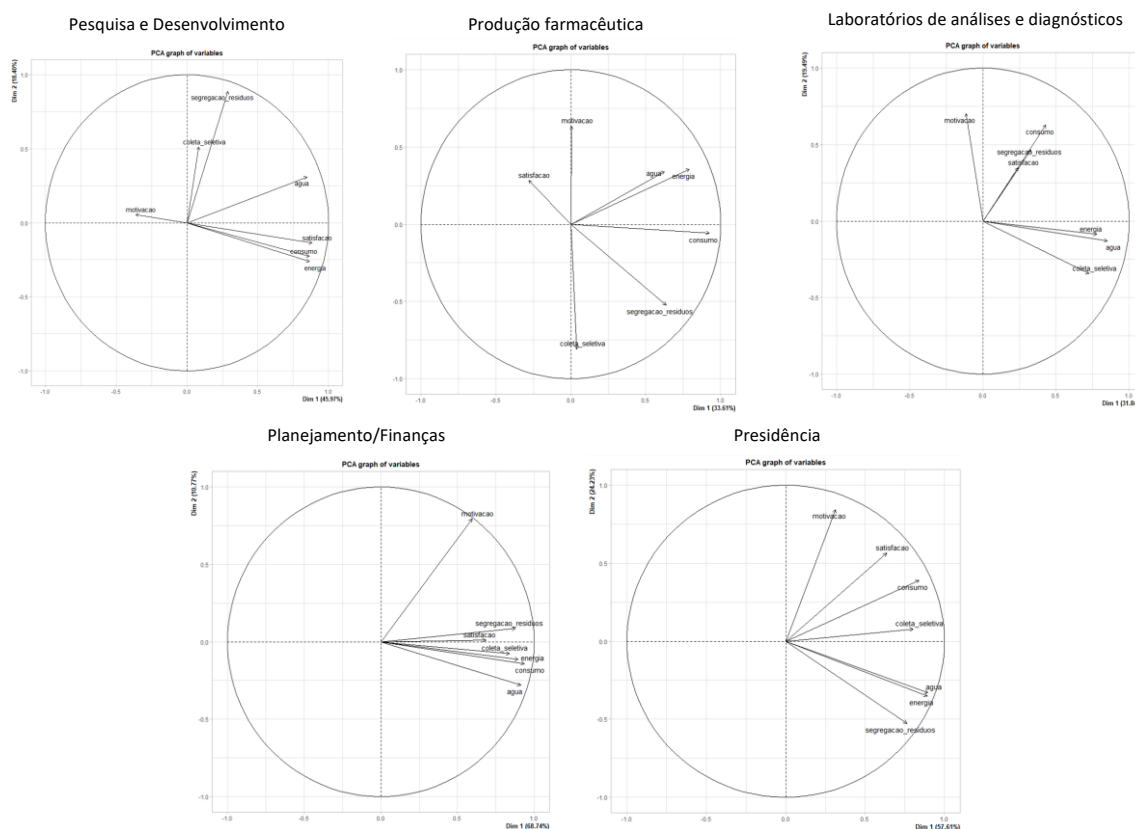


Figura 4. Resultados considerando setor institucional

No setor de Produção farmacêutica, Figura 4 (B), foram observadas correlações inversas entre *satisfacao* e *segregacao_residuos*, indicando que, há uma dificuldade para estar satisfeito e contribuir com a segregação correta de resíduos ao mesmo tempo, o que pode estar associado a alguma dúvida quanto aos procedimentos práticos de separação dos resíduos. Outra correlação inversa observada foi entre *motivacao* e *coleta_seletiva*, indicando que nesse grupo, também existe algum empecilho para se manter motivado com as ações de EA e contribuir com a coleta seletiva, novamente sugerindo alguma dificuldade de entendimentos sobre o fluxo de coleta seletiva vigente na instituição. As variáveis *agua* e *energia* formaram o único grupo de correlação positiva forte entre as variáveis, sinalizando que a contribuição para o consumo consciente de água acompanha o de materiais, sendo consumo a mais expressiva do conjunto geral. Migrando para os Laboratórios de análises e diagnósticos, Figura 4 (C), *motivacao* e *satisfacao* foram relacionadas positivamente indicando que, quando satisfeitos com o programa AmbientAÇÃO, os colaboradores dessa área tendem a estarem motivados. Das contribuições, consumo e *segregacao_residuos* apresentaram correlação máxima, indicando que quando colaboram com a segregação correta de resíduos, também colaboram com o consumo consciente de materiais. Enquanto *consumo* seguido por *agua* foram as mais expressivas, indicando que consumo consciente de materiais e água, respectivamente, apresentam maior índice de participação.

