

REVISTA AIDIS



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.2024.17.3>

Vol. 17, No. 3
Diciembre 2024

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 Sao 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. 17, No. 3

Sección editorial. Información del número

Información legal y directorio

English abstracts

Lista de Revisores 2024

Artículos completos

- Oxidative degradation by Fenton's Method for ten pharmaceutical drugs largely used in a Brazilian City**
Taís Fonte Boa, Larissa Ribeiro Lima Santos, Olívia M. S. Ribeiro Vasconcelos,
Carolina Paula de Souza Moreira, Sérgia Maria Magalhães Starling,
Luiz Carlos Moutinho Patata, Marcos Paulo Gomes Mol 535-564
- Avaliação bibliométrica para a remoção de fósforo presente no esgoto sanitário através da precipitação química utilizando a escória de aço como fonte alternativa de cálcio e magnésio**
Bibliometric evaluation for the removal of phosphorus present in sanitary sewage through chemical precipitation using steel slag as an alternative source of calcium and magnesium
Janaina Simoes Lima, Renata Estevam, Ricardo Franci Gonçalves 565-586
- As contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável: uma revisão bibliográfica**
The contributions of recycling to sustainable development: a bibliographic review
Janaína Aparecida Cezário, Maxsuel Bezerra do Nascimento, Laércio Leal dos Santos,
William de Paiva 587-596
- Regulação de serviços de saneamento: avanços, necessidades de melhoria e oportunidades em municípios de pequeno porte no Estado do Maranhão**
Regulation of sanitation services: advances, improvement needs and opportunities in small municipalities in the State of Maranhão
Joel Carlos Zukowski Junior, Demétrius Jung Gonzalez, André Pereira Raposo,
Rhaifran Roberth Queiroz de Lemos 597-611
- Avaliação da aplicação de um biorreator a membrana em bateladas sequenciais no tratamento de esgoto doméstico**
Evaluation of the application of a membrane bioreactor in sequential batches in the treatment of domestic sewage
Guilherme Gavlak, Carlos Raphael Pedroso, Gabriele Monique de Andrade Setnarski,
Lucas Eduardo Müller, Andressa de Andrade 612-626

6. **The practice of COIL (Collaborative Online International Learning) in Brazil: a case study on the practice of sustainable development in the academic environment**
Gilson Lima da Silva, Katherine Copp Brown, Cássia Gisele Dias Porto,
José Floro de Arruda Neto 627-648
7. **Energy, environmental and financial evaluation of progressive cavity pumps with rotors produced from different materials**
Marcelo Angelo Taparello de Souza, Walter Andrey Fontana, Carlos Alberto Mendes Moraes 649-673
8. **Social Life Cycle Assessment in Waste Pickers Associations using primary and secondary data**
Flavio Vassallo Mattos, João Luiz Calmon, José Carlos Martins Ramalho 674-687
9. **Percepção sobre a qualidade do serviço de água potável no Município de Tucuruí – PA, Brasil: das condições de oferta**
Perception of the quality of drinking water service in Tucuruí – PA, Brazil: offer conditions
Pedro Henrique Silva de Sousa, Augusto da Game Rego, Allan Jamesson Silva de Jesus 688-703
10. **Resíduos sólidos em um campus universitário da Amazônia Oriental: composição gravimétrica e percepção dos discentes**
Solid waste on a university campus in the Eastern Amazon: gravimetric composition and students' perception
Leidiane Gonçalves Tavares, Thaisa Pegoraro Comassetto 704-722
11. **Avaliação do ciclo de vida da produção de combustível derivado de resíduos urbanos utilizados no coprocessamento em fornos de cimento**
Assessment of the life cycle of production of refuse derived fuel urban waste used in co-processing in cement furnaces
Flávio Leôncio Guedes, José Fernando Thomé Jucá, Soraya Giovanetti El-Deir 723-740
12. **Vigilância da qualidade da água tratada usando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) no Município de Belém, Pará, Brasil**
Surveillance of treated water quality using the Geographic Information System (GIS) in the Municipality of Belém, Pará, Brazil
Fábio Sérgio Lima Brito, Karoline da Costa Barros, Claudinei Rodrigues de Aguiar 741-762
13. **Análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Guanambi-BA**
Analysis of the gravimetric composition of urban solid waste from the City of Guanambi-BA
Thomas Leonardo Marques de Castro Leal, Thaynara Lorraine de Oliveira,
Luísa Magalhães Araújo 763-779



14. **Efeito da sazonalidade na qualidade da água do Açude Taquara, Ceará, Brasil**
Seasonality effect on water quality in the Taquara Reservoir, Ceará, Brazil
Brenda de Assis Ferreira Carvalho, Waleska Martins Eloi, Deborah Mithya Barros Alexandre,
Maria Thereza Rocha Chaves, Jacques Carvalho Ribeiro Filho 780-798

15. **Análise evolutiva e comparativa do uso e cobertura do solo para auxiliar no cadastro ambiental rural no Município de São Félix do Xingu – PA**
Evolutionary and comparative analysis of land use and cover to assist in the rural environmental registration in the Municipality of São Félix Do Xingu – PA
Raisa Rodrigues Neves, Thayson Assunção da Silva de Freitas,
Vanessa de Nazaré Cunha Lopes, Flávia Sales Velasco, Renato Augusto Soares Rodrigues 799-828

REVISTA AIDIS

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

OXIDATIVE DEGRADATION BY FENTON'S METHOD FOR TEN PHARMACEUTICAL DRUGS LARGELY USED IN A BRAZILIAN CITY

Taís Fonte Boa¹
Larissa Ribeiro Lima Santos¹
Olívia M. S. Ribeiro Vasconcelos¹
Carolina Paula de Souza Moreira¹
Sérgia Maria Magalhães Starling²
Luiz Carlos Moutinho Pataca¹
* Marcos Paulo Gomes Mol¹

Recibido el 2 de agosto de 2023. Aceptado el 15 de diciembre de 2023

Abstract

Medicines have been recently recognized as one of the emerging contaminants in the environment. These are discharged after therapeutic use through human excretion or irregular discharges. Effluent containing high concentrations of drugs discharged from production facilities is also a cause of concern to nearby aquatic bodies. There is an increased interest in their removal due to environmental and public health problems related. Some drugs are resistant to conventional methods of liquid effluent treatment, and there is a risk of negative impacts in humans and animals if exposed repeatedly to the same medicines for prolonged periods. To date, the potential human, animal, and ecological risks associated with the discharge of these compounds to the environment and the potential techniques for liquid effluent degradation demand to be well discussed. Fenton degradation process represents one possibility of pharmaceutical removal of liquid effluents, as presented by the scientific literature. Therefore, this study presents a brief summary on Fenton degradation studies of ten of the most used drugs in city of Belo Horizonte, the capital of the state of Minas Gerais, Brazil. The result of the literature search about the studies of oxidative degradation of the drugs resulted in 45 articles found, applied to 6 drugs among the 10 most frequently used in Belo Horizonte. The needs regarding removal, disposal, and treatment of drugs represent an important challenge in environmental management.

Keywords: liquid effluent, Fenton process, medicines degradation, Brazil.

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

² Departamento de Farmácia Social, Escola de Farmácia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 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

Introduction

The use and disposal of chemicals used in medicine, industry, agriculture, and residences has led to the spread of organic pollutants in the environment (Rehrl *et al.* 2020; Sousa *et al.* 2018; Bernhardt *et al.* 2017). Among the pollutants, pharmaceuticals have become a focus on environmental research, because they are a diverse class of biologically active molecules with application to humans and veterinary. Their effects may have an impact on other species unduly exposed to them.

The great use of drugs by the population and in the health-care sector generates excretion of mixtures of substances in unchanged form and their metabolites. When they reach the environment, they can trigger direct harmful effects as the possibility of bioaccumulation in the different trophic levels exposed (Golovko *et al.* 2020; López-Pacheco *et al.* 2019; Minguez *et al.* 2016). The complexity of these compounds hinders the adoption of specific regulations in relation to drugs and metabolites in environmental compartments, with emphasis on the aquatic environment.

Conventional wastewater treatments have shown limited efficiency in removing or degrading these pollutants leading to contamination of surface water and, eventually, groundwater (Bottero-Coy *et al.* 2018; Biel-Maeso *et al.* 2018; Azima *et al.* 2019; Tete *et al.* 2020; Golovko *et al.* 2020). The most consumed drug classes in the world are antibiotics, analgesics, anti-inflammatories, lipid regulators, antidepressants, chemotherapeutic agents, and hormones stand out. The concentration of drugs found in aquatic environments can vary from ng.L^{-1} to $\mu\text{g.L}^{-1}$ and is directly related to the population's drug consumption pattern. The persistence and concentration of drugs after treatment mainly depends on the wastewater treatment plant (WTP) removal rate, seasonality of the weather and socioeconomic conditions, which is associated with access to drugs (Sjerps *et al.* 2017; Azzouz and Ballesteros 2013; Melo *et al.* 2009). In Brazil, sewage treatment is still partial and analysis of the presence of drugs in effluents are not routinely implemented.

Conventional sewage treatments by biological and physical-chemical processes are the most used in Brazil. These processes have as advantages the high rates of organic matter removal and relative low costs (Melo *et al.* 2009; Queiroz *et al.* 2012; Brant *et al.* 2013). The drugs, focused in this study, have recalcitrant characteristics, and their removal rates are directly related to the structural characteristics and physicochemical properties of the molecule, as well as biodegradability, photo-stability, and lipophilicity (Picó and Barceló 2015; Minguez *et al.* 2016).

There are several studies indicating the detection of pharmaceutical residues in wastewater and water bodies in different Brazilian locations (Américo *et al.* 2017; Américo-Pinheiro *et al.* 2017; Becker *et al.* 2020; Beretta *et al.* 2014; Boger *et al.* 2021, Caldas *et al.* 2019, Campanha *et al.* 2015, Chaves *et al.* 2020, Da Silva *et al.* 2020; de Sousa *et al.* 2014; Ferreira *et al.* 2014; Gonçalves *et al.* 2017; Lopes *et al.* 2016, Machado *et al.* 2020, Machado *et al.* 2016; Montagner and Jardim 2011,

Monteiro *et al.* 2016). These studies showed that drug residues and their metabolites have been found in Brazilian water bodies as well as in drinking water, which may be associated with the limitations of sanitary conditions and the inefficiency of conventional WTP to eliminate these substances.

Drug residues were found in Minas Gerais, a Brazilian state (Figure 1), in the waters of the Doce River (Alvim *et al.* 2020; Foureaux *et al.* 2019), the Velhas River (Moreira *et al.* 2011), the Paraopeba River basin (Barros *et al.* 2018), drinking water supply reservoirs (Reis *et al.* 2019), and wastewater from WTPs (Brant *et al.* 2013; Moreira *et al.* 2011).

The presence of pharmaceuticals in water bodies that receive effluents from WTPs emphasizes the need for studies, in addition to conventional effluent treatments in order to increase the protection of the aquatic ecosystem, minimizing potential damage caused by organic pollutants (Campanha *et al.* 2015; Veras *et al.* 2019; Beretta *et al.* 2014; Moreira *et al.* 2011; Barros *et al.* 2018; Caldas *et al.* 2013; Ferreira 2013, Froehner *et al.* 2011; Monteiro *et al.* 2016; Pivetta and Gastaldini 2019).

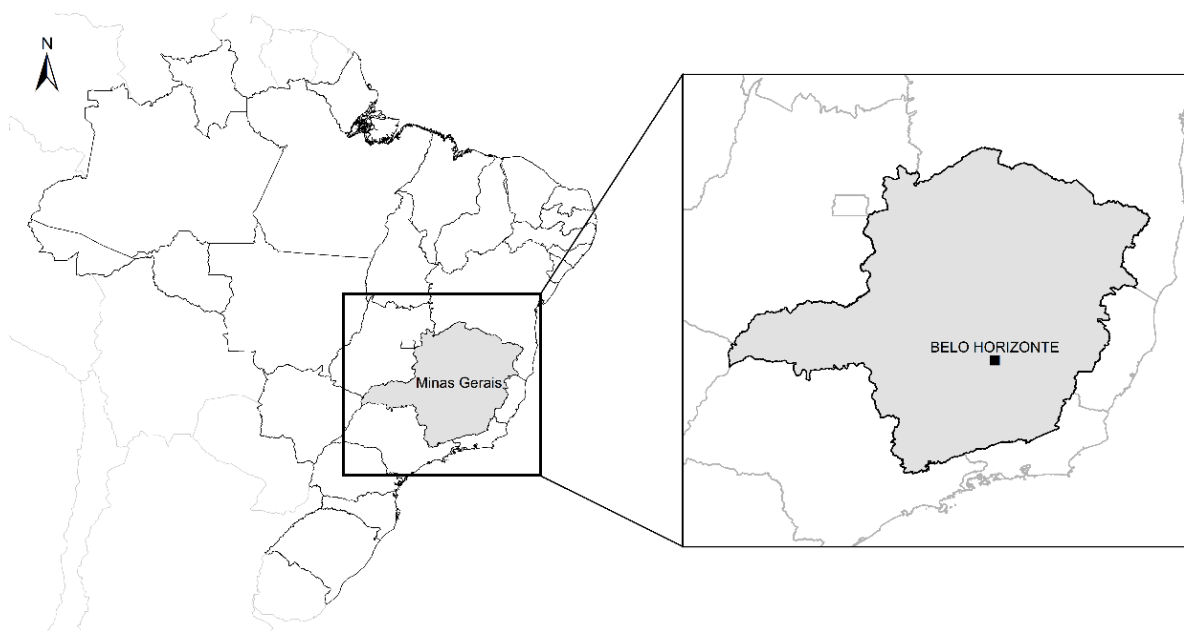


Figure 1. Brazilian map showing Minas Gerais state and Belo Horizonte city, in detail.

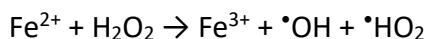
When discussing the environmental presence of pharmaceuticals, international organizations presented have introduced legislation and guidelines to ensure that drug levels in water bodies remain within acceptable limits. In Europe, for instance, the European Commission (EC) has implemented a method known as environmental risk assessment. This method is designed to comprehend potential impact of new drugs on the environment before commencing pharmaceutical production (Commission, 2020). It is a crucial strategy to incorporate information about the ecotoxicity of medicines in the environment and establish reduction goals for these substances (Khasawneh and Palaniandy, 2021). In Brazil, specific legislation regarding pharmaceutical compounds in wastewater is current lacking. However, some states are introducing an for an ecotoxicology parameter assessment before discharging into water body (Starling *et al* 2019). This can be considered an indirect strategy to monitor drugs and other recalcitrant substances in the environment.

Advanced oxidation processes (AOPs) have been used for degradation of various pollutants and the reduction of the total organic load (Seibert *et al.* 2020, Mackulak *et al.* 2015, Napoleão *et al.* 2015). AOPs are defined as processes based on the formation of hydroxyl radical, highly oxidizing with high chemical reactivity. The interaction of hydroxyl radical (HO.) with organic matter promotes a chain reaction leading to degradation of a wide range of substances (Melo *et al.*, 2009).

Variations were introduced in the Fenton process, seeking to increase its efficiency. Ultraviolet (UV) radiation can be used to initiate the generation of hydroxyl radical, being called photo-Fenton. To degrade oxytetracycline Barbosa and Machion (2014) applied the method, which resulted in 82% removal of this antibiotic. By the same process Velasquez *et al* (2014) degraded, in 8 min, 90% sulfathiazole, and Monteiro *et al* (2018) managed to reduce nimesulide by 89.7% and 93.4% of ibuprofen using photo-Fenton. In the study with liquid effluents the degradation of the drugs was between 71.9% and 100% (Napoleon *et al.*, 2018).