Partindo para os setores puramente administrativos (Planejamento/Finanças e Presidência), quanto ao primeiro, Figura 4 (D), *motivacao* foi a variável de maior expressão da análise, estabelecendo correlação razoável com *satisfacao*. As variáveis de percepção de contribuição apresentaram correlações significativas entre si, sendo *agua* a de maior notabilidade, seguida por *consumo* e *energia*, respectivamente, apontando que a boa contribuição para o consumo consciente de água também é acompanhada pelo consumo consciente de materiais e energia. Por fim, no setor da Presidência, Figura 4 (E), *motivacao* e *satisfacao* obtiveram ambas altas expressões e correlação significativa, repetindo a tendência de outros grupos. As variáveis de percepção de contribuição obtiveram maior dispersão entre si (ou seja, menor conexão). Somente *agua* e *energia* apresentaram correlação altamente positiva, ou seja, contribuições simultâneas entre o consumo consciente de água e energia. Por fim, *energia*, foi a variável de maior expressão, ou seja, de maior percepção de contribuição, seguida por *agua* e *segregacao_residuos*.

Ao serem perguntados sobre quais formatos de conteúdo têm preferência para adquirir conhecimento sobre meio ambiente e sustentabilidade 48.2% responderam que a melhor forma seria palestras com convidados referência na área seguida de programações digitais objetivas como posts, vídeos e e-books com 36.4% e treinamentos de capacitação presenciais com 31.8%.

Em relação às campanhas indicadas pelo Programa AmbientAÇÃO foi solicitado aos respondentes escolher as três opções que consideram as mais importantes e os resultados demonstram que as ações mais importantes foram “Encaminhamento de lacres de latas de alumínio para a compra

de cadeiras de rodas para deficientes” (56,6%), que consiste na venda dos lacres para reciclagem com o valor revertido para a aquisição de cadeiras de rodas, seguida de “Encaminhamento de tampinhas plásticas para arrecadação de recursos para castração de animais de rua” (46.2%) e “Destinação adequada de óleo de cozinha” (45.3%).

Discussão

O Programa AmbientAÇÃO possui um catálogo com diversos modelos de ações de educação ambiental que podem ser implementadas pelas diversas instituições aderentes de acordo com a realidade de cada uma, o que explica alguns dos resultados obtidos neste estudo.

Como reportado na Figura 1, apesar da grande variedade de sua definição, Desenvolvimento Sustentável pode ser compreendido como a estabilidade a longo prazo da economia e do meio ambiente, integrando variáveis econômicas, ambientais e sociais na tomada de decisões (Emas, 2015; Sachs, 2012). Esse conceito vem sendo muito utilizado desde a década de 70 com os movimentos em direção a uma economia mais preocupada com os impactos que as atividades humanas podem causar no ambiente, o que pode indicar a forte associação desse conceito com o tema “Meio ambiente”. Ressalta-se a associação com as palavras “Qualidade de vida” e “Responsabilidade” podem indicar uma evolução no conceito de meio ambiente de modo que este a qualidade de vida das pessoas está diretamente relacionada ao ambiente que as cerca e a responsabilidade com os cuidados a esse ambiente.

Partindo para as variáveis, no contexto da instituição, a variável *segregacao_residuos* é em grande parte das vezes relacionada com o bom gerenciamento de Resíduos Sólidos de Saúde (RSS) seguindo a norma ANVISA RDC 222/18 (Anvisa, 2018). Segundo a resolução, os resíduos dessa categoria podem ser classificados em: Grupo A (resíduos biológicos), Grupo B (resíduos químicos), Grupo C (resíduos radioativos), D (resíduos comuns – não perigosos) e Grupo E (resíduos perfurocortantes). Vale ressaltar, que o treinamento geral por parte da instituição quanto ao bom gerenciamento de RSS acontece anualmente para as lideranças dos setores e trabalhadores interessados, destacando que as lideranças possuem a responsabilidade de treinar seus colaboradores nos resíduos específicos gerados em suas áreas, sendo multiplicadores das informações. Como a instituição possui diversas atividades finalísticas distintas, isso pode explicar algumas das discrepâncias entre as percepções de contribuição de coleta seletiva e segregação correta de resíduos, demonstrada de maneira branda no perfil geral da instituição, e mais intensa no grupo de Estagiários/bolsistas. Um estudo conduzido por Moreschi (2014), que incluiu a participação de discentes da área da saúde, indicou que a percepção da importância quanto à segregação e disposição final dos RSS foi alta entre o grupo. Enquanto outra análise de percepção conduzida por Cavalcante (2015), também entre discentes desse mesmo grupo, indicou que, apesar do elevado conhecimento sobre reciclagem e destinação apropriada dos resíduos sólidos,

suas atuações individuais na área eram bastante insignificantes. Esses contextos podem estar, de certa maneira, sendo reproduzidos na instituição alvo desta pesquisa, principalmente, considerando a maior responsabilidade associada com o manejo de RSS devido a sua periculosidade, o que acaba direcionando os esforços e ações educativas, na maioria das vezes, mais enfatizados para a categoria dos resíduos perigosos (Inhuma, 2021; Do Nascimento, 2019; De Rose Carvalho, 2024). Esse tipo de realidade pode ser um fator impactante para o desempenho das práticas de coleta seletiva, visto que *coleta_seletiva* foi a menor variável na análise geral da instituição. Apesar disso, foi observado um aumento na taxa de reciclagem dos resíduos da instituição entre 2022 (4.62%) e 2023 (6.24%) justamente após o aumento na frequência das ações. Fato que pode indicar que apesar de assimilarem a prática, não compreendem de fato a importância de suas contribuições.

Em relação à variável água, que representa a colaboração para o consumo consciente desse recurso, os resultados gerais da instituição indicaram que ela foi a de maior destaque ainda que a instituição não tenha implementado nenhuma ação catalogada do Programa AmbientAÇÃO. Isso pode indicar que as campanhas de conscientização realizadas em anos anteriores estão estabelecidas de modo que os benefícios se estendem ao longo do tempo. Entretanto, quando analisados os setores separadamente, percebem-se expressões distintas para essa variável. Quando comparados os setores administrativos (Planejamento/ Finanças e Presidência) com os setores produtivos (Produção Farmacêutica), é nítida a maior percepção de cooperação dos participantes do primeiro grupo em relação ao segundo, confirmando a dificuldade de relacionar a contribuição para o consumo consciente de água nos setores produtivos, em especial, no farmacêutico (De Oliveira, 2018; Ávila & De Moraes, 2018). Fato que pode ser revertido a partir do desenvolvimento de ações como: capacitação dos profissionais para melhor manejo dos recursos hídricos, redesenho de processos, adoção de sistemas automáticos de monitoramento, reutilização da água excedente do processo de produção, dentre outros (Giacchetti *et al.*, 2017). Também ocorre uma interpretação semelhante para o caso da variável energia, que ainda que seja a segunda variável de maior expressão na percepção geral, quando analisada nos filtros por setor, a maior expressão de contribuição também se encontra nos setores puramente administrativos. Nos Laboratórios de análises e diagnósticos foi identificada a menor contribuição para essa variável, sendo que o consumo de energia pode chegar a ser de 3 a 4 vezes superior do que as demandas de áreas administrativas, sugerindo uma possível explicação para a dificuldade dos trabalhadores em efetivamente colaborar com a diminuição no gasto energético (Hopkinson *et al.*, 2011; Kaplowitz *et al.*, 2012). Algumas atitudes que podem reverter esse quadro estão associadas a instruções aos colaboradores sobre o uso consciente dos equipamentos, implementação de políticas para aquisição de dispositivos de baixo consumo energético, adoção de sistemas de ventilação eficientes, assim como, a instalação de sensores de temperatura e iluminação automáticos (Lopez *et al.*, 2017).