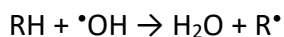
According to Giannakis *et al.* (2017) the application of AOP's to effluents leads to a gain in the final quality of the removal processes. The authors report that the application of Fenton and Photo-Fenton to raw effluents results in high removal of bacteria, with suppression of their growth, inactivation of viruses and yeasts. In addition, it promotes the breakdown of molecules of various contaminants, some of which are refractory to the biological process.

The use of Fenton's reagent allows the removal of recalcitrant compounds in water and effluents, and in soils. It is formed by hydrogen peroxide and iron(II) ions or others transition metals, and its catalytic and oxidative action generates highly reactive and non-selective hydroxyl radicals (Equation 1):



Equation 1

The ferrous ion (Fe^{2+}) initiates and catalyzes the decomposition of H_2O_2 , which leads to the formation of hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$). These radicals can oxidize organic compounds by abstraction of protons, forming organic radicals ($\text{R}\cdot$) (Equation 2):



Equation 2

The Fenton reaction offers several advantages, notably the swift and non-selective destruction or degradation of contaminants. It is well-suited for the treatment of biological effluents, including those derived from both aerobic and anaerobic processes. On the other hand, the Fenton reaction comes with certain drawbacks. The associated costs and the safety considerations in handling hydrogen peroxide are noteworthy challenges. Additionally, the neutralization of effluents results in the formation of ferric sludge, necessitating careful planning for its final disposal. This aspect underscores the importance of addressing both economic and environmental considerations when contemplating the application of the Fenton reaction in wastewater treatment strategies. Therefore, this work aims to carry out a literature review about the application of Fenton's method and its variations for the removal of ten widely consumed drugs in a large Brazilian city.

Metodology

The literature review was performed using the Google Scholar online database, Web of Science, Pubmed, and SciFinder platforms. The following keywords were used for the search: omeprazole, hydrochlorothiazide, captopril, acetylsalicylic acid, aspirin, losartan, furosemide, simvastatin, atenolol, enalapril and ibuprofen. All keywords were searched using the algorithm “drug name” AND (“Fenton Process” OR “Fenton Reagent”). The subject descriptors used to search for articles included: hydroxyl radicals, elimination in water matrices, degradation of emerging contaminants, combined in different ways with the keywords. The review was expanded by searching the bibliographic references of relevant studies and requesting studies not available to the authors.

The articles surveyed covered the period from 2008 to 2019. Specifically for the drug ibuprofen, the searches were directed to the years 2018 and 2019, since in the evaluated period a total of 1910 articles were published involving this drug. References cited in the articles selected in this review were also included, when relevant to the topic.

Results and discussion

Most consumed drugs in Belo Horizonte/Brazil

The impact of pollutants on the aquatic ecosystem is related to the intrinsic toxicity of these contaminants, and their physical-chemical properties. These properties determine stability, persistence, and bioavailability for aquatic organisms. Thus, liposoluble substances tend to

accumulate more in sediments, while those that are more soluble in water tend to remain in the liquid phase as well as be leached, more easily, from slurry or sediments. Table 1 shows some properties of the most consumed drugs in Belo Horizonte.

The number of drugs listed in Table 1 refers to the distribution by the Unified Health System (SUS), which is the Brazilian public health system and serves more than 190 million people (MS, 2022). These drugs are also distributed by other government programs (Popular Pharmacy Program of Brazil, 2022) and can also be purchased directly from pharmacies. As used for the treatment of diseases of high prevalence in the population, this number of units consumed is certainly undersized. Among the most consumed drugs in Belo Horizonte, three are among the main generic drugs of continuous use in Brazil in 2018, according to ANVISA: captopril, atenolol, and losartan.

The toxicity classification for chemicals utilizes EC_{50} values: $< 1 \text{ mg. L}^{-1}$, $1 \text{ a } 10 \text{ mg. L}^{-1}$; $10 \text{ a } 100 \text{ mg. L}^{-1}$; and $> 100 \text{ mg. L}^{-1}$ to define as very toxic, toxic, harmful and non-harmful to aquatic organisms. In a study by Jacob *et al.* (2020), omeprazole exhibited a very toxic classification, while simvastatin was deemed harmful. Atenolol underwent testing with *D. magna* ($EC_{50} - 48\text{H}$), *P. subcapitata* ($EC_{50} - 72\text{H}$), and *A. salina* ($EC_{50} - 48\text{H}$) and exhibited no toxicity, as reported by Minguez *et al.* (2016).

Table 1. Most consumed drugs in Belo Horizonte (reference year 2016)

Drug ^a	Quantity (10 ⁶ units)	Formula	Therapeutic class ^b	Solubility in water at 25 °C (mg.L ⁻¹) ^c
Omeprazole	555	C ₁₇ H ₁₉ N ₃ O ₃ S	anti-ulcer	82.3
Hydrochlorothiazide	492	C ₇ H ₈ ClN ₃ O ₄ S ₂	diuretic, antihypertensive	722
Captopril	383	C ₉ H ₁₅ NO ₃ S	antihypertensive	1.9 10 ⁵
Acetylsalicylic acid	294	C ₉ H ₈ O ₄	analgesic	3.33
Losartan	222	C ₂₂ H ₂₃ ClN ₆ O	antihypertensive	8.22
Furosemide	218	C ₁₂ H ₁₀ ClN ₂ O ₅ S	diuretic	73.1
Simvastatin	208	C ₂₅ H ₃₈ O ₅	antilipemic	7.17 10 ⁻⁸
Atenolol	192	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O ₃	antihypertensive	1.9 10 ⁴
Enalapril maleate	168	C ₂₀ H ₂₈ N ₂ O ₅	antihypertensive	1.64 10 ⁸
Ibuprofen	163	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	non-steroidal anti-inflammatory	21

^(a)All drugs in tablet form; ^(b)Classification according to National Health Surveillance Agency electronic data sheet; ^(c)After being metabolized in the human body, the metabolite may present different solubilization.

Source: Belo Horizonte Municipal Health Department, 2016

The acute toxicity assay involving atenolol and three metabolites, conducted with three different organisms, demonstrated no toxic effect in the presence of atenolol and TP267 (atenolol acid). However, metabolites TP167 (1-amino-3-phenoxy-2-propanol) and TP117 (1-isopropylamino-2-propanol) caused harmful toxicity in daphnia and green algae, as demonstrated by Yi (2020). Toxicity tests for ibuprofen indicated toxicity to *V. fischeri* with EC_{50} of 14.97 mg.L^{-1} and *D. magna* with an EC_{50} of 50.07 mg.L^{-1} , as reported by Grabarczyk *et al.* (2020).

Literature review results

The result of the literature search about the studies of oxidative degradation of the drugs presented in Table 1 resulted in 45 articles found, as shown in Figure 2.

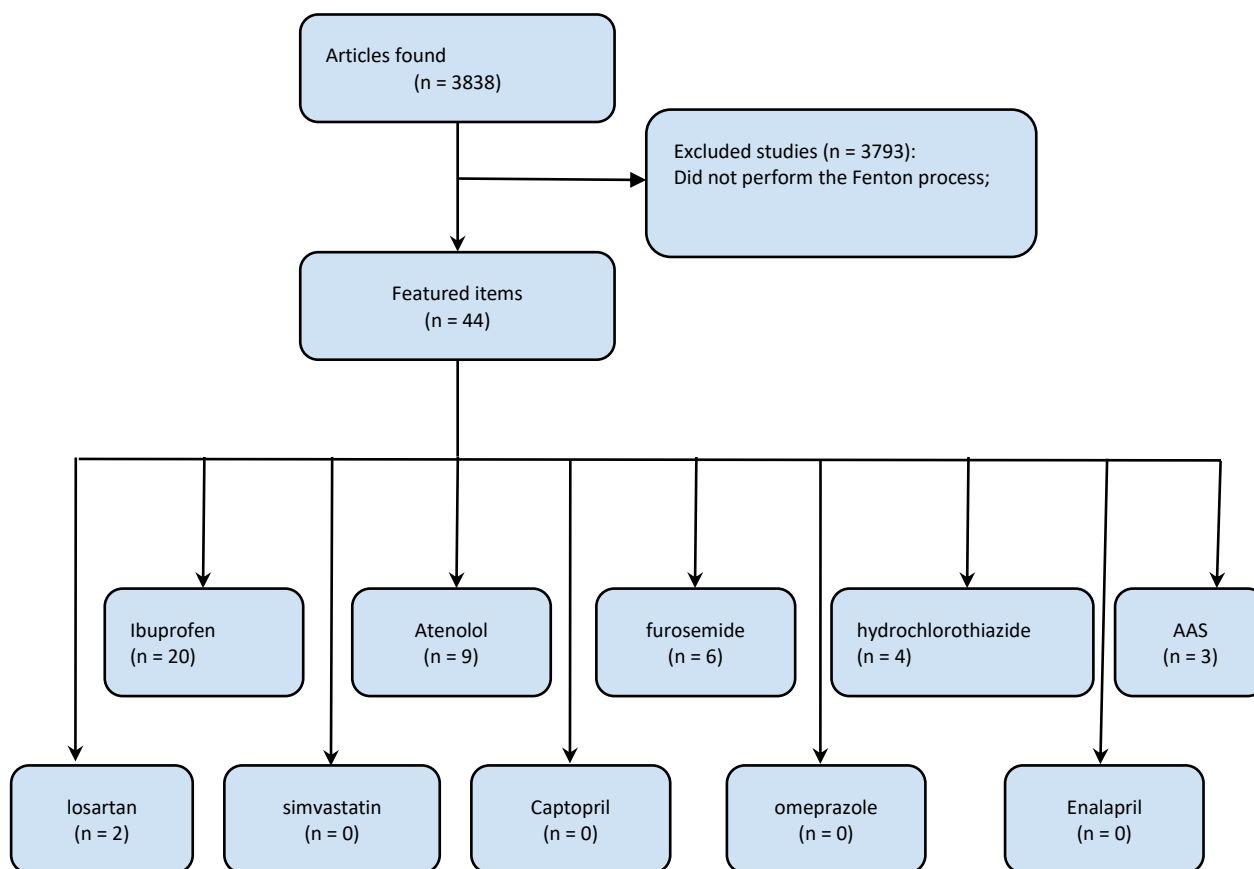


Figure 2. Flowchart of the article inclusion process.

Among the drugs selected in this study, atenolol (ATE) is an antihypertensive of the β -blocker class that has been detected in both WWTPs and rivers, often at higher concentrations than other antihypertensive drugs. ATE has low bioavailability in the human body, and 50% of the administered dose is not absorbed, being excreted unchanged. In the environment ATE has mobility and bioavailability (Maszkowska *et al.* 2014, Alder *et al.*, 2010). In a study conducted by Roberts *et al.* (2016) the presence of ATE was observed at different stages of the largest sewage treatment system in Australia and in receiving bodies of this WWTP, reaching a concentration of $300 \mu\text{g.L}^{-1}$. ATE contamination was also reported in river waters in Switzerland ($83 \mu\text{g.L}^{-1}$) and in its effluents ($2290 \mu\text{g.L}^{-1}$) (Alder *et al.*, 2010). In Brazil, in a study conducted by Sousa *et al.* (2014) in the Piraí and Jundiá rivers (São Paulo state), ATE was detected in 43% and 100% of the samples collected, respectively (Sousa, *et al.*, 2014).

To improve absorption some drugs are administered as a prodrug, that is a biologically inactive compound which can be converted into the active substance in the gastrointestinal or intracellular tract. In these cases, these are in the environment in the active form, post metabolization. This is the case of omeprazole, which is administered as a prodrug, being converted into the active metabolite in the acidic pH of the stomach. In this way it is eliminated in the environment as an active metabolite, and not in the full form in which it is administered (Hernando *et al.*, 2007). Omeprazole is rarely found in sanitary effluents, while its metabolites have been identified both in urine and in sanitary effluents and surface waters. Boix *et al.* (2016) analyzed 30 samples of effluents from WWTP in 10 Italian cities, identifying 6 metabolites of omeprazole, four of them present in more than 70% in the samples.

The determination of losartan (LOS) in effluents has few studies in relation to water environments. In one study, conducted in the USA, the concentrations of LOS found were $200 \mu\text{g.L}^{-1}$ in summer, and $430 \mu\text{g.L}^{-1}$ in winter (Xing *et al.* 2018). Azima *et al.* (2019) observed that LOS and its carboxylate derivative showed refractory characteristics to the biological treatment of WWTPs, remaining in effluents and reaching surface waters. In Japan, hospital effluents, WWTP effluents and river waters downstream of the release were analyzed, and the maximum values found from LOS were 786, 171 and $32 \mu\text{g.L}^{-1}$, respectively; and the carboxylic metabolite were 686, 147 and $18 \mu\text{g.L}^{-1}$, respectively (Azima *et al.*, 2019).

Despite having a high medical prescription in Spain, simvastatin (SVT) excretion occurs by metabolites, and thus SVT was not found in the monitoring of the influents and effluents of the WWTP Castellon de la Plana, in Spain (Gracia-Lor *et al.*, 2012). Its Kow value of 4.68 shows the tendency of its adsorption in suspended solids, as well as in sediments (Grung *et al.*, 2007). Tete's (2020) research found SVT in the influents ($11.7 \mu\text{g.L}^{-1}$) and effluents ($2.65 \mu\text{g.L}^{-1}$) of Daspoort WWTP, which uses physical-chemical and biological treatment (Pretoria, South Africa), as well as in the waters of the Apies River ($1.59 \mu\text{g.L}^{-1}$) downstream of WWTP (Tete *et al.*, 2020). In Sweden SVT

was quantified in samples of 15 influents, effluents, slurries of WWTPs, and in bodies of water, downstream and upstream of DWTPs. (Drinking water treatment plant) The results show a constant presence of SVT in WWTPs, with medians of 84 ng.L^{-1} in the influents and 130 ng.L^{-1} in effluents, and 320 ng.g^{-1} in dry sludge. These values found from the slurries can be due to the high value of the SVT logKow. In the bodies of water sample were found 38.5 ng.L^{-1} upstream and 34 ng.L^{-1} downstream (Golovko *et al.*, 2021).

The study by Marsik *et al.* (2017) indicated the presence of ibuprofen (IBU) in waters produced by 6 DWTPs in Japan. Its excretion was around 15%, with the other fractions such as the metabolites hydroxi-ibuprofen (1-OH IBU and 2-OH IBU) and carboxy-ibuprofen (CBX IBU) (Simazaki *et al.*, 2015). This drug and its metabolites were quantified in effluents of WWTPs and in the waters of the river that receives these effluents in Spain: IBU – 1900 and $750 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$, 1-OH IBU - 920 and $450 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$, 2-OH IBU - 3150 and $3000 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$ and CBX IBU - 5370 and 3950 g.L^{-1} , respectively (Ternes *et al.*, 2004; Ferrando-Climent *et al.*, 2012). In Portugal, Paiga *et al.* (2016) evaluated 5 points along the Lis River. IBU and its metabolites (HIBU and CBX IBU) were identified in all samples collected, both from the river and from the effluents of the WWTPs.

The presence of salicylic acetyl acid (AAS) and its main salicylic acid metabolite (AAS_t) was monitored by Paiga *et al.* (2016), along the Lis River in Portugal. Only the metabolite was found, present in all the aliquots analyzed. In the effluents of the WWTPs, the values of AAS_t varied between 106 and $296 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$, and in the river waters this variation was from 25 to $294 \text{ }\mu\text{g.L}^{-1}$.