Em relação a variável consumo, o foco maior foi a percepção dos entrevistados quanto à colaboração para com o consumo consciente de materiais, principalmente nas práticas de redução e/ou reutilização de insumos. Na análise geral da instituição, a variável obteve resultados expressivos, e quando analisados os filtros por vínculo, os funcionários terceirizados obtiveram maior resultado, enquanto o grupo estagiários e bolsistas obtiveram o menor, reforçando então a importância do primeiro grupo para as ações de consumo consciente e economia de produtos na instituição (Da Silva *et al.*, 2015). Quando avaliados por setor, os índices de percepção de colaboração foram maiores nos setores de Planejamento/Finanças e menores nos Laboratórios de Análises e Diagnóstico. Essa discrepância, pode ser resultado das diferentes atividades exercidas por cada área, visto que cada uma possui autonomia para gerenciar seu consumo de materiais. No caso dos setores administrativos, ações como a digitalização de processos, e o encorajamento do fim do uso de copos descartáveis podem ter contribuído para maior percepção de contribuição na redução do consumo de papel e plástico. Porém, no caso dos Laboratórios, o grande volume de materiais descartáveis consumidos durante as análises, pode ter colaborado para a baixa percepção de colaboração dos entrevistados. Apesar da necessidade de garantir a segurança das análises através de materiais estéreis, atitudes como a automatização de análises e a adoção de fornecedores que se comprometam com design de produtos sustentáveis podem possibilitar a redução do consumo de insumos e descartáveis (Santos 2021; Ramos *et al.*, 2023 (a); Ramos *et al.*, 2023 (b)). No caso dos produtos químicos, a revisão de metodologias para o menor uso de reagentes tóxicos e o reuso de reagentes também são atitudes que possibilitam uma cultura de consumo consciente (Lopez *et al.*, 2017; Barbosa *et al.*, 2020). Das atitudes citadas acima, boa parte já é aplicada na instituição, entretanto, os colaboradores podem não considerarem as mesmas efetivas mediante o alto gasto de produtos durante o processo analítico.

Partindo para a variável *motivacao*, a qual mede a percepção da intenção em participar de ações de EA, na percepção geral, a variável performou uma alta expressão, e quando relacionada pelos filtros, obteve forte expressão nos setores administrativos (Planejamento/Finanças e Presidência), significativa nos setores de Produção Farmacêutica e Laboratórios de Análises e Diagnóstico, enquanto baixa no setor de Pesquisa e Desenvolvimento. Isso pode ser relacionado a maior facilidade em participar das ações e perceber seus resultados por parte dos setores administrativos. A baixa motivação do setor de Pesquisa e Desenvolvimento para com questões relativas à EA apresenta-se de forma contrária a aplicação da noção de Desenvolvimento Sustentável – conceito mais relacionado entre os entrevistados — o que pode estar associado com a não relação entre produção científica e EA na concepção dos servidores. Por isso se torna essencial integrar as funções de cada setor com suas responsabilidades ambientais, já que o aumento da motivação está ligado à capacitação, aos modelos de liderança sustentável e aos treinamentos que reforcem a relação entre atividades subjetivas e o meio ambiente (Pinzone *et al.*, 2019; Jerónimo *et al.*, 2020; Graves & Sarkis, 2018). Já em relação ao nível de satisfação com o programa AmbientAÇÃO (representado graficamente por satisfação), este foi de menor influência na percepção geral, assim como nos setores de Produção

Farmacêutica e Laboratórios de Análise e Diagnóstico, e por outro lado, foi maior no setor da Presidência. Também foi observada uma alta satisfação entre os Servidores Contratados e uma baixa entre Estagiários e Bolsistas. É importante ressaltar que a satisfação com o Programa de Educação Ambiental interno pode ser ocasionada pela falta de interesse nas atividades deste e a desconexão entre as ações desenvolvidas com boas práticas de EA na instituição. Outro elemento a considerar é a própria satisfação do trabalhador com o ambiente da instituição e as atividades de consciência ambiental desenvolvidas. Por isso, se torna fundamental o planejamento das ações e a avaliação constante das mesmas — assim como do conhecimento repassado — com a participação dos colaboradores (Amrutha & Geetha, 2021; Abdelhamied *et al.*, 2023).

Conclusões

Com base nos resultados e conclusões deste estudo, constatou-se que a ferramenta de percepção ambiental foi eficaz como metodologia para diagnosticar as contribuições autodeclaradas dos colaboradores da instituição em relação aos principais tópicos abordados nas ações de EA desenvolvidas. Ainda assim, recomenda-se a adaptação de técnicas para melhorar o desempenho das variáveis, aplicadas de forma específica a cada grupo de entrevistados, de modo que cada setor institucional possa reproduzir uma EA e que esteja capacitado para lidar, tanto com questões gerais, quanto específicas de EA em seu trabalho e função. Também é necessário um maior cuidado com os colaboradores de vínculo empregatício mais curto, ou seja, uma vez que estes demonstraram não compreender a prática das ações de EA. Por fim, destaca-se a importância de uma articulação mais consistente entre a frequência e os temas das atividades do programa de EA interno, coordenada pela Gestão Ambiental, visando aumentar o engajamento e a participação dos colaboradores nas ações desenvolvidas.

Referências

- Abdelhamied, H.H., Elbaz, A.M., Al-Romeedy, B.S., Amer, T.M. (2023) Linking green human resource practices and sustainable performance: The mediating role of job satisfaction and green motivation. *Sustainability*, **15**(6), 4835. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/7988/5557https://www.mdpi.com/2071-1050/15/6/4835/pdf>
- ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária (2018) Resolução da Diretoria Colegiada nº 222, de 28 de março de 2018. *Regulamenta as Boas Práticas de Gerenciamento dos Resíduos de Serviços de Saúde e dá outras providências*. Diário Oficial da União. 29 Mar 2018.
- Alcantara, L.A., Silva, M.C.A., Nishijima, T. (2012) Educação ambiental e os sistemas de gestão ambiental no desafio do desenvolvimento sustentável. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, **5**(5), 734-740. <https://doi.org/10.5902/223611704198>
- Alves, C.L.B., Landim, I.M., Pinheiro, V.F., Batista, M.L.B., Rodrigues, A.S. (2022) Percepção ambiental dos trabalhadores das indústrias de cerâmica vermelha do município de Crato (Ce). *Revista Tecnologia e Sociedade*, **18**(52), 69-88. <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v18n52.13838>

- Amrutha, V. N., Geetha, S.N. (2021) Linking organizational green training and voluntary workplace green behavior: Mediating role of green supporting climate and employees' green satisfaction. *Journal of Cleaner Production*, **290**, 125876. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.125876>
- Attrah, M., Elmanadely, A., Akter, D., Rene, E.R. (2022) A review on medical waste management: treatment, recycling, and disposal options. *Environments*, **9**(11), 146. https://doi.org/10.3390/environments9110146?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- Ávila, A.S.N.; Morais, L.A. (2018) Percepção da educação ambiental em uma indústria farmacêutica. *Revista Mirante*, **11**(7), 291-302. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/mirante/article/view/7988/5557>
- Balsalobre-Lorente, D. et al. (2023) Environmental impact of globalization: The case of central and Eastern European emerging economies. *Journal of Environmental Management*, **341**, 118018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118018>
- Barbieri, J.C., Silva, D. (2011) Sustainable development and environmental education: a common trend with many challenges/Desenvolvimento sustentável e educação ambiental: uma trajetória comum com muitos desafios/Desarrollo sostenible y la educación ambiental: una tendencia común con muchos desafíos. *Revista de Administração Mackenzie*, **12**(3), 51-83. <https://doi.org/10.1590/S1678-69712011000300004>
- Barbosa, F.C.L., Mol, M.P.G., Barros, R.T. (2020) Minimizing laboratory waste and improving material reuse through chemical waste exchange: Case of a Brazilian institution. *Waste Management & Research*, **38**(9), 1064-1072. <https://doi.org/10.1177/0734242x20938459>
- Brasil (2012) *Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Ambiental*. Brasília, DF: Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica, MEC/SEB, 2012. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br>
- Brasil (2009) *Política Nacional de Educação Ambiental*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, MMA,. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>
- Carvalho, I.C.M. (2004) *Educação ambiental crítica: nomes e endereçamentos de educação*. In: LAYRARGUES, Philippe Pomier (Coord.) *Identidades da educação ambiental brasileira*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- Carvalho, R.V., Dias, R. (2013) O desenvolvimento de uma cultura ambiental corporativa através da educação ambiental. *Revista em agronegócio e meio ambiente*, **6**(3), 479-496. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/download/2525/2038>
- Cavicchi, C., Vagnoni, E. (2017) Does intellectual capital promote the shift of healthcare organizations towards sustainable development? Evidence from Italy. *Journal of Cleaner Production*, **153**, 275-286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.175>
- Chagas, A.T.R. (2000) O questionário na pesquisa científica. *Administração on line*, **1**(1), 25. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Ensino_2012_1/metodologia_de_questionario.pdf
- Da Silva, D.F., Ayach, L.R. (2021) Análise da percepção ambiental do conselho gestor da unidade de conservação Estrada Parque Piraputanga-MS. *Revista Geografar*, **16**(1), 48-70. <https://doi.org/10.5380/geografar.v16i1.59529>
- Da Silva, K.C., Micaela Sammarco, Y. (2015) Relação Ser Humano e Natureza: Um Desafio Ecológico e Filosófico. *Revista Monografias Ambientais*, **14**(2). <https://doi.org/10.5902/2236130817398>
- Da Silva, P.C.V., Mendes, F.L.S., Kato, R.B. (2015) Consciência ambiental entre funcionários do setor de limpeza de uma Universidade particular de Belém (PA). *Revista Monografias Ambientais*, **14**(1), 88-100. <https://doi.org/10.5902/2236130816703>
- De Almeida, N.B., Mol, M.P.G. (2019) Análise da percepção de servidores de uma instituição pública em relação ao programa de educação ambiental ambientação. *Educação Ambiental em Ação*, **17**(67). Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://www.revistaeea.org/pf.php?idartigo=3610>