The prodrug enalapril (ENA) transforms into enalaprilat in the body, being thus eliminated, through the renal system (Stankiewicz *et al.* 2015, López-Serna, 2012). This drug and its metabolite have been reported both in effluents (Gurke *et al.*, 2015), as well as in surface waters (López-Serna *et al.*, 2013) and groundwater (López-Serna *et al.*, 2012). In the monitoring of the WWTP in Dresden, Germany, there was 60% removal of the ENA (Gurke *et al.*, 2015). In the Ebro River and its tributaries, both ENA and its metabolite ENAprilate were found, with frequency and average values of 100% and 87%, and 7.23 ng.L^{-1} and 6.23 ng.L^{-1} (López-Serna *et al.*, 2013). In three groundwaters, in the Barcelona area, with distinct geological characteristics and recharge sources, ENA and its metabolite were identified. The concentration range varied, with enalapril mean values significantly lower (0.02 ng.L^{-1} to 0.18 ng.L^{-1} in three aquifers), and then those found for ENAprilate: 2.42 ng.L^{-1} to 4.78 ng.L^{-1} in the three aquifers (López-Serna *et al.*, 2012). Its detection may indicate that the focus should be on the metabolite and its degradation products to better evaluate their impacts on the various aquatic ecosystems.

Removal of the most prescribed drugs in the studied municipality by Fenton reaction and its derived techniques

The information found in the articles included in this paper is consolidated in Table 2, seeking to show the efficiency of the Fenton and Photo-Fenton process as an alternative or complement to conventional sewage treatment processes for drug removal. The removal rates (Table 2) found were high, with values above 90%, while the reductions of TOC (total oxygen organic) showed a high variability. These data indicate the heterogeneity of the degradation of drug molecules.

For the drugs Omeprazole, Captopril, Enalapril and simvastatin, no studies were found on the application of Fenton reaction for its degradation until the final date of the search.

The execution of the Fenton process and its variations depend on the control of some variables to obtain the best efficiency. These variables are in all types of Fenton, such as pH, iron, and hydrogen peroxide concentrations. However, the electric current, cathode and anode cells, and radiation are found in specific types of Fenton, such as in electro-Fenton for the first two and photo-Fenton for the latter. The analysis of the articles (Table 2) made it possible to extract and group them through similarities in the procedures. This allowed establishing 6 topics, relating to the efficiency obtained by each researcher and the drug studied. The topics were: use of the TOC parameter to evaluate efficiency, matrix change, hydraulic retention time versus operational optimization, electrode uses and application of electric current, association of distinct types of processes.

Table 2. Information about the Fenton process for studied drugs (*continues*)

Drug	Reference	Process Used	Matrix	Operational conditions	Removal (%), time (min)
Hydrochlorothiazide (HTZ)	Klamerth <i>et al.</i> (2012)	Photo-Fenton Solar EDDS pH neutral	Real effluent, after secondary biological treatment, with carbonate removal	[HTZ] 3783 $\mu\text{g.L}^{-1}$, pH _i = 3, [H ₂ O ₂] 50 mg.L^{-1} , kept constant during test, [Fe] 5 mg.L^{-1}	[HTZ] = 131 $\mu\text{g.L}^{-1}$ 96% removal in 60 min
	Arzate <i>et al.</i> (2017)	Photo-Fenton solar	Real effluent, batch, and continuous photo-Fenton treatment.	[HTZ] 4718 $\mu\text{g.L}^{-1}$, pH _i = 5.8, pH _{end} = 6.3, increase in hydraulic retention time = higher consumption of H ₂ O ₂	[HTZ] _{20min} = 93% [HTZ] _{40min} = 96% [HTZ] _{80min} = 98%
	Paiva <i>et al.</i> (2018)	Photo-Fenton	Distilled water	Catalyst: [Fe ²⁺ /Fe ³⁺ /FeO _x] 18 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, [H ₂ O ₂] 2.0 mg.L^{-1} , pH 2.6, time 25 min	90% removal in 30 min

Table 2. Information about the Fenton process for studied drugs (*continues*)

Drug	Reference	Process Used	Matrix	Operational conditions	Removal (%), time (min)
	Paiva <i>et al.</i> (2018)	Photo-Fenton	Aqueous solution	Condition after optimizing process, FeO _x ferrioxalate 1.0 mg.L ⁻¹ , [H ₂ O ₂] 2.0 mg.L ⁻¹ , pH = 5	Toxicity reduction after 60 min, with test organism <i>Vibrio fischeri</i> , [HTZ] 90%, pH = 6.0, no adjustments before disposal
Acetylsalicylic acid (ASA)	Ma <i>et al.</i> (2016)	Electro-Fenton	Aqueous solution	pH 3, [Fe] 0.3 mM, flow rate 3.5 mL/min, [H ₂ O ₂] electro generation, [ASA] 50 mg.L ⁻¹	Graphite Felt, 65% removal, N.I. time .
	Yang <i>et al.</i> (2018)	Electro-Fenton	Aqueous solution	pH = 3 [Fe] [H ₂ O ₂] = electro generation Reaction time: 10 min	TOC = 62% AAS = 100%
	Napoleão <i>et al.</i> (2018)	Photo-Fenton UV	Pharmaceutical industry effluent	[ASA] 0.65 mg.L ⁻¹ 150 min reaction [H ₂ O ₂] = fractional addition of 2 ml every 30 min up to 120 min	ASA = 71 % TOC _{total} = 67% Time N.I.
	Martínez-Pachón <i>et al.</i> (2019)	Photo-Electro-Fenton	Aqueous solution	pH = 3 [LOS] 4.7 x 10 ⁻⁵ mol.L ⁻¹ [H ₂ O ₂] = electro generation	100% in 90 min of reaction
Losartan potassium	Martínez-Pachón <i>et al.</i> (2019)	Photo-Electro-Fenton with organic acids	Composite sample (24h), WTP effluent	Fe (III)- oxalate: presence of Fe ⁺² /Fe ⁺³ : Higher production of •OH [H ₂ O ₂] = electro generation	pH ~neutral: 60% in 60 min Fe(III)oxalate 70% removal 90 min
		Sono-Fenton		Ultrasound as a reactor: Frequency: 357 kHz UVA lamp 90min pH = 7.8 [LOS] = 2.19 µg.L ⁻¹	84,9% Time N.I.
	Serna-Galvis <i>et al.</i> (2019)	Sono-Photo-Fenton	Composite sample (24h), WTP effluent	Ultrasound as a reactor: Frequency: 357 kHz UVA lamp 90min pH = 7.8 [LOS] = 2.19 µg.L ⁻¹	78.5% Time N.I.
		Sono-Photo-Fenton in the presence of oxalic acid			74.9% Time N.I.
Furosemide (FUR)	Klamerth <i>et al.</i> (2012)	Photo-Fenton	actual effluent	[FUR] 1100 ng.L ⁻¹ pH _{initial} = 2.8 [H ₂ O ₂] 50 mg.L ⁻¹ kept constant during test [Fe] 5 mg.L ⁻¹	100% in 60 min of reaction
	Olvera-Vargas <i>et al.</i> (2015)	Electro-Fenton with BDD e Pt	Aqueous solution	[H ₂ O ₂] = electrogeneration [Fe ²⁺] = 0.1 mM	TOC Removal 95% in 8 h
	Olvera-Vargas <i>et al.</i> (2016)	Electro-Fenton with BDD / carbon fiber electrode	Aqueous solution	pH = 3 [H ₂ O ₂] = electrogeneration [Fe ²⁺] = 0.1 mM	TOC removal: 1 h: 60% 2 h: 80% 8 h: 90%

Table 2. Information about the Fenton process for studied drugs (*continues*)

Drug	Reference	Process Used	Matrix	Operational conditions	Removal (%), time (min)
	Cuervo Lumbarque <i>et al.</i> (2018)	Fenton	Aqueous solution [DOC] 15 mg.L ⁻¹	[FUR] 500 µg.L ⁻¹ pH = 5 [Fe] 12.5 mg.L ⁻¹ [H ₂ O ₂]= 533 mg.L ⁻¹	97% after 1 min [DOC] 40% in 120 min:
			simulated effluent, [DOC] 60 mg.L ⁻¹	[FUR] 500 µg.L ⁻¹ pH = 5 [Fe] 12.5 mg.L ⁻¹	97% after 1 min [DOC] 15% in 120 min
			Actual hospital effluent, [DOC] 73 mg.L ⁻¹	[FUR] 500 µg.L ⁻¹ pH = 5 [Fe] 12.5 mg.L ⁻¹	90% in 1 min 98.9% after 120 min [DOC] 15% in 120 min
	Cuervo Lumbarque <i>et al.</i> (2019b)	Solar Homo/Heterogeneous Photo-Fenton Catalyst: Fe+ Alg: sodium alginate sphere + Fe immobilized [3g]	Aqueous solution, simulated effluent, real hospital effluent	[FUR] 500 µg.L ⁻¹ pH = 5 [Fe] continuous release of spheres, by reaction demand [H ₂ O ₂]= 25 mg.L ⁻¹	Removal 99% N.I. time
Atenolol (ATE)	Isarain-Chávez <i>et al.</i> (2011)	Electro-Fenton e Electro-Fenton Solar	Aqueous solution	[ATE]100 mg.L ⁻¹ pH = 3 [H ₂ O ₂]= electro generation [Fe ²⁺] = 0.5 mM T = 35°C	88% in COD (4 h), combined Pt electrode/air diffusion electrode 94% in COD (4 h), single Pt/boron-doped diamond electrode
	Li <i>et al.</i> (2012)	Fenton	Secondary effluent from WWTP	pH = 3 [H ₂ O ₂] = 2.5 [Fe] [Fe] 20 mg.L ⁻¹ [ATE] _{spiked} = 1µg.L ⁻¹	100% in 30 min
	Li <i>et al.</i> (2013)	Fenton and Fenton-Like	Secondary effluent from WWTP	pH = 3 [H ₂ O ₂] = 2.5 [Fe] [Fe] 20 mg.L ⁻¹ [ATE] _{spiked} = 1µg.L ⁻¹	[Fe] > 1.25 mg.L ⁻¹ 75% after 30 min Fenton Like [Fe] > 5 mg.L ⁻¹ 80% after 120 min
	Klamerth <i>et al.</i> (2013)	Photo-Fenton Solar EDDS pH neutral	Real effluent, after secondary biological treatment, with carbonate removal	[ATE] 1126 ng.L ⁻¹ initial pH = 2.8 [H ₂ O ₂]50 mg.L ⁻¹ kept constant during test [Fe] 5 mg.L ⁻¹	[ATE] = 35 ng.L ⁻¹ 97% in 60 min
	Pietro-Rodríguez <i>et al.</i> (2013)	Solar Photo Fenton	Real	pH = 2.0 [Fe] 5 mg.L ⁻¹	84% in 20 min
	Neamtu <i>et al.</i> (2014)	Photo-Fenton with simulated solar irradiation	Aqueous solution	[ATE] = 2 µM [H ₂ O ₂]= 300 µM [Fe] = 30 µM	80% TOC in 30 min 10 min: 38% 30 me: 72% 60 min: 98%
	Neamtu <i>et al.</i> (2014)	Photo-Fenton with simulated solar irradiation Photo-Fenton	Lake Geneva	[ATE] = 2 µM [H ₂ O ₂]= 300 µM [Fe] = 30 µM TOC=2.98mg.L ⁻¹	60% in OCD 60 min.

Table 2. Information about the Fenton process for studied drugs (*continues*)

Drug	Reference	Process Used	Matrix	Operational conditions	Removal (%), time (min)
			WWTP effluent	[ATE] = 2 μM [H ₂ O ₂] = 300 μM [Fe] = 30 μM TOC = 9.31 mg.L ⁻¹	35% in OCD 60 min.
			Aqueous solution	[ATE] 20 mg.L ⁻¹ [Fe] = 20 mg.L ⁻¹ [H ₂ O ₂] = 100 mg.L ⁻¹	70% IN TOC 60 min
	Veloutsou, Bizani & Fytianos (2014)	Photo-Fenton	Aksios river water	[DOC] 2.4 mg.L ⁻¹ [ATE] 20 mg.L ⁻¹ [Fe] = 20 mg.L ⁻¹ [H ₂ O ₂] = 100 mg.L ⁻¹	90% in 180 min
			Volvi lake water	[DOC] 16 mg.L ⁻¹ [ATE] 20 mg.L ⁻¹ [Fe] = 20 mg.L ⁻¹ [H ₂ O ₂] = 100 mg.L ⁻¹	85% in 180 min
	El-Hanafi <i>et al.</i> (2014)	Electro Fenton	Aqueous solution	[ATE] 0,17 mM pH = 3 [Fe] 5 mM [H ₂ O ₂] = electro generation	87% Time N.I.
Ibuprofen (IBU)	Skoumal <i>et al.</i> (2009)	Electro-Fenton, UVA Photo-Electro-Fenton, and Photo-Electro-Fenton Solar	Aqueous solution	pH = 3 [Fe] = 0.5 mM	Electro-Fenton 100% in 40 min UVA Photo-Electro-Fenton 100% in 40 min Photo-electro-Fenton Solar 100% in 20 min
	Klamerth <i>et al.</i> (2012)	Photo-Fenton solar EDDS pH neutral	WWTP tertiary effluent	pH = 6.7 [H ₂ O ₂] = 50 mg.L ⁻¹ [Fe] = 5 mg.L ⁻¹	81% in 60 min
	Loaiza-Ambuludi <i>et al.</i> (2013)	Electro-Fenton graphite felt cathode	Aqueous solution	pH = 3 [Fe] = 0,2 mM [IBU] 0.2 mM	100% in 20 min Intermediate compounds identified
	Monteiro <i>et al.</i> (2018)	Photo-Fenton with UV lamp	Aqueous solution	[H ₂ O ₂] = 28.0 mg.L ⁻¹ [Fe] = 4.4 mg.L ⁻¹ t = 360 min	93,35% COD = 91% TOC = 90 %
	Zhou <i>et al.</i> (2018a)	Electro-Fenton	Aqueous solution	pH = 3 [Fe] = 40 mg.L ⁻¹ [H ₂ O ₂] = electro generation	floating cathode 100% in 60 min Conventional submerged cathode 100% in 120 min Alternating current 100% in 60 min constant current 100% in 100 min

Table 2. Information about the Fenton process for studied drugs (*continues*)