- De Lima, L.J., Júnior, J.F.L., Luna, Y.H.D.M., Luna, G.C.D.G. (2018) Desenvolvimento sustentável, sustentabilidade e saúde: uma revisão. *Ciência e Sustentabilidade*, **4**(2), 133-150. <https://doi.org/10.33809/2447-4606.422018133-150>
- De Oliveira Aguiar, A., Ribeiro, C.S., Nascimento, A.P.B. (2018) Percepção Ambiental de Trabalhadores em Empresa Certificada ISO 14001: práticas e comportamentos. *Desenvolvimento em Questão*, **16**(45), 316-335. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2018.45.316-335>
- De Rose Carvalho, J., Freire, A.S., Farias, S.G., Barreto, A.S.A.P., Marinho, D.T.S., Reis, M.O., Andrade, F.C.R., Machado, L.M.C., Da Silva, A.J.R., Azevedo, A.P. (2024) Gestão ambiental na saúde pública: conhecimento sobre gerenciamento de resíduos sólidos de serviços de saúde. *Brazilian Journal of Health Review*, **7**(1), 1716-1727.
- Dias, G.F. (2006) *Educação e gestão ambiental*. São Paulo: Gaia. <https://doi.org/10.34119/bjhrv7n1-132>
- Do Nascimento, T.F. (2019) *Descarte de resíduos de saúde em um hospital de Belo Horizonte: conscientização e sensibilização dos profissionais da assistência no plantão noturno*. Monografia de especialização. Universidade Federal de Minas Gerais. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/cf738657-bc5c-4b4a-a0b8-a63e80269556>
- Emas, R. (2015) The concept of sustainable development: definition and defining principles. *Brief for GSDR*, (2015), 10-13140. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34980.22404>
- Fracalanza, H., Amaral, I.A., Medig Neto, J., Eberlin, T.S. (2013) A educação ambiental no Brasil: panorama inicial da produção acadêmica. *Ciências em Foco*, Campinas, SP, **1**(1). Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://econtents.sbu.unicamp.br/inpec/index.php/cef/article/view/9162>
- Giacchetti, M.C.M., De Oliveira, A., Côrtes, P.L. (2017) Consumo de água em indústrias: Enfrentando a escassez. *Revista Espacios*, **38**(22). Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n22/17382221.html>
- Goel, A., Iyer-Raniga, U., Jain, S., Addya, A., Srivastava, S., Pandey, R., Rath, S. (2023) Student Perceptions of Environmental Education in India. *Sustainability*, **15**(21), 15346. <https://doi.org/10.3390/su152115346>
- Graves, L.M., Sarkis, J. (2018) The role of employees' leadership perceptions, values, and motivation in employees' pro environmental behaviors. *Journal of Cleaner Production*, **196**, 576-587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.013>
- Guedes Junior, V.L. (2019) *Comunidades virtuais na formação continuada de educadores ambientais*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/48/48135/tde-18122019-112953/pt-br.php>
- Guimarães, L.F.V., Melo, I.B.N., Fortunato, I. (2018) Percepção ambiental e programa de gestão ambiental pública: o caso do Instituto Biológico. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **7**(3), 741-754. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e32018741-754>
- Hongyu, K., Sandanielo, V.L.M., Junior, G.J. (2016) Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S Engineering and science*, **5**(1), 83-90. <https://doi.org/10.18607/ES201653398>
- Hopkinson, L. et al. (2011) *Energy consumption of university laboratories: detailed results from S-Lab audits*. Bradford: S-Lab, My Green Lab. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <https://mygreenlab.org/wp-content/uploads/2025/07/ie - energy consumption of univeristy laboratories - s-labs.pdf>
- Inhuma, Y.G., Guimarães, G.A., Kuwano, R.T., Batista, M.M. (2021) Segregação dos resíduos de serviço de saúde: Educação Ambiental em um hospital público do município de Itacoatiara (AM). *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, **16**(5), 217-232. <https://doi.org/10.34024/revbea.2021.v16.11595>
- Jerónimo, H.M., Henriques, P.L., Lacerda, T.C., Silva, F.P., Vieira, P.R. (2020) Going green and sustainable: The influence of green HR practices on the organizational rationale for sustainability. *Journal of Business Research*, **112**, 413-421. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.11.036>
- Johnson, R., Wichern, D. (2002) *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 5th. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Kaplowitz, M.D., Thorp, L., Coleman, K., Yeboah, F.K. (2012) Energy conservation attitudes, knowledge, and behaviors in science laboratories. *Energy Policy*, **50**, 581-591. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.060>

- Khan, S., Yahong, W., Chandio, A.A. How does economic complexity affect ecological footprint in G-7 economies: the role of renewable and non-renewable energy consumptions and testing EKC hypothesis. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(31), 47647-47660. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19094-1>
- Lara, R.D., Rodrigues, G.L., Veiga, R.T., Gosling, M.S. (2015) Avaliação de Programas de Marketing Social. Uma análise dos instrumentos utilizados para avaliação do Programa Ambientação do Governo do Estado de Minas Gerais. *Desenvolvimento em Questão*, **13**(29), 191-224. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2015.29.191-224>
- Lopez, J.B., Jackson, D., Gammie, A., Badrick, T. (2017) Reducing the environmental impact of clinical laboratories. *The Clinical Biochemist Reviews*, **38**(1), 3-11. Acesso em: 14 nov.2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5548370>
- Moreschi, C., Rempel, C., Backes, D.S., Carreno, I., Siqueira, D.F., Marina, B. (2014) A importância dos resíduos de serviços de saúde para docentes, discentes e egressos da área da saúde. *Revista Gaúcha de Enfermagem*, **35**, 20-26. <https://doi.org/10.1590/1983-1447.2014.02.43998>
- Oliveira, L.C., Pereira, J., Barreto, I., Cavalcante, A., Guenther, M. (2015) Percepção e atuação dos estudantes universitários da área da saúde em relação à gestão de resíduos sólidos: um estudo de caso na universidade de Pernambuco, Recife/PE. *Pesquisa em Educação Ambiental*, **10**(2), 130-143. <https://doi.org/10.18675/2177-580X.vol10.n1.p130-143>
- Palma, I.R. (2005) *Análise da percepção ambiental como instrumento ao planejamento da educação ambiental*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Acesso em 14 nov. 2024. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7708>
- Pinzone, M., Guerci, M., Lettieri, E., Huisingh, D. (2019) Effects of 'green' training on pro-environmental behaviors and job satisfaction: Evidence from the Italian healthcare sector. *Journal of Cleaner Production*, **226**, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.048>
- Ramos, T., Christensen, T.B., Oturai, N., Syberg, K. (2023) Reducing plastic in the operating theatre: Towards a more circular economy for medical products and packaging. *Journal of Cleaner Production*, **383**, 135379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135379>
- Ramos, T.M., Christensen, T.B., Bour, A., Almroth, B.C., Kristensen, D.M., Selck, H., Syberg, K. (2023) A not so circular healthcare economy: A review of challenges with plastic associated chemicals. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117191. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117191>
- Sachs, J.D. (2012) From millennium development goals to sustainable development goals. *The Lancet*, **379**(9832), 2206-2211. [https://psycnet.apa.org/doi/10.1016/S0140-6736\(12\)60685-0](https://psycnet.apa.org/doi/10.1016/S0140-6736(12)60685-0)
- Sales, T.B., Cantarino, A. (2020) *Educação ambiental empresarial como ferramenta na gestão ambiental*. In: Anais do Congresso Nacional em Excelência em Gestão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2011.
- Salviano, M.C.M., Almeida, E.A., Souza, M.F., Medeiros, P.I.S., D'Oliveira, R.G. Percepção ambiental de grupos sociais sobre a Agenda Ambiental na Administração Pública (A3P) em uma instituição de ensino superior, no Nordeste do Brasil. *Brazilian Journal of Development*, **6**(8), 59397-59411. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-382>
- Sánchez, L.E. (2020) *Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos*. Editora Oficina de textos. São Paulo/SP, Brasil. 3ª ed.
- Santos, A.S.R. (2021) Redução do consumo e custo dos insumos com automatização da máquina de bioquímica em um laboratório de análises clínicas. *Revista Científica Multidisciplinar*, **2**(10), e210904-e210904. <https://doi.org/10.47820/recima21.v2i10.904>
- Santos, L.M.B. et al. (2018) *Análise de componentes principais no estudo do IPCA-15*. Monografia de Graduação. Universidade Federal de Uberlândia. Acesso: 14, nov.2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/23957/1/AnaliseComponentesPrincipais.pdf>
- Santos, G.R.; Tolentino, J. Mol, M.P.G. (2020) Percepção de funcionários em uma instituição pública acerca da gestão de resíduos sólidos e dos seus riscos à saúde humana. *Pesquisa em Educação Ambiental*, **15**(2), 100-113. <https://doi.org/10.18675/2177-580X.2020-14227>