Drug	Reference	Process Used	Matrix	Operational conditions	Removal (%), time (min)
	Nadais <i>et al.</i> (2018)	Bio-Electro-Fenton	Actual effluent after secondary biological treatment. Filtered and doped with drugs	pH = 3 [Fe] = 5 mM [H ₂ O ₂] = electro generation	86% in 11 hours Presence of different compounds in the effluent affect IBU oxidation
	Lui <i>et al.</i> (2018)	Heterogeneous Electro-Fenton	Aqueous solution	Homogeneous Electro-Fenton pH = 3 [H ₂ O ₂] = electro generation	Homogeneous Electro-Fenton 90% in 60 min
				Heterogeneous Electro-Fenton using Cit-Fe/ACFs pH = 6.8 [H ₂ O ₂] = electro generation	Heterogeneous Electro-Fenton using Cit-Fe/ACFs 97% in 120 min
	Darie & Carja (2018)	Photo-Fenton Heterogeneous with Fe impregnated in Zn (LDH)	Aqueous solution	pH = 8,5 [H ₂ O ₂] = 100 mg.L ⁻¹	82% (solar radiation) in 4.5 hours
	Guettaia <i>et al.</i> (2018)	Photo-Fenton heterogeneous iron in mesoporous silica	Aqueous solution	[IBU] 50 mg.L ⁻¹ pH = 11 [H ₂ O ₂] = 3,85 mg.L ⁻¹ [Fe] = 0.25 g.L ⁻¹	80% IN 210 min TOC = 10%
	Adityusulindro <i>et al.</i> (2018)	Fenton heterogeneous Fe-zeolite catalyst	Aqueous solution	pH = 3,3 [H ₂ O ₂] = 6,4 mm Catalyst: 4.8 g.L ⁻¹ 3 hours of reaction pH = 3.3 to 3.4l	[IBU] 88% IN 180 min [TOC] 27%
	Chen <i>et al.</i> (2018)	Fenton, Photo-Fenton, Photo/TiO ₂ /Fenton (PCF)	Aqueous solution	[IBU] 0.15 mmol.L ⁻¹ pH = 7 [H ₂ O ₂] = 0.05 mmol.L ⁻¹ [Fe ²⁺] = 0.05 mmol.L ⁻¹	30 min reaction: Fenton: 90% Photo-Fenton: 60% PCF: 97%
				[IBU] 0.15 mmol.L ⁻¹ [Fe ²⁺] fixed [Fe ²⁺]: [H ₂ O ₂] mmol.L ⁻¹ ⊗ = 350 ηm	[Fe ²⁺]: [H ₂ O ₂] 0.05:0.1- 90% 0.05:0.5 - 92% 0.05:2 - 98%
				[IBU] 0.15 mmol.L ⁻¹ [H ₂ O ₂] fixed [Fe ²⁺]: [H ₂ O ₂] mmol.L ⁻¹ ⊗ = 350 ηm	[Fe ²⁺]: [H ₂ O ₂] 0.05:0.50- 97% 0.20:0.5 - 97% 20.0:0.5 - 97%
	Ayoub <i>et al.</i> (2018)	Photo Fenton heterogeneous	Waters of the Meurthe River, France	pH = 5,5 [H ₂ O ₂] = 0.007 M [Fe] = 1000 mg.L ⁻¹	95% in 30 min and 6 hours
	Herghelegiu <i>et al.</i> (2018)	Homogeneous Fenton and Photo-Fenton	Aqueous solution	pH = 3 [Fe]/[H ₂ O ₂] = 1.25 v/v	homogeneous Fenton 85.98% in 30 min photo-Fenton 88.52% in 30 min

Table 2. Information about the Fenton process for studied drugs (*continues*)

Drug	Reference	Process Used	Matrix	Operational conditions	Removal (%), time (min)
	Dekkiche <i>et al.</i> (2019)	Photo-Fenton	Aqueous solution	pH= 2.8 [H ₂ O ₂] = 1.0·10 ⁻³ M [Fe] = 0.3 mM	98% in 90 min Mineralization
	Zhou <i>et al.</i> (2019)	Electro-Fenton	Aqueous solution	pH= 7 [Fe] =10 mg.L ⁻¹ [H ₂ O ₂]= electro Generation	Modified Felt Graphite 75.3% in 100 min graphite Felt unmodified 57.6% in 100 min
	Ayoub <i>et al.</i> (2019)	Photo-Fenton	River surface water, downstream of WWTP, Collections: Mar/2017, Oct/2016	pH= 4 [H ₂ O ₂]/[Fe] = 0.4 2016 TOC _i = 4.36 mg.L ⁻¹ pH = 7.32 2017 pH = 7.26	March/2017 6 h of reaction: 93 to 100% October/2016 OCD 30 min: 2.65 mg.L ⁻¹ 6h: 2.44 mg.L ⁻¹ 6 h of reaction: 93 to 100%
	Dong <i>et al.</i> (2019)	Neutral Photo-Fenton, Catalyst: Ferric-nitilotriacetate complex FeIII-NTA	Real effluent after aerated biological filter, enriched, final concentration of 450-500 µg.L ⁻¹ of each drug	pH 7, [H ₂ O ₂] 1 mM, [Fe] 0.05 mM, [IBU] 450-500 µg.L ⁻¹	Fenton: 50%, Photo-Fenton >92% in continuous mode. Residence time 2 hours

Legend: TOC – total organic carbon; DOC – dissolved organic carbon; [HTZ] – hydrochlorothizide; EDDS – Ethylenediamine-N,N'-disuccinic acid; LD – Detection limit; ASS – acetylsalicylic acid; LOS – losartan potassium; WTP – wastewater treatment plants; ATE – atenolol; FUR – furosemda; IBU – ibuprofen; i – initial.

The total mineralization of the studied compounds does not occur in most experiments, although the removal rate achieved in the evaluated studies is above 90% (Table 2). The total organic carbon (TOC) values make it possible to establish the degree of degradation of organic matter present in the studies, making it possible to evaluate the efficiency of the AOPs.

One of the factors that can affect the drugs rate degradation is the presence of other sources of organic matter. The drug is composed of the active ingredient and the excipients to obtain the final formulation. Thus, there is the possibility of a removal of 100% of the drug, but not obtaining the same percentage for the removal of total organic matter as excipients, metabolites and degradation products can remain in the solution. In the study of Yang (2018) there was a 100% removal of the ASA, however, the TOC reduced only to 62%. This indicates the presence of non-degradable organic substances in the reaction condition and/or the formation of intermediate ASA degradation products. In the study by Méndez-Arriaga (2010) the degradation of ibuprofen was evaluated by Fenton and photo-Fenton processes with UV. The Photo-Fenton process obtained a removal of 40% of TOC, while in the Fenton process only 10% of removal was achieved. Monteiro (2018) applied the photo-Fenton process to IBU, with removal of

93% of the drug and 90% of TOC, in addition to reducing the toxicity of the solutions evaluated by seed germination test. Using electro-Fenton with iron citrate, at pH 6.8, Lui (2018) obtained an IBU removal of 89% in 60 min and 96% in 120 min. The results of electro-Fenton with FeSO₄ or IBU iron citrate showed similar values, with the difference in the need for neutralization of the solution made with FeSO₄ for release, generating a precipitation of iron hydroxide sludge.

Another factor that affects drug degradation is the composition of the matrix. In simple matrices, formed by the active ingredient of the drug and deionized water, the interferences are lower in relation to the matrices containing the excipients. The real effluents have a higher organic load, which leads to the consumption of the reagents used in the reaction, reducing the efficiency of the process. When using the photo-Fenton process for the degradation of equal concentrations of eight drugs, after 60 minutes, the ibuprofen removal efficiency was 70, 58 and 40% for three types of samples: ultrapure water, water from Lake Geneva, Switzerland, and the effluent from the local water treatment plant, Lausanne, respectively. The lower degradation achieved in effluent samples (WTP) may be related to the competition of hydroxyl radicals by competing compounds such as carbonates, chlorides and humics substances present in the effluent. Furthermore, the absorption of UV light is decreased by the higher turbidity of these samples (Neamțu *et al.* 2014).

The evaluation of furosemide degradation (FUR) was associated with seven other drugs (gemfibrozil, nimesulide, paracetamol, propranolol, dipyron, fluoxetine, and diazepam), with the application of heterogeneous Fenton and heterogeneous photo-Fenton Solar and different matrices: ultrapure water, simulated hospital effluent and real hospital effluent (Porto Alegre/Brazil). The removal efficiency obtained for FRU in the three matrices was 95% after 1 minute of reaction. It was observed only FUR and diazepam had their molecules completely broken down, leaving 30% of integrated propranolol molecules. The other drugs ended up with 60 to 70% of their molecules intact at the end of the 120-minute treatment process. They also sought to evaluate the degradation products formed (Cuervo Lumbarque *et al.*, 2018).

Using the Solar Photo-Fenton Like method (Cuervo Lumbarque *et al.*, 2019b) and a modified catalyst, the Fe(III)/EDDS complex (EDTA structural isomer) became possible to perform the tests at pH 7. The assays were optimized with ultrapure water and drugs, and later these conditions were adopted for synthetic effluents. In distilled water FUR was degraded with 7.5 min, and in the synthetic effluent with 12.4 min (Cuervo Lumbarque *et al.*, 2019a).

The combination of the electrochemical process with the oxidation promoted by the Fenton reaction amplifies the oxidative potentials in the degradation processes. Five of the most used drugs in Belo Horizonte were treated using this technique, in several studies, as shown in Table 2 (Ma *et al.* 2016; Yang *et al.* 2018; Olvera-Vargas *et al.* 2016; Olvera-Vargas *et al.* 2018; Isarain-Chávez *et al.* 2011;

El-Hanafi *et al.* 2014; Loaiza-Ambuludi *et al.* 2013; Zhou *et al.* 2018a; Zhou *et al.* 2018b; Lui *et al.* 2018; Zhou *et al.* al. 2019).

According to Zhou (2018a), when performing the Electro-Fenton process comparing the use of a floating method and a conventionally submerged cathode, the floating cathode proved to be more efficient. To achieve 100% removal of the drug Ibuprofen, under the initial conditions of pH 3 and iron concentration equal to 40 mg.L^{-1} , it took 60 and 120 minutes, respectively, for the floating and submerged cathode. Furthermore, for 120 minutes the removal of TOC presented by the first was 78.3%, while by the second it was 25.4%. Removing TOC with floating cathode may indicate good applicability for this Fenton option.

In the ibuprofen degradation study, Zhou (2019) sought to establish the removal efficiency through an Electro-Fenton in aqueous solution using modified graphite fiber and unmodified graphite fiber (pH 3, $[\text{Fe}^{2+}] 10 \text{ mg L}^{-1}$). The process with modified graphite fiber had 75.3% efficiency, and with unmodified fiber electrode had 57.6%, with continuous flow reaction, after 100 minutes. The modified process favors electron and mass transfer between electrodes and electrolytes leading to higher generation of H_2O_2 , with increased process efficiency (Zhou *et al.* 2019).

In an Electro-Fenton process, the analysis of the effect of alternating or direct current on the efficiency of ibuprofen degradation was studied. When using alternating current, a significant increase in the generation of H_2O_2 was observed in relation to that generated with direct current, with TOC removal at 120 minutes of 89.3% and 59.5%, respectively (Zhou *et al.* 2018b). By using the Electro-Fenton process peroxide generation is produced in the electrolyte cell and may be a treatment system with lower reagent consumption.

The association of techniques in the effluent treatment process has transformed into a search for options to improve the efficiency of the removal of emerging recalcitrant pollutants, as well as their degradation products formed during the processes used (Zhou *et al.*, 2019, Zhou *et al.*, 2018b, Cuervo Lumbarque *et al.*, 2019a, Dong *et al.*, 2019, Chen *et al.*, 2018, Adityosulindro *et al.*, 2018, Guettaia *et al.*, 2018, Klammerth *et al.*, 2013).

Antihypertensive drugs, inhibitors of the renin-angiotensin-aldosterone system, have been found in sanitary effluents, rivers, and lake water columns (Fonseca *et al.* 2020; Golovko *et al.* 2020; Kot-Wasik *et al.* 2016). For this purpose, tests were conducted using electro-Fenton and photo-electro-Fenton, seeking to degrade losartan and valsartan, at pH close to neutral. Light emitting diodes (LED) were used as light source. The degradation obtained with photo-electro-Fenton was more efficient for drugs and led to increased biodegradability after this treatment (Martínez-Pachón *et al.* 2019).

Klamerth (2012) conducted a pilot-scale study using the effluents from the ETE of Almería, Spain. Photo-Fenton and modified Photo-Fenton degradation tests were performed at neutral pH with two complexing reagents. Among the 60 drugs identified were atenolol and hydrochlorothiazide furosemide. Atenolol presented less than 5% residual concentration, using photo-Fenton at neutral pH, while furosemide and hydrochlorothiazide did not present residual concentrations. Degradation products and metabolites were not focuses of this research (Klamerth *et al.*, 2012).

When comparing Photo-Fenton and Fenton, the first presents, in some studies, a higher removal efficiency than conventional Fenton, this is a consequence of the generation of OH radicals through the photo-reduction of ferric ions, through the addition of ultraviolet light. In this study, the removal efficiency of ibuprofen was 66% by Photo-Fenton and 57% by traditional Fenton (Chen *et al.*, 2018). In Herghelegiu work (2018) the results were higher, with efficiency of 89% and 86% for Photo-Fenton and Fenton, respectively, for the same drug. The difference was not significant in this last study, making it necessary to evaluate the energy costs involved. These differences in the efficiency of ibuprofen degradation may be associated with the pH used by the studies: Chen *et al.* (2018) worked at acid pH, different from the alkaline pH adopted in Herghelegiu in his study (2018).

Li (2013) used traditional Fenton (with Fe^{2+}) and Fenton-Like (Fe^{3+}) to degrade Atenolol and 18 other substances present in WWTP (USA) samples, keeping the pH 3 and iron concentration at 20 mg L^{-1} and molar ratio of $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{(2+/3+)}$ of 2.5. To achieve the same removal efficiency of 99%, the reaction time for Fenton-Like was four times longer. For a Fenton reaction, with the addition of half Fe^{2+} , the same removal occurred with 30 minutes, showing to be more efficient and economical (Li *et al.*, 2013).

Application of Fenton process and its derived techniques in effluent polishing

The implementation of a post-treatment system by AOP, in the secondary effluent of an WTP, Local, in Spain, Arzate *et al.* (2017) studied the gain in increasing the hydraulic retention time (HRT). A continuous Solar Photo-Fenton process was used, and for a 20, 40, and 80 minute HRT the hydrochlorothiazide drug removal rate was 93%, 96% and 98%, respectively.

This type of study can indicate ways to be implemented in the final polishing of sanitary effluents, aiming to obtain a reduction in the release of emerging contaminants into the environment.

WTPs use biological treatment processes for raw effluents, which remove simple organic matter. The secondary effluent produced in this first treatment has recalcitrant organic compounds, such as drugs.

Seeking a polishing of the WTP effluent in Spain, Arzate *et al.* (2017) assessed the implementation of a post-treatment system by AOP. Hydraulic retention times (HRT) were evaluated with the implementation of a continuous Photo-Fenton Solar process. The hydrochlorothiazide removal rate was 93%, 96% and 98%, respectively, for HRT of 20, 40 and 80 minutes.

The results obtained in this research are indicative that the implementation of AOP as a stage in the final polishing of sanitary effluents, can lead to a reduction in the release of emerging contaminants into the environment.

Among the evaluated processes, it was observed that the Photo-Fenton solar process at pH 3 exhibited superior efficiency. For instance, tests with real effluents demonstrated a removal rate of above 99% for HTZ (Arzate *et al.*, 2017) and close to 100% for FUR (Klamerth *et al.*, 2012), while exceeding 80% for ATE (Neamtu *et al.*, 2014, Veloutsou, Bizani & Fytianos, 2014), and achieving nearly 100% removal for IBU (Ayoub *et al.* 2019). However, it is worth noting that a drawback of these processes is the necessity to neutralize the solution for final disposal.

Other processes are conducted at pH close to neutral, using iron sources from organic complexes. HTZ, IBU, and FUR were degraded above 90% under these conditions (Klamerth *et al.*, 2012). Processes involving carbon fiber electrodes, catalytic processes with titanium, or zeolites exhibited remarkably high removal rates. It is essential to consider the investment costs for acquiring the system and its operational maintenance.

The analysis of process efficiencies should be directed towards implementing these treatments for real effluents under conditions that can be rapidly implemented, achieving significant removal at a lower operational cost.

Conclusion

It was found in the literature that degradation processes using Fenton reaction were applied to 6 drugs among the 10 most frequently used in Belo Horizonte. Among the most studied drugs are ibuprofen, atenolol, and furosemide. The traditional Fenton reaction has been modified to speed up the process and make it more efficient and cleaner, reducing waste formation. Modified processes such as photo Fenton and electron-Fenton showed good results for drug degradation. In general, the studies showed higher efficiency in the removal of recalcitrant drugs than conventional treatments of sanitary and/or industrial effluents. The analysis of degradation products generated during the Fenton reaction has scarcely been done still, even less than the determination of total organic carbon. These two parameters increase the reliability in the degradation of emerging contaminants.

It's crucial to note that the majority of drug degradation studies highlighted in this review are conducted on a bench scale, typically within research laboratories and universities. These studies often use post-treatment effluents, where the organic load has been significantly reduced through filters or biological treatments. While these bench-scale studies are valuable for optimizing reaction conditions, it's essential to recognize their limitations.

To comprehensively evaluate real effluents from wastewater treatment plants, it becomes necessary to assess not only the drugs but also their metabolites and degradation by-products, as these substances may carry toxicities. Transitioning from isolated laboratory systems to real-world conditions is a critical step in understanding the broader environmental implications.

Therefore, while studies in research settings are indispensable for optimizing reaction conditions, they serve as a foundation for the eventual application and adaptation of these processes to more complex matrices, mirroring real-world conditions. This ensures a holistic understanding of the efficacy and potential environmental impacts of drug degradation processes.

Acknowledgments

We are grateful to Luiz Gustavo de Oliveira Schenk, for the English grammar review. Funding the authors disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: financial support provided by Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

References

- Adams, E., Neves, B.B., Prola, L.D.T., Liz, M.V., Martins, L.R.R., Ramsdorf, W.A., Freitas, A.M. (2021) Ecotoxicity and genotoxicity assessment of losartan after UV/H₂O₂ and UVC/photolysis treatments. *Environ Sci Pollut Res*, **28**, 23812–23821. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11420-9>
- Adityosulindro, S., Julcour, C., Barthe, L. (2018) Heterogeneous Fenton oxidation using Fe-ZSM5 catalyst for removal of ibuprofen in wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**(5), 5920–5928. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.007>
- Alder, A.C., Schaffner, C., Majewsky, M., Klasmeier, J., Fenner, K. (2010) Fate of β -blocker human pharmaceuticals in surface water: Comparison of measured and simulated concentrations in the Glatt Valley Watershed, Switzerland. *Water Research*, **44**(3), 936948. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.10.002>
- Alvim, C.B., Moreira, V.R., Lebron, Y.A.R., Santos, A.V., Lange, L.C., Moreira, R.P.M., Santos, L.V.S., Amaral, M.C.S. (2020) Comparison of UV, UV/H₂O₂ and ozonation processes for the treatment of membrane distillation concentrate from surface water treatment: PhACs removal and environmental and human health risk assessment. *Chemical Engineering Journal*, **397**(1 October 2020), 125482. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125482>

- Américo, J., Isique, W., Minillo, A., Carvalho, S.L., Torres, N.H. (2012) Fármacos em Uma Estação de Tratamento de Esgoto na Região Centro-Oeste do Brasil e os Riscos aos Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* **17**(3), 61–67. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p61-67>
- Américo-Pinheiro, J.H.P., Isique, W.D., Torres, N.H., Machado, A.A., Carvalho, S.L., Valerio Filho, W.V., Ferreira, L.F.R. (2017) Ocorrência de diclofenaco e naproxeno em água superficial no município de Três Lagoas (MS) e a influência da temperatura da água na detecção desses anti-inflamatórios. *Eng Sanit Ambient*, **22**(3), 429–435. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017128719>
- Arzate, S., García Sánchez, J.L., Soriano-Molina, P., Casas Lopes, J.L., Campos-Mañas, M.C., Agüera, A., Sánchez Pérez, J.A. (2017) Effect of residence time on micropollutant removal in WWTP secondary effluents by continuous solar photo-Fenton process in raceway pond reactors. *Chemical Engineering Journal*, **316**(15 May 2017), 1114–1121. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.089>
- aus der Beek, T., Weber, F.A., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A., Küster, A. (2016) Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **35**(4), 823–835. <https://doi.org/10.1002/etc.3339>
- Ayoub, H., Roques-Carmes, T., Potier, O., Pontvianne, S., Lenouvel, A., Guignard, C., Mousset, E., Poirot, H., Toufaily, J., Hamieh, T. (2018) Iron-impregnated zeolite catalyst for efficient removal of micropollutants at very low concentration from Meurthe river. *Environ Sci Pollut Res* **25**, 34950–34967. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1214-0>
- Ayoub, H., Roques-Carmes, T., Potier, O., Potier, O., Koubaissy, B., Pontvianne, S., Lenouvel, A., Guignard, C., Mousset, E., Poirot, H., Toufaily, J., Hamieh, T. (2019) Comparison of the removal of 21 micropollutants at actual concentration from river water using photocatalysis and photo-Fenton. *SN Appl Sci* **1**, 836. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0848-y>
- Azuma, T., Otomo, K., Kunitou, M., Shimizu, M., Hosomaru, K., Mikata, S., Ishida, M., Hisamatsu, K., Yunoki, A., Mino, Y., Hayashi, T. (2019) Environmental fate of pharmaceutical compounds and antimicrobial-resistant bacteria in hospital effluents, and contributions to pollutant loads in the surface waters in Japan. *Science of The Total Environment*, **657**(20 March 2019), 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.433>
- Azzouz, A., Ballesteros, E. (2013) Influence of seasonal climate differences on the pharmaceutical, hormone and personal care product removal efficiency of a drinking water treatment plant. *Chemosphere*, **93**(9), 2046–2054. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.037>
- Barbosa, A.J.R. (2014) Aplicação do processo fenton no escuro na degradação do antibiótico oxitetraciclina dissolvido em soluções sintéticas. *Revista Educação*, **9**, 12–12. Accessed: 29 November 2022. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7751373>.
- Beretta, M., Britto, V., Tavares, T.M., Silva, S.M.T., Pletsch, A.L. (2014) Occurrence of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in marine sediments in the Todos os Santos Bay and the north coast of Salvador, Bahia, Brazil. *J Soils Sediments*, **14**, 1278–1286. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0884-6>
- Bernhardt, E.S., Rosi, E.J., Gessner, M.O. (2017) Synthetic chemicals as agents of global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **15**(2), 84–90. <https://doi.org/10.1002/fee.1450>
- Biel-Maeso, M., Corada-Fernández, C., Lara-Martín, P.A. (2018) Monitoring the occurrence of pharmaceuticals in soils irrigated with reclaimed wastewater. *Environmental Pollution*, **235**(April 2018), 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.085>
- Böger, B., Surek, M., Vilhena, R.O., Fachi, M.M., Junkert, A.M., Santos, J.M.M.F., Domingos, E.L., Cobre, A.F., Momade, D.R., Pontarolo, R. (2021) Occurrence of antibiotics and antibiotic resistant bacteria in subtropical urban rivers in Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, **402**(15 January 2021), 123448. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123448>
- Boix, C., Ibáñez, M., Bagnati, R., Zuccati, E., Sancho, J.V., Hernández, F., Castiglioni, S. (2016) High resolution mass spectrometry to investigate omeprazole and venlafaxine metabolites in wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, **302**(25 January 2016), 332–340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.059>

- Boleda, M.R., Alechaga, É., Moyano, E., Galceran, M.T., Ventura, F. (2014) Survey of the occurrence of pharmaceuticals in Spanish finished drinking waters. *Environ Sci Pollut Res.*, **21**, 10917–10939. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2885-9>
- Botero-Coy, A.M., Martínez-Pachón, D., Boix, C., Rincón, R.J., Castillo, N., Arias-Marín, L.P., Manrique-Losada, L., Torres-Palma, R., Moncayo-Lasso, A., Hernández, F. (2018) 'An investigation into the occurrence and removal of pharmaceuticals in Colombian wastewater.' *Science of The Total Environment*, **642**(15 November 2018), 842–853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.088>
- Brandt, E.M.F., de Queiroz, F.B., Afonso, R.J.C.F., Aquino, S.F., Chernicharo, C.A.L. (2013) Behaviour of pharmaceuticals and endocrine disrupting chemicals in simplified sewage treatment systems. *Journal of Environmental Management*, **128**(15 October 2013), 718–726. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.003>
- Caldas, S., Arias, J., Rombaldi, C., Mello, L.L., Cerqueira, M.B.R., Martins, A.F., Primel, E.G. (2018) Occurrence of Pesticides and PPCPs in Surface and Drinking Water in Southern Brazil: Data on 4-Year Monitoring. *J Braz Chem Soc.*, **30**(1), 71-80 <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180154>
- Campanha, M.B., Awan, A.T., de Sousa, D.N.R., Grosseli, G.M., Mozeto, A.A., Fadini, P.S. (2015) A 3-year study on occurrence of emerging contaminants in an urban stream of São Paulo State of Southeast Brazil. *Environ Sci Pollut Res*, **22**, 7936–7947. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3929-x>
- Chaves, M.J.S., Barbosa, S.C., Malinowski, M.M., Volpato, D., Castro, I.B., Franco, T.C.R.S., Primel, E.G. (2020) Pharmaceuticals and personal care products in a Brazilian wetland of international importance: Occurrence and environmental risk assessment. *Science of The Total Environment*, **734**(10 September 2020), 139374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139374>
- Chen, M., Chu, W., Beiyuan, J., Huang, Y. (2018) Enhancement of UV-assisted TiO₂ degradation of ibuprofen using Fenton hybrid process at circumneutral pH. *Chinese Journal of Catalysis*, **39**(4), 701–709. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(18\)63070-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(18)63070-0)
- Chonova, T., Keck, F., Labanowski, J., Montuuelle, B., Rimet, F., Bouchez, A. (2016) Separate treatment of hospital and urban wastewaters: A real scale comparison of effluents and their effect on microbial communities. *Science of The Total Environment*, **542**(Part A), 965–975. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.161>
- Commission, 2020. E. Commission. Establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council, **63**(2020), 1-4
- Cortez, F.S., Souza, L.S., Guimarães, L.L., Almeida, J.E., Pusceddu, F.H., Maranhão, L.A., Mota, L.G., Nobre, C.R., Moreno, B.B., Abessa, D.M.S., Cesar, A., Santos, A.R., Pereira, C.D.S. (2018) Ecotoxicological effects of losartan on the brown mussel *Perna perna* and its occurrence in seawater from Santos Bay (Brazil). *Science of The Total Environment*, **637–638**(1 October 2018), 1363–1371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.069>
- Cuervo Lumbaque, E., Cardoso, R.M., Dallegrave, A., dos Santos, L.O., Ibáñez, M., Hernández, F., Sirtori, C. (2018) Pharmaceutical removal from different water matrixes by Fenton process at near-neutral pH: Doehlert design and transformation products identification by UHPLC-QTOF MS using a purpose-built database. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**(4), 3951–3961. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.051>
- Cuervo Lumbaque, E., Salmoria Araújo, D.S., Klein, T.M., Tiburtius, E.R.L., Argüello, J., Sirtori, C. (2019a) Solar photo-Fenton-like process at neutral pH: Fe(III)-EDDS complex formation and optimization of experimental conditions for degradation of pharmaceuticals. *Catalysis Today*, **328**(15 May 2019), 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.01.006>
- Cuervo Lumbaque, E., Becker, R.W., Salmoria, Araújo, D.S., Dallegrave, A., Fracari, T.O., Lavayen, V., Sirtori, C. (2019b) Degradation of pharmaceuticals in different water matrixes by a solar homo/heterogeneous photo-Fenton process over modified alginate spheres. *Environ Sci Pollut Res*, **26**, 6532–6544. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-04092-z>

- da Silva, T.H.G., Furtado, R.X.S., Zaiat, M., Azevedo, E.B. (2020a) Tandem anaerobic-aerobic degradation of ranitidine, diclofenac, and simvastatin in domestic sewage. *Science of The Total Environment*, **721**(15 June 2020), 137589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137589>
- Darie, M., Carja, G. (2018) Efficient Fenton-like catalysis for ibuprofen degradation under solar light using iron and manganese supported on ZnAl/layered double hydroxides. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi*, **64**, 12. Accessed 29 November 2022. Available at: http://www.bipcc.icpm.tuiasi.ro/pdf/2018/2/bipi_cic_2018_2_02.pdf.
- de Barros, A.L.C., Schmidt, F.F., de Aquino, S.F., Afonso, R.J.C.F. (2018) Determination of nine pharmaceutical active compounds in surface waters from Paraopeba River Basin in Brazil by LTPE-HPLC-ESI-MS/MS. *Environ Sci Pollut Res*, **25**, 19962–19974. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2123-y>
- de Sousa, D.N.R., Mozeto, A.A., Carneiro, R.L., Fadini, P.S. (2014a) Electrical conductivity and emerging contaminant as markers of surface freshwater contamination by wastewater. *Science of The Total Environment*, **484**(15 June 2014), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.135>
- Dekkiche, B.A., Debbache, N., Ghoul, I., Seraghni, N., Sehili, T., Marín, Z., Santaballa, J.A., Canle, M. (2019) Evidence of non-photo-Fenton degradation of ibuprofen upon UVA irradiation in the presence of Fe(III)/malonate. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **382**(1 September 2019), 111976. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.111976>
- Diaz-Sosa, V.R., Tapia-Salazar, M., Wanner, J., Cardenas-Chavez, D.L. (2020) Monitoring and Ecotoxicity Assessment of Emerging Contaminants in Wastewater Discharge in the City of Prague (Czech Republic). *Water*, **12**(4), 1079. <https://doi.org/10.3390/w12041079>
- Dong, W., Jin, Y., Zhou, K., Sun, S.P., Li, Y., Chen, X.D. (2019) Efficient degradation of pharmaceutical micropollutants in water and wastewater by FeIII-NTA-catalyzed neutral photo-Fenton process. *Science of The Total Environment*, **688**(20 October 2019), 513–520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.315>
- El-Hanafi, N., Mehibel, L., Li, H.Z., Poncin, S., Bensadok, K. (2014) Mineralization of the Pharmaceutical β -Blocker Atenolol by Means of Indirect Electrochemical Advanced Oxidation Process: Parametric and Kinetic Study. *Separation Science and Technology*, **49**(18), 2942–2950. <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.943771>
- Estrada-Arriaga, E.B., Cortés-Muñoz, J.E., González-Herrera, A., Calderón-Mólgora, C.G., Rivera-Huerta, M.L., Ramírez-Camperos, E., Montellano-Palacios, L., Gelover-Santiago, S.L., Pérez-Castrejón, S., Cardoso-Vigueros, L., Martín-Domínguez, A., García-Sánchez, L. (2016) Assessment of full-scale biological nutrient removal systems upgraded with physico-chemical processes for the removal of emerging pollutants present in wastewaters from Mexico. *Science of The Total Environment*, **571**(15 November 2016), 1172–1182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.118>
- Ferrando-Climent, L., Collado, N., Buttiglieri, G., Gros, M., Rodríguez-Roda, I., Rodríguez-Mozaz, S., Barceló, D. (2012) Comprehensive study of ibuprofen and its metabolites in activated sludge batch experiments and aquatic environment. *Science of The Total Environment*, **438**(1 November 2012), 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.073>
- Ferreira, A.P. (2014) Identification and quantification of ibuprofen in conventional wastewater treatment plants in Rio de Janeiro, Brazil, and their discharge to the aquatic environment. *Journal of Advances in Biology*, **4**(1), 303–311. <https://doi.org/10.24297/jab.v4i1.1943>
- Fonseca, E., Hernández, F., Ibáñez, M., Rico, A., Pitarch, E., Bijlsma, L. (2020) Occurrence and ecological risks of pharmaceuticals in a Mediterranean river in Eastern Spain. *Environment International*, **144**(November 2020), 106004. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106004>
- Foureaux, A.F.S., Reis, E.O., Amaral, M.C.S. (2017) IV-045 - Análise da ocorrência de fármacos no Rio Doce e avaliação da retenção desses compostos por nanofiltração. ABES, São Paulo, p 7. Accessed 29 November 2022. Available at: <https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento36/TrabalhosCompletoPDF/IV-045.pdf>.
- Foureaux, A.F.S., Reis, E.O., Lebron, Y., Moreira, V., Santos, L.V., Amaral, M.S., Lange, L.C. (2019) Rejection of pharmaceutical compounds from surface water by nanofiltration and reverse osmosis. *Separation and Purification Technology*, **212**(1 April 2019), 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.018>

- Froehner, S., Machado, K.S., Falcão, F., Monnich, A., Bessa, M. (2011) Inputs of Domestic and Industrial Sewage in Upper Iguassu, Brazil Identified by Emerging Compounds. *Water Air Soil Pollut*, **215**, 251–259. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0475-0>
- Ghesti Pivetta, G., do Carmo Cauduro Gastaldini, M. (2019) Presence of emerging contaminants in urban water bodies in southern Brazil. *Journal of Water and Health*, **17**(2), 329–337. <https://doi.org/10.2166/wh.2019.092>
- Giannakis, S., Rtimi, S., Pulgarin, C. (2017) Light-Assisted Advanced Oxidation Processes for the Elimination of Chemical and Microbiological Pollution of Wastewaters in Developed and Developing Countries. *Molecules*, **22**(7), 1070. <https://doi.org/10.3390/molecules22071070>
- Golovko, O., Örn, S., Söregård, M., Frieberg, K., Nassazzi, W., Lai, F.Y., Ahrens, L. (2021) Occurrence and removal of chemicals of emerging concern in wastewater treatment plants and their impact on receiving water systems. *Science of The Total Environment*, **754**(1 February 2021), 142122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142122>
- Golovko, O., Rehl, A.L., Köhler, S., Ahrens, L. (2020) Organic micropollutants in water and sediment from Lake Mälaren, Sweden. *Chemosphere*, **258**(November 2020), 127293. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127293>
- Gonçalves, E.S., Rodrigues, S.V., Silva-Filho, E.V. (2017) The use of caffeine as a chemical marker of domestic wastewater contamination in surface waters: seasonal and spatial variations in Teresópolis, Brazil. *Rev Ambient Água*, **12**(2), 192–202. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1974>
- Grabarczyk, T., Mulkiewicz, E., Stolte, S., Puckowski, A., Passa, M., Stepnowski, P., Bialk-Beilinka, A. (2020) Ecotoxicity screening evaluation of selected pharmaceuticals and their transformation products towards various organisms. *Environ Sci Pollut Res*, **27**, 26103–26114. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08881-3>
- Gracia-Lor, E., Ibáñez, M., Zamora, T., Sancho, J.V., Hernández, F. (2014a) Investigation of pharmaceutical metabolites in environmental waters by LC-MS/MS. *Environ Sci Pollut Res*, **21**, 5496–5510. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2464-5>
- Gracia-Lor, E., Sancho, J.V., Serrano, R., Hernández, F. (2012) Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants at the Spanish Mediterranean area of Valencia. *Chemosphere*, **87**(5), 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.12.025>
- Grung, M., Heimstad, E.S., Moe, M., Schlabach, M., Svenson, A., Thomas, K., Woldegiorgis, A. (2008) Human and Veterinary Pharmaceuticals, Narcotics, and Personal Care Products in the Environment. *Statens forurensningstilsyn, Oslo*. ISBN: 978-82-7655-52-524-0. Accessed 29 November 2022. Available at: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/klif2/publikasjoner/2325/ta2325.pdf>
- Guettaia, D., Boudjemaa, A., Bachari, K., Mokhtari, M. (2018) Enhanced performance of Fe-JUL-15 prepared by ultrasonic method through the photo-degradation of ibuprofen. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **37**(2), 738–745. <https://doi.org/10.1002/ep.12748>
- Gurke, R., Rößler, M., Marx, C., Diamond, S., Schubert, S., Oertel, R., Fauler, J. (2015) Occurrence and removal of frequently prescribed pharmaceuticals and corresponding metabolites in wastewater of a sewage treatment plant. *Science of The Total Environment*, **532**(1 November 2015), 762–770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.067>
- Herghelegiu, M.C., Beldean-Galea, M.S., Anton, M. (2018) Studies Regarding The Degradation Of Some Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drugs Under Fenton And Photo-Fenton Oxidation Process. *Studia Universitatis Vasile Goldiș. Seria Stiintele Vietii (Life Sciences Series)*. **28**, 43–50. Accessed 29 November 2022. Available at: <http://www.studiauniversitatis.ro/2018/10/05/studies-regarding-the-degradation-of-some-nonsteroidal-anti-inflammatory-drugs-under-fenton-and-photo-fenton-oxidation-process/>.
- Hernando, M.D., Gómez, M.J., Agüera, A., Fernández-Alba, A.R. (2007) LC-MS analysis of basic pharmaceuticals (beta-blockers and anti-ulcer agents) in wastewater and surface water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **26**(6), 581–594. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2007.03.005>
- Ide, A.H., Osawa, R.A., Marcante, L.O., Pereira, J.C., Azevedo, J.C.R. (2017) Occurrence of Pharmaceutical Products, Female Sex Hormones and Caffeine in a Subtropical Region in Brazil. *CLEAN – Soil, Air, Water*, **45**(9), 1700334. <https://doi.org/10.1002/clen.201700334>

- Isarain-Chávez, E., Rodríguez, R.M., Cabot, P.L., Centellas, F., Arias, C., Garrido, J.A., Brillas, E. (2011) Degradation of pharmaceutical beta-blockers by electrochemical advanced oxidation processes using a flow plant with a solar compound parabolic collector. *Water Research*, **45**(14), 4119–4130. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.026>
- Jacob, R.S., Santos, L.V.S., d'Auriol, M., Lebron, Y.A.R., Moreira, V.R., Lange, L.C. (2020) Diazepam, metformin, omeprazole and simvastatin: a full discussion of individual and mixture acute toxicity. *Ecotoxicology*, **29**, 1062–1071. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02239-8>
- Khasawneh, O.F.S., Palaniandy, P. (2021) Occurrence and removal of pharmaceuticals in wastewater treatment plants. *Process Safety and Environmental Protection*, **150**(June 2021), 532-556. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.045>
- Klamerth, N., Malato, S., Agüera, A., Fernández-Alba, A., Maihot, G. (2012) Treatment of Municipal Wastewater Treatment Plant Effluents with Modified Photo-Fenton As a Tertiary Treatment for the Degradation of Micro Pollutants and Disinfection. *Environ Sci Technol*, **46**(5), 2885–2892. <https://doi.org/10.1021/es204112d>
- Klamerth, N., Malato, S., Agüera, A., Fernández-Alba, A. (2013) Photo-Fenton and modified photo-Fenton at neutral pH for the treatment of emerging contaminants in wastewater treatment plant effluents: A comparison. *Water Research*, **47**(2), 833–840. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.008>
- Kostich, M.S., Batt, A.L., Lazorchak, J.M. (2014) Concentrations of prioritized pharmaceuticals in effluents from 50 large wastewater treatment plants in the US and implications for risk estimation. *Environmental Pollution*, **184**(January 2014), 354–359. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.09.013>
- Kot-Wasik, A., Jakimska, A., Śliwka-Kaszyńska, M. (2016) Occurrence and seasonal variations of 25 pharmaceutical residues in wastewater and drinking water treatment plants. *Environ Monit Assess*, **188**, 661. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5637-0>
- Kramer, R.D., Filippé, T.C., Prado, M.R., de Azevedo, J.C.R. (2018) The influence of solid-liquid coefficient in the fate of pharmaceuticals and personal care products in aerobic wastewater treatment. *Environ Sci Pollut Res*, **25**, 25515–25525. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2609-7>
- Li, W., Nanaboina, V., Zhou, Q., Korshin, G.V. (2012) Effects of Fenton treatment on the properties of effluent organic matter and their relationships with the degradation of pharmaceuticals and personal care products. *Water Research*, **46**(2), 403–412. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.002>
- Li, W., Nanaboina, V., Zhou, Q., Korshin, G.V. (2013) Changes of excitation/emission matrixes of wastewater caused by Fenton- and Fenton-like treatment and their associations with the generation of hydroxyl radicals, oxidation of effluent organic matter and degradation of trace-level organic pollutants. *Journal of Hazardous Materials*, **244–245**(15 January 2013), 698–708. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.064>
- Lima, D.R.S., Tonucci, M.C., Libânio, M., Aquino, S.F. (2017) Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção. *Eng Sanit Ambient*, **22**(6), 1043–1054. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017165207>
- Liu, D., Zhang, H., Wei, Y., Liu, B., Lin, Y., Li, G., Zhang, F. (2018) Enhanced degradation of ibuprofen by heterogeneous electro-Fenton at circumneutral pH. *Chemosphere*, **209**(October 2018), 998–1006. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.164>
- Loaiza-Ambuludi, S., Panizza, M., Oturan, N., Özcan, A., Oturan, M.A. (2013) Electro-Fenton degradation of anti-inflammatory drug ibuprofen in hydroorganic medium. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **702**(1 August 2013), 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2013.05.006>
- Locatelli, M.A.F., Sodr , F.F., Jardim, W.F. (2011) Determination of Antibiotics in Brazilian Surface Waters Using Liquid Chromatography–Electrospray Tandem Mass Spectrometry. *Arch Environ Contam Toxicol*, **60**, 385–393. <https://doi.org/10.1007/s00244-010-9550-1>
- Lopes, V.S.A., Riente, R.R., da Silva, A.A., Torquillo, D.F., Carreira, R.S., Marques, M.R.C. (2016) Development of a solid-phase extraction system modified for preconcentration of emerging contaminants in large sample volumes from rivers of the lagoon system in the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, **110**(1), 572–577. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.059>

- López-Serna, R., Jurado, A., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Petrovic, M., Marceló, D. (2013) Occurrence of 95 pharmaceuticals and transformation products in urban groundwaters underlying the metropolis of Barcelona, Spain. *Environmental Pollution*, **174**(March 2013), 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.022>
- López-Serna, R., Petrović, M., Barceló, D. (2012) Occurrence and distribution of multi-class pharmaceuticals and their active metabolites and transformation products in the Ebro River basin (NE Spain). *Science of The Total Environment*, **440**(1 December 2012), 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.027>
- Ma, L., Zhou, M., Ren, G., Yang, W., Liang, L. (2016) A highly energy-efficient flow-through electro-Fenton process for organic pollutants degradation. *Electrochimica Acta*, **200**(10 May 2016), 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.03.181>
- Machado, G., Yokoyama, L. (2020) Estudo de tratamento de efluente de serviço de saúde para redução de custos econômicos e impactos ambientais. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, **55**(1), 89–102. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200620>
- Machado, K.C., Grassi, M.T., Vidal, C., Pescara, I.C., Jardim, W.F., Fernandes, A.N., Sodré, F.F., Almeida, F.V., Santana, J.S., Canela, M.C., Nunes, C.R.O., Bichinho, K.M., Severo, F.J.R. (2016) A preliminary nationwide survey of the presence of emerging contaminants in drinking and source waters in Brazil. *Science of The Total Environment*, **572**(1 December 2016), 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.210>
- Mackul k, T., Mosn y, M., Grabic, R., Golovko, O., Koba, O., Birošov , L. (2015) Fenton-like reaction: A possible way to efficiently remove illicit drugs and pharmaceuticals from wastewater. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **39**(2), 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.12.016>
- Marsik, P., Rezek, J.,  idkov , M. (2017) Non-steroidal anti-inflammatory drugs in the watercourses of Elbe basin in Czech Republic. *Chemosphere*, **171**(March 2017), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.055>
- Martínez-Pachón, D., Espinosa-Barrera, P., Rincón-Ort z, J., Moncayo-Lasso, A. (2019) Advanced oxidation of antihypertensives losartan and valsartan by photo-electro-Fenton at near-neutral pH using natural organic acids and a dimensional stable anode-gas diffusion electrode (DSA-GDE) system under light emission diode (LED) lighting. *Environ Sci Pollut Res*, **26**, 4426–4437. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2645-3>
- Maszkowska, J., Stolte, S., Kumirska, J.,  ukaszewicz, P., Mioduszevska, K., Puckowski, A., Caban, M., Wagil, M., Stepnowski, P., Bia k-Bielińska, A. (2014) Beta-blockers in the environment: Part II. Ecotoxicity study. *Science of The Total Environment*, **493**(15 September 2014), 1122–1126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.039>
- Melo, S.A.S., Trov , A.G., Bautitz, I.R., Nogueira, R.F.P. (2009) Degrada o de f rmacos residuais por processos oxidativos avançados. *Qu m Nova* **32**(1), 188–197. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100034>
- Méndez-Arriaga, F., Esplugas, S., Giménez, J. (2010a) Degradation of the emerging contaminant ibuprofen in water by photo-Fenton. *Water Research*, **44**(2), 589–595. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.009>
- Minguez, L., Pedelucq, J., Farcy, E., Ballandonne, C., Budzinski, H., Halm-Lemeille, M.P. (2016) Toxicities of 48 pharmaceuticals and their freshwater and marine environmental assessment in northwestern France. *Environ Sci Pollut Res*, **23**, 4992–5001. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3662-5>
- Montagner, C.C., Jardim, W.F. (2011) Spatial and seasonal variations of pharmaceuticals and endocrine disruptors in the Atibaia River, São Paulo State (Brazil). *J Braz Chem Soc*, **22**(8), 1452–1462. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532011000800008>
- Monteiro, M.A., Spisso, B.F., Santos, J.R.M.P., Costa, R.P., Ferreira, R.G., Pereira, U.M., Miranda, T.S., Andrade, B.R.G., d vila, L.A. (2016) Occurrence of Antimicrobials in River Water Samples from Rural Region of the State of Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Environmental Protection*, **7**(2), 230–241. <https://doi.org/10.4236/jep.2016.72020>
- Monteiro, R.T., Santana, R.M.R., Silva, A.M.R.B., Lucena, A.L.A., Zaidan, L.E.M.C., Silva, V.L., Napoleão, D.C. (2018) Degradation of the pharmaceuticals nimesulide and ibuprofen using photo-Fenton process: toxicity studies, kinetic modeling and use of artificial neural networks. *Revista Eletrônica em Gestão, Educa o e Tecnologia Ambiental*, **22**(e3–e3). <https://doi.org/10.5902/2236117031563>

- Moreira, D.S., Aquino, S.F., Afonso, R.J.C.F., Santos, E.P.P.C., Pádua, V.L. (2009) Occurrence of endocrine disrupting compounds in water sources of Belo Horizonte Metropolitan Area, Brazil. *Environmental Technology*, **30**(10), 1041–1049. <https://doi.org/10.1080/09593330903052830>
- Moreira, M., Aquino, S., Coutrim, M., Silva, J., Afonso, R. (2011) Determination of endocrine-disrupting compounds in waters from Rio das Velhas, Brazil, by liquid chromatography/high resolution mass spectrometry (ESI-LC-IT-TOF/MS). *Environmental Technology*, **32**(12), 1409–1417. <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.537829>
- Nadais, H., Li, X., Alves, N., Couras, C., Andersen, H.R., Angelidaki, I., Zhang, Y. (2018) Bio-electro-Fenton process for the degradation of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs in wastewater. *Chemical Engineering Journal*, **338**(15 April 2018), 401–410. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.014>
- Napoleão, D.C., Zaidan, L.E.M.C., Rodríguez-Díaz, J.M., Santana, R.M.R., Montenegro, M.C.R., da Silva, M., Araújo, A., Benachour, M., Silva, V.L. (2018) Use of the photo-Fenton process to discover the degradation of drugs present in water from the Wastewater Treatment Plants of the pharmaceutical industry. *Afinidad Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, **75**(581), 23–31. Accessed 29 November 2022. Available at: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/335959>.
- Napoleão, D.C., Zaidan, L.E.M.C., Salgado, J.B.A., Sales, R.V.L., Silva, V.L. (2015) Degradação do contaminante emergente paracetamol empregando processos oxidativos avançados. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, **19**(3), 725–734. <https://doi.org/10.5902/2236117018577>
- Neamțu, M., Grandjean, D., Sienkiewicz, A., Faucheur, S.L., Slaveykova, V., Colmenares, J.J.V., Pulgarín, C., Alencastro, L.F. (2014) Degradation of eight relevant micropollutants in different water matrices by neutral photo-Fenton process under UV254 and simulated solar light irradiation – A comparative study. *Applied Catalysis B: Environmental*, **158–159**(October 2014), 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.04.001>
- Odabasi, S.U. (2017) Removal of diclofenac in drinking water with fenton process. *European Water*, **58**, 41–46. Accessed 29 November 2022. Available at: https://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2017_58_07.pdf.
- Olvera-Vargas, H., Oturan, N., Buisson, D., Hullebusch, E.D., Oturan, M.A. (2015) Electro-Oxidation of the Pharmaceutical Furosemide: Kinetics, Mechanism, and By-Products. *Clean – Soil, Air, Water*, **43**(11), 1455–1463. <https://doi.org/10.1002/clen.201400656>
- Olvera-Vargas, H., Oturan, N., Buisson, D., Oturan, M.A. (2016) A coupled Bio-EF process for mineralization of the pharmaceuticals furosemide and ranitidine: Feasibility assessment. *Chemosphere*, **155**(July 2016), 606–613. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.091>
- Paíga, P., Santos, L.H.M.L.M., Amorim, C.G., Araújo, N.A., Montenegro, M.C.B.S.M., Pena, A., Delerue-Matos, C. (2013) Pilot monitoring study of ibuprofen in surface waters of north of Portugal. *Environ Sci Pollut Res*, **20**, 2410–2420. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1128-1>
- Paíga, P., Santos, L.H.M.L.M., Ramos, S., Jorge, S., Silva, J.G., Delerue-Matos, C. (2016) Presence of pharmaceuticals in the Lis river (Portugal): Sources, fate and seasonal variation. *Science of The Total Environment*, **573**(15 December 2016), 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.089>
- Paiva, V.A.B., Paniagua, C.E.S., Ricardo, I.A., Gonçalves, B.R., Martins, S.P., Daniel, D., Machado, A.E.H., Trovó, A.G. (2018) Simultaneous degradation of pharmaceuticals by classic and modified photo-Fenton process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6**(1), 1086–1092. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.013>
- Papageorgiou, M., Kosma, C., Lambropoulou, D. (2016) Seasonal occurrence, removal, mass loading and environmental risk assessment of 55 pharmaceuticals and personal care products in a municipal wastewater treatment plant in Central Greece. *Science of The Total Environment*, **543**(Part A), 547–569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.047>
- Pereira, C.D.S., Maranhão, L.A., Cortez, F.S., Pusceddu, F.H., Santos, A.R., Ribeiro, D.A., Cesar, A., Guimarães, L.L. (2016) Occurrence of pharmaceuticals and cocaine in a Brazilian coastal zone. *Science of The Total Environment*, **548–549**(1 April 2016), 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.051>

- Petrie, B., Barden, R., Kasprzyk-Hordern, B. (2015) A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Research*, **72**(1 April 2015), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.053>
- Picó, Y., Barceló, D. (2015) Transformation products of emerging contaminants in the environment and high-resolution mass spectrometry: a new horizon. *Anal Bioanal Chem*, **407**, 6257–6273. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-8739-6>
- Pine Americo, J.H., Iisque, W.D., Perez Ortega, D.J., Ortiz, I.A.S., Torres, N.H., Ferreira, L.F.R., Manoel, L.O., Carvalho, S.L. (2015) Monitoring of the anti-inflammatory drug piroxicam and the anti-hypertensive drug atenolol in an Urban stream in Três Lagoas, Brazil. *Interciencia*, **40**, 670–676. Accessed 29 November 2022. Available at: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/160910>.
- Prieto-Rodríguez, L., Oller, I., Klammerth, N., Agüera, A., Rodríguez, E.M., Malato, S. (2013) Application of solar AOPs and ozonation for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, **47**(4), 1521–1528. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.002>
- Quadra, G.R., Silva, P.S.A., Paranaíba, J.R., Josué, I.I.P., Souza, H., Costa, R., Fernandez, M., Vilas-Boas, J., Roland, F. (2019) Investigation of medicines consumption and disposal in Brazil: A study case in a developing country. *Science of The Total Environment*, **671**(25 June 2019), 505–509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.334>
- Queiroz, F.B., Brandt, E.M.F., Aquino, S.F., Chernicharo, C.A.L., Afonso, R.J.C.F. (2012) Occurrence of pharmaceuticals and endocrine disruptors in raw sewage and their behavior in UASB reactors operated at different hydraulic retention times. *Water Science and Technology*, **66**(12), 2562–2569. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.482>
- Real, F.J., Acero, J.L., Benitez, F.J., Roldán, G., Fernández, L.C. (2010) Oxidation of hydrochlorothiazide by UV radiation, hydroxyl radicals and ozone: Kinetics and elimination from water systems. *Chemical Engineering Journal*, **160**(1), 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.009>
- Rehrl, A.L., Golovko, O., Ahrens, L., Köhler, S. (2020) Spatial and seasonal trends of organic micropollutants in Sweden's most important drinking water reservoir. *Chemosphere*, **249**(June 2020), 126168. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126168>
- Reichert, G., Hilgert, S., Fuchs, S., Azevedo, J.C.R. (2019) Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America. *Environmental Pollution*, **255**(Part 1), 113140. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113140>
- Reis, E.O., Foureaux, A.F.S., Rodrigues, J.S., Moreira, V.R., Lebron, Y.A.R., Santos, L.V.S., Amaral, M.C.S., Lange, L.C. (2019) Occurrence, removal and seasonal variation of pharmaceuticals in Brazilian drinking water treatment plants. *Environmental Pollution*, **250**(July 2019), 773–781. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.102>
- Roberts, J., Kumar, A., Du, J., Hepplewhite, C., Ellis, D.J., Christy, A.G., Beavis, S.G. (2016) Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Australia's largest inland sewage treatment plant, and its contribution to a major Australian river during high and low flow. *Science of The Total Environment*, **541**(15 January 2016), 1625–1637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.145>
- Seibert, D., Zorzo, C.F., Borba, F.H., Souza, R.M., Quesada, H.B., Bergamasco, R., Baptista, A.T., Inticher, J.J. (2020) Occurrence, statutory guideline values and removal of contaminants of emerging concern by Electrochemical Advanced Oxidation Processes: A review. *Science of The Total Environment*, **748**(15 December 2020), 141527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141527>
- Serna-Galvis, E.A., Botero-Coy, A.M., Martínez-Pachón, D., Moncayo-Lasso, A., Ibáñez, M., Hernández, F., Torres-Palma, R.A. (2019) Degradation of seventeen contaminants of emerging concern in municipal wastewater effluents by sonochemical advanced oxidation processes. *Water Research*, **154**(1 May 2019), 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.045>
- Simazaki, D., Kubota, R., Suzuki, T., Akiba, M., Nishimura, T., Kunikane, S. (2015) Occurrence of selected pharmaceuticals at drinking water purification plants in Japan and implications for human health. *Water Research*, **76**(1 June 2015), 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.059>

- Sjerps, R.M.A., ter Laak, T.L., Zwolsman, G.J.J.G. (2017) Projected impact of climate change and chemical emissions on the water quality of the European rivers Rhine and Meuse: A drinking water perspective. *Science of The Total Environment*, **601–602**(1 December 2017), 1682–1694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.250>
- Skoumal, M., Rodríguez, R.M., Cabot, P.L., Centellas, F., Garrido, J.Á., Arias, C., Brillas, E. (2009) Electro-Fenton, UVA photoelectro-Fenton and solar photoelectro-Fenton degradation of the drug ibuprofen in acid aqueous medium using platinum and boron-doped diamond anodes. *Electrochimica, Acta* **54**(7), 2077–2085. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.07.014>
- Sodré, F.F., Sampaio, T.R. (2020) Development and application of a SPE-LC-QTOF method for the quantification of micropollutants of emerging concern in drinking waters from the Brazilian capital. *Emerging Contaminants*, **6**(2020), 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2020.01.001>
- Sposito, J.C.V., Montagner, C.C., Casado, M., Navarro-Martin, L., Solórzano, J.C.J., Piña, B., Grisolia, A.B. (2018) Emerging contaminants in Brazilian rivers: Occurrence and effects on gene expression in zebrafish (*Danio rerio*) embryos. *Chemosphere*, **209**(October 2018), 696–704. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.046>
- Stankiewicz, A., Giebułtowitz, J., Stankiewicz, U., Wroczyński, P., Nałęcz-Jawecki, G. (2015) Determination of selected cardiovascular active compounds in environmental aquatic samples – Methods and results, a review of global publications from the last 10 years. *Chemosphere*, **138**(November 2015), 642–656. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.056>
- Starling, M.C.V.M., Amorim, C.C., Leão, M.M.D. (2019) Occurrence, control and fate of contaminants of emerging concern in environmental compartments in Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, **372**(15 June 2019), 17–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.043>
- Tarr, M.A. (2003) *Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants: Environmental and Industrial Applications*, 1st edn. CRC Press, Boca Raton
- Tete, V.S., Nyoni, H., Mamba, B.B., Msagati, T.A.M. (2020) Occurrence and spatial distribution of statins, fibrates and their metabolites in aquatic environments. *Arabian Journal of Chemistry*, **13**(2), 4358–4373. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2019.08.003>
- Velásquez, M., Santander, I.P., Contreras, D.R., Yáñez, J., Zaror, C., Salazar, R.A., Pérez-Moya, M., Mansilla, H. (2014) Oxidative degradation of sulfathiazole by Fenton and photo-Fenton reactions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **49**(6), 661–670. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.865447>
- Veloutsou, S., Bizani, E., Fytianos, K. (2014) Photo-Fenton decomposition of β -blockers atenolol and metoprolol; study and optimization of system parameters and identification of intermediates. *Chemosphere*, **107**(July 2014), 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.031>
- Veras, T.B., Paiva, L.R.A., Duarte, M.M.M.B., Napoleão, D.C., Cabral, J.J.S.P. (2019) Analysis of the presence of anti-inflammatory drugs in surface water: A case study in Beberibe river - PE, Brazil. *Chemosphere*, **222**(May 2019), 961–969. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.167>
- Wielens Becker, R., Ibáñez, M., Cuervo Lumbaqué, E., Wilde, M.L., Rosa, T.F., Hernández, F., Sirtori, C. (2020) Investigation of pharmaceuticals and their metabolites in Brazilian hospital wastewater by LC-QTOF MS screening combined with a preliminary exposure and in silico risk assessment. *Science of The Total Environment*, **699**(10 January 2020), 134218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134218>
- Wu, J., Liu, J., Pan, Z., Wang, B., Zhang, D. (2020) Spatiotemporal distributions and ecological risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in groundwater in North China. *Hydrology Research*, **51**(5), 911–924. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.001>
- Xing, Y., Yu, Y., Men, Y. (2018) Emerging investigators series: occurrence and fate of emerging organic contaminants in wastewater treatment plants with an enhanced nitrification step. *Environ Sci: Water Res Technol*, **4**(10), 1412–1426. <https://doi.org/10.1039/C8EW00278A>

- Yang, H., Zhou, M., Yang, W., Ren, G., Ma, L. (2018) Rolling-made gas diffusion electrode with carbon nanotube for electro-Fenton degradation of acetylsalicylic acid. *Chemosphere*, **206**(September 2018), 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.027>
- Zhou, W., Gao, J., Ding, Y., Zhao, H., Meng, X., Wang, Y., Kou, K., Xu, Y., Wu, S., Qin, Y. (2018a) Drastic enhancement of H₂O₂ electro-generation by pulsed current for ibuprofen degradation: Strategy based on decoupling study on H₂O₂ decomposition pathways. *Chemical Engineering Journal*, **338**(15 April 2018), 709–718. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.152>
- Zhou, W., Meng, X., Rajic, L., Xue, Y., Chen, S., Ding, Y., Kou, K., Wang, Y., Gao, J., Qin, Y., Alshawabkeh, A.N. (2018b) “Floating” cathode for efficient H₂O₂ electrogeneration applied to degradation of ibuprofen as a model pollutant. *Electrochemistry Communications*, **96**(November 2018), 37–41. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.09.007>
- Zhou, W., Rajic, L., Meng, X., Nazari, R., Zhao, Y., Wang, Y., Gao, J., Qin, Y., Alshawabkeh, A.N. (2019) Efficient H₂O₂ electrogeneration at graphite felt modified via electrode polarity reversal: Utilization for organic pollutants degradation. *Chemical Engineering Journal*, **364**(15 May 2019), 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.175>

REVISTA AIDIS

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

AVALIAÇÃO BIBLIOMÉTRICA PARA A REMOÇÃO DE FÓSFORO PRESENTE NO ESGOTO SANITÁRIO ATRAVÉS DA PRECIPITAÇÃO QUÍMICA UTILIZANDO A ESCÓRIA DE AÇO COMO FONTE ALTERNATIVA DE CÁLCIO E MAGNÉSIO

* Janaína Simões Lima ¹
Renata Estevam ¹
Ricardo Franci Gonçalves ²

BIBLIOMETRIC EVALUATION FOR THE REMOVAL OF PHOSPHORUS PRESENT IN SANITARY SEWAGE THROUGH CHEMICAL PRECIPITATION USING STEEL SLAG AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF CALCIUM AND MAGNESIUM

Recibido el 1 de octubre de 2023. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

The recovery of phosphorus present in sewage through chemical precipitation was addressed in this study. The objective was to evaluate the research trends and the correlations of academic networks related to the use of steel slag as an alternative source of Ca and Mg in the removal of phosphorus from sewage. The publications between the years 2017 and 2023 were mapped through the Biblioshiny interface, which is a bibliometrix tool. Among the results found in the panorama of publications, it was identified that China is the country that published the most during this period and it was observed that there was a gradual increase in the number of publications over the years. Among the identified gaps, the lack of crystallographic studies of the precipitates with an approach to the properties of the crystalline structures formed in the systems, as well as the use of slag with granulometries greater than 20 mm in reactive filters and systems with operating periods longer than 1 year.

Keywords: phosphorus recovery, sewage, steel slag, dephosphate and *bibliometrix*.

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

² Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Avenida Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras - Vitória - ES - CEP: 29075-910 - Brasil. Email: jana_acz@hotmail.com

Resumo

A recuperação de fósforo presente no esgoto através da precipitação química foi abordada nesse estudo. O objetivo foi avaliar as tendências das pesquisas e as correlações das redes acadêmicas relacionadas ao uso da escória de aço como fonte alternativa de Ca e Mg na remoção de fósforo do esgoto. Mapeou-se as publicações entre os anos de 2017 e 2022 através da interface *Biblioshiny* que é uma ferramenta do *bibliometrix*. Dentre os resultados encontrados do panorama das publicações, foi identificado que a China é o país que mais publicou durante esse período e observou-se que ocorreu um aumento gradual do número das publicações com o passar destes anos. Dentre as lacunas identificadas, destacam-se a falta de estudos cristalográficos dos precipitados com abordagem das propriedades das estruturas cristalinas formadas nos sistemas, assim como, a utilização de escória com granulometrias maiores que 20 mm nos filtros reativos e sistemas com períodos de operações superiores a 1 ano.

Palavras-chave: recuperação de fósforo, esgoto sanitário, escória de aço, desfosfatação e *bibliometrix*.

Introdução

O crescimento populacional tem gerado pressão sobre diversos recursos naturais, não só pela necessidade de produzir mais alimentos para suprir toda a população, mas também pelo aumento na produção de resíduos que geralmente são descartados de forma inadequadas, principalmente em regiões menos desenvolvidas (Ragnarsdottir *et al.*, 2011; Nedelciu *et al.*, 2020). O aumento da produção alimentícia depende da utilização dos fertilizantes agrícolas, que são substâncias aplicadas no solo que atuam na nutrição das plantas, facilitando o seu crescimento e proporciona o aumento da produtividade, assim como, a melhora da qualidade do produto final (Prasad, 2009).

Dentre os nutrientes presentes nos fertilizantes, encontram-se os macro e micronutrientes, em que os macronutrientes mais importantes para as plantas são: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) (Mahler, 2004). Segundo Nedelciu *et al.*, (2020), a indisponibilidade dos fertilizantes agrícolas, causada pelo esgotamento das rochas fosfáticas, pode ocasionar a escassez dos alimentos, visto o crescente e descontrolado aumento populacional. Além disso, a atual invasão da Ucrânia pela Rússia agravou ainda mais esse problema com a paralização das exportações realizadas pela Rússia, que é o maior exportador de fertilizantes do mundo (Simpson, 2022; Osaki, 2022).

Em contrapartida, a urina humana e as fezes presentes no esgoto sanitário contém altos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) que podem ser recuperados e usados como fonte dos nutrientes para as culturas. Por conta dessas características, quando o esgoto é tratado de forma inadequada e é lançado nos corpos receptores, ocorrem diversos problemas ambientais, como a eutrofização dos corpos hídricos (Medeiros *et al.*, 2020).

A falta de saneamento básico no Brasil gera uma problemática de saúde pública devido às doenças causadas pelo esgoto não tratado. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), somente 43% da população brasileira possuem coleta e tratamento de esgoto. Esse valor é pequeno e tem afetado

além das percas humanitárias, percas também econômicas como maiores gastos do Sistema Único de Saúde (SUS). Somente em 2015 as doenças infecciosas intestinais foram responsáveis por 2.35% das internações totais no Brasil, isso correspondeu a 0.7% dos gastos, sendo que dessas internações 43.4% foram de pessoas com 10 anos ou mais de idade (Paiva & de Souza, 2018).

Um indivíduo, em uma cidade de porte médio, produz aproximadamente 100 litros de esgoto por dia e em sua composição estão presentes em média 200 gramas de fezes e 1 quilogramas de urina (Andrade Neto, 1997). O esgoto é composto em média por 99.9% de água e 0.1% de sólidos, em que, 75% desses sólidos correspondem à matéria orgânica em decomposição. Dentre as substâncias orgânicas presentes estão os carboidratos, lignina, gorduras, sabões, detergentes sintéticos e proteínas (Qteishat; Myszograj; Suchowska-kisielewicz, 2011).

De maneira geral, o esgoto é constituído por impurezas onde enquadram-se alguns íons comuns, como fosfato, nitrato, cálcio, potássio e magnésio (Dacach, 1991). As concentrações e cargas per capita das formas de nitrogênio e fósforo no esgoto variam de acordo com cada localidade. A carga média de fósforo no esgoto é de 1.2g/hab.d e a média de nitrogênio é de 9.5g/hab.d. Com relação à carga de matéria orgânica, o esgoto possui DQO entre 100-120g/hab.de DBO entre 50-60g/hab.d. (Zanqueta, 2007).

O fósforo total do esgoto apresenta-se como fosfatos nas formas orgânica e inorgânica. A parte inorgânica que estão na forma de ortofosfato e polifosfatos, são originários principalmente dos detergentes superfosfatados e dos produtos de limpeza em geral. O fósforo oriundo dos detergentes correspondem até 50% da concentração total do esgoto. A aplicação dos fertilizantes no solo também são responsáveis pelo seu excesso de fósforo nos corpos d'água devido serem carregados pela água das regiões agrícolas. Já a parcela orgânica é associada à matéria orgânica (proteínas e aminoácidos) de origens fisiológica (Jordão & Pessôa, 2011).

No esgoto, as formas predominantes de nitrogênio são o nitrogênio orgânico e a amônia. O orgânico faz parte do grupo da amina, já a amônia origina-se principalmente na uréia, que é hidrolisada e dificilmente encontrada no esgoto. Ambos formatos de nitrogênio são determinados pelo método Kjeldahl, denominado Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). A maior parte do NTK do esgoto originam-se das fontes fisiológicas (PROSAB, 2009). Já o potássio assim como o fósforo existente no esgoto, são provenientes principalmente dos sabões e detergentes que possuem em suas composições os sais de sódio e potássio de diversos ácidos graxos. O magnésio e cálcio originam-se das excretas humanas (Osório & Oliveira, 2001; Dacach, 1991).

Muitos elementos contidos no esgoto fazem parte da composição básica dos fertilizantes agrícolas como os nitratos de cálcio, amônio e potássio, sulfato de amônio e uréia, superfosfatos simples, duplo e triplo, cloreto e, sulfato e carbonato de potássio. A recuperação desses

nutrientes e a sua reutilização pelas indústrias agrícolas como fertilizantes é uma alternativa ecológica que contribui para a preservação das rochas fosfáticas e dos corpos hídricos (Hukari, Hermann, Nätörp, 2016).

A reciclagem de fósforo e nitrogênio através da precipitação química, produzem majoritariamente os minerais estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) e hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$). Devido as suas composições, os mesmos possuem potencial de substituírem os fertilizantes agrícolas comerciais. Além disso, quando esses compostos são precipitados com fontes alternativas de magnésio e cálcio, são produzidos insumos de boa qualidade, eficazes e de baixo custo de produção (Carey *et al.*, 2016). Os fertilizantes compostos por cálcio e magnésio são utilizados e depositados no solo como corretivos de acidez (Castro *et al.*, 2016), sendo a hidroxiapatita mais solúvel em um ambiente mais ácido, enquanto em condições menos ácidas, ela se torna menos solúvel. Fazendo com que a HAP seja propícia a ser utilizada na correção de acidez do solo (Montalvo; McLaughlin; Degryse, 2015).

Sob o ponto de vista da economia circular é importante considerar o uso das fontes alternativas de magnésio e cálcio na precipitação desses compostos. Um exemplo é o uso da escória gerada na fabricação do aço. De acordo com Gomes *et al.*, (2018), cerca de 170 a 250 milhões de toneladas métricas desse coproduto é anualmente gerado em todo o mundo. Devido à grande quantidade produzida e seu impacto negativo ao ambiente, é importante que as indústrias siderúrgicas destinem esse coproduto de forma adequada (Shen; Wu; Du, 2009). Uma possível solução para esse problema é a utilização desse coproduto no processo de remoção de fósforo presente no esgoto, isso porque a escória apresenta ligações químicas que possuem grande afinidade de adsorção química com o fósforo (Liu *et al.*, 2019).

A escória de aciaria LD (BOF) possui em sua composição alguns elementos característicos como o FeO, CaO, MgO, Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , MnO, P_2O_5 (Yi *et al.*, 2012). Porém, suas características químicas podem variar conforme as modificações dos parâmetros operacionais durante o processo de fabricação do aço (Yildirim & Prezzi, 2011). O estudo das propriedades mineralógicas da escória podem ser realizados através das análises por difração de raio X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e espectrometria no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) (Chand; Paul; Kumar, 2016).

Diversos estudos mostram que a utilização de escória de aço além de ser uma fonte alternativa de Ca e Mg, gera um viés inovador e de grande importância para recuperação dos nutrientes contidos no esgoto sanitário. Um exemplo, são os filtros preenchidos com escória de aço (material absorvente) que são capazes de desfosfatar e desinfetar o esgoto sanitário antes do seu descarte nos corpos d'água (Dunets; Zheng; Dixon, 2015). Para a eficiência do processo, são necessários o controle/adequação de alguns parâmetros operacionais dos

filtros (reatores) de escória. Nesses, se destacam o tempo de detenção hidráulico (TDH), o modelo do fluxo líquido (Claveau-mallet; Wallace; Comeau, 2011), granulometria e a tipologia da escória (Barca *et al.*, 2014; Westholm, 2006).

Todo esse cenário de reciclagem do fósforo contido no esgoto sanitário se enquadra no conceito de inovação frugal ou engenharia frugal (Ragnarsdottir *et al.*, 2011; Molina-Maturano; Bucher; Speelman, 2020). A inovação frugal é associada à sustentabilidade ecológica e caracteriza-se pela diminuição dos custos dos produtos e serviços, além de atuar, principalmente, na produção limpa com o emprego das técnicas que reduzem os impactos ambientais da atividade humana (Albert, 2019). Com a evolução do conceito de sustentabilidade, busca-se o uso da capacidade humana em aplicar técnicas que reduzem as quantidades de materiais e dos resíduos gerados. Torna-se necessário que os bens produzidos possam ser reincorporados ao ciclo produtivo, em um movimento contínuo (Geissdoefer *et al.*, 2017; Amato Neto, 2011). A remoção dos nutrientes presentes no esgoto sanitário, a partir da sua reciclagem, é uma alternativa sustentável de minimizar a problemática da poluição dos corpos d'águas e ainda, minimiza a necessidade da retirada dos nutrientes das suas fontes primárias.

A economia circular, a sustentabilidade e a engenharia frugal estão intrinsecamente conectadas e oferecem uma base sólida para estratégias de desenvolvimento sustentável. A economia circular propõe um modelo econômico que visa minimizar resíduos e maximizar a utilização de recursos por meio de práticas como reutilização, reciclagem e remanufatura. Esse enfoque reduz a necessidade de extrair novos recursos, contribuindo para a preservação do meio ambiente e promovendo a eficiência na utilização dos recursos disponíveis (Yousaf *et al.*, 2022).

A sustentabilidade, por sua vez, é um princípio fundamental que busca atender às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades. Ela busca o equilíbrio entre os aspectos econômicos, sociais e ambientais do desenvolvimento, garantindo a utilização responsável e equitativa dos recursos naturais. Ao adotar estratégias de economia circular, organizações e sociedades podem avançar em direção a metas de sustentabilidade, mitigando impactos ambientais e promovendo o bem-estar humano a longo prazo (Tawfik *et al.*, 2022).

A engenharia frugal complementa esses conceitos ao oferecer uma abordagem de design simples, eficiente e acessível, frequentemente em contextos de recursos limitados. Por meio da engenharia frugal, soluções inovadoras podem ser desenvolvidas utilizando menos recursos, ao mesmo tempo em que atendem às necessidades específicas dos usuários. Essa abordagem é especialmente relevante em contextos onde os recursos são escassos ou quando se busca reduzir custos e maximizar a eficiência (Dima *et al.*, 2022; Kahle *et al.*, 2013).

Assim, ao conectar a economia circular, a sustentabilidade e a engenharia frugal, podemos explorar como a implementação de práticas circulares e o desenvolvimento de soluções frugais podem contribuir significativamente para a promoção do desenvolvimento sustentável. Essa integração oferece oportunidades para reduzir o desperdício, otimizar a utilização de recursos e promover um crescimento econômico mais equitativo e ambientalmente consciente (Ezeudu *et al.*, 2022; Androniceanu *et al.*, 2021).

Um exemplo concreto dessa interligação é a remoção de fósforo do esgoto utilizando escória de aço. Ao empregar a escória, um subproduto da indústria siderúrgica, para tratar águas residuais, fecha-se o ciclo de materiais, evitando o desperdício e promovendo a reutilização de recursos. Além disso, essa prática contribui para a sustentabilidade ao mitigar problemas ambientais, como a eutrofização dos corpos d'água. A escolha da escória como agente de remoção de fósforo também demonstra uma abordagem frugal, aproveitando um recurso abundante e subutilizado para uma finalidade eficaz e de baixo custo. Assim, a aplicação da escória de aço no tratamento de esgoto não apenas resolve um problema ambiental, mas também exemplifica como os princípios da economia circular, sustentabilidade e engenharia frugal podem ser integrados para promover soluções sustentáveis em diversas áreas (Vu *et al.*, 2023; Boutet; Comeau, 2018; Zuo *et al.*, 2018; Barca *et al.*, 2018).

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é apresentar uma revisão bibliométrica da literatura, entre 2017 e 2023, sobre o desempenho da escória de aço como fonte alternativa de magnésio e cálcio na remoção de fósforo presente no esgoto sanitário. Além disso, levantar lacunas que deverão ser abordadas para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de desfosfatação do esgoto sanitário usando a escória de aço.

Materiais e métodos

Seleção do portfólio bibliográfico

As bases de busca usadas nesta revisão bibliométrica foram a *Web Of Science* (WoS) e o *Scopus*. Para uma maior precisão no retorno dos resultados, foram utilizados os operadores booleanos (AND e OR), a fim de realizar combinações coerentes entre as palavras-chave. As palavras-chave foram definidas em inglês devido ao maior volume de produção bibliográfico nessa língua. Adiante, as sequências das combinações foram respectivas às junções de sinônimos e temas relevantes interconectados entre si, da seguinte forma: (steelmaking slag OR slag) AND (phosphate removal OR phosphorus removal OR phosphorus recovery) AND (sewage OR urine OR wastewater). No *Web Of Science* (WoS) foram utilizados os filtros: chave de busca (todos os campos) e tipo de documentos (artigos e revisões), enquanto que no *Scopus*, os artigos foram selecionados pelo tipo de documento (artigos e revisões) e tipo de acesso (tudo). Esse levantamento ocorreu em fevereiro de 2023.

Após a exportação dos resultados da bibliometria para o *software Excel*[®], foram aplicadas as técnicas de filtragem de conteúdo em conformidade com o estabelecido pela metodologia do Proknow-C, *Knowledge Development Process Constructivist* (Viegas *et al.*, 2016). ProKnow-C é um método de análise bibliométrica que visa organizar os conhecimentos e os dados científicos. Através deste método ocorre uma seleção sistemática das informações relevantes existentes na literatura através de algumas etapas pré-definidas. Os artigos são selecionados nos bancos de dados através das palavras-chave e são filtrados de acordo com sua relevância científica por meio de alguns critérios. Por fim, os artigos irrelevantes para a pesquisa são extintos da seleção e é dado o início a análise sistemática com o objetivo de ilustrar as questões de importância e as lacunas a serem abordadas na pesquisa (Ensslin *et al.*, 2010).

A seleção do portfólio bibliográfico foi executada com o auxílio da planilha no *Excel*[®]. Permaneceram somente os artigos e revisões com fator de impacto maior que 1, publicados entre 2017-2023 e devido ao uso de duas bases de dados, os artigos duplicados foram excluídos.

Em uma segunda etapa, através da leitura dos títulos e resumos, foram selecionados os artigos que abordavam a remoção de fósforo contidos no esgoto sanitário e que estavam consorciado com a utilização de diversas tipologias de escórias de aço. Por fim, os artigos selecionados foram lidos na íntegra e submetidos para análise bibliométrica utilizando o *Biblioshiny* (versão *on-line* do pacote *Bibliometrix*) (Aria; Cuccurullo, 2017).

Resultados e discussão

Processo de triagem dos artigos

Um total de 278 artigos foram identificados na plataforma *Web Of Science* (WoS) e 270 no *Scopus*. Considerando somente os artigos e revisões publicados entre os anos de 2017 e 2023, 114 artigos do *Web Of Science* e 95 do *Scopus* foram inicialmente selecionados. Em seguida, técnicas de filtragem de conteúdo foram aplicadas em conformidade com o estabelecido pela metodologia do Proknow-C, onde chegou-se a um total de 25 artigos, sendo eles: (Lu *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2021; Vu *et al.*, 2021; Arshad & Hamdan, 2021; Liu *et al.*, 2020; Ahmad *et al.*, 