- Sarlet, I.W., Machado, P.A.L.eme, Fensterseifer, T. (2017) *Constituição e legislação ambiental comentadas*. Saraiva Educação SA
- Scotto, G.; Carvalho, I.C.M, Guimarães, L.B. (2009) *Desenvolvimento sustentável*. 4 ed. Petrópolis: Vozes.
- Silveira, D. P., Lorenzetti, L. (2021) Estado da arte sobre a educação ambiental crítica no Encontro Pesquisa em Educação Ambiental. *Praxis & Saber*, **12**(28), 88-102.
<https://doi.org/10.19053/22160159.v12.n28.2021.11609>
- Simsar, A. (2021) Young children's ecological footprint awareness and environmental attitudes in Turkey. *Child Indicators Research*, **14**(4), 1387-1413. <https://doi.org/10.1007/s12187-021-09810-7>

La Revista AIDIS Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica agradece a los siguientes revisores su valioso apoyo en el proceso de evaluación 2025 (1 de diciembre de 2024 al 1 de diciembre de 2025):

Adriano Luiz Tonetti, Brasil	Julio Cesar Bizarreta Ortega, Brasil
Alejandro Vargas Casillas, México	Karol Karla García Aguirre, México
Alex Ovando, Brasil	Leonardo Romero Monteiro, Brasil
Armando Borges de Castilhos Junior, Brasil	Leonardo Silveira Conke, Brasil
Camila Ribeiro Rodrigues, Brasil	Leonor Patricia Güereca Hernández, México
Carlos Gutiérrez Ojeda, México	Lidia Rangel Blanco, México
Constantino Gutiérrez Palacios, México	Livia Ferreira Santana, Brasil
Cynthia Fantoni Alves Ferreira, Brasil	Luis Manuel Martínez Rivera, México
Daniela Lima Machado da Silva, Brasil	Marcelo Zaiat, Brasil
Danielma Silva Maia, Brasil	María Neftalí Rojas Valencia, México
Denise Soares, México	Maurício Alves da Motta Sobrinho, Brasil
Diógenes Antonio Hernandez Espinoza, Chile	Miriam de Fátima Carvalho Machado, Brasil
Edgar Omar Rueda Puente, México	Naiara Angelo Gomes, Brasil
Emanuel Júnior Silva Soares, Brasil	Neyson Martins Mendonça, Brasil
Erandi Amor Castillo Perez, México	Osvaldo Frutos, Paraguay
Eric Pascal Houbron, México	Quetzalcoatl Cruz Hernández Escobedo, México
Fabián Robles Martínez, México	Ranyere do Nascimento Lôbo, Brasil
Fábio Ribeiro de Oliveira, Brasil	Raphael Corrêa Medeiros, Brasil
Farith Gonzalez Martinez, Colombia	Renata Mendes Luna, Brasil
Fernando Carlos Raffo, Argentina	Ricardo Antonio Álvarez Carmona, Brasil
Franciane Andreza Veloso dos Santos Gonçalves, Brasil	Ricardo Ferreira Caros de Amorim, Brasil
Francisca Nara da Conceição Moreira, Brasil	Rinaldo dos Santos Araújo, Brasil
Francisco Humberto de Carvalho Junior, Brasil	Rodrigo Bordignon, Brasil
Francisco J. Cervantes, México	Rolando Chamy Maggi, Chile
Gabriella Laura Peixoto Botelho, Brasil	Rubén Hugo Ponce, Argentina
Girlene Figueiredo Maciel, Brasil,	Simone Rosa da Silva, Brasil
Giulliano Guimarães Silva, Brasil	Tasnim Chargui, Reino Unido
João José Hiluy Filho, Brasil	Valéria Cristina Palmeira Zago, Brasil
José Juan González Márquez, México	Virginia Montiel Corona, México
Juan Gabriel García Maldonado, México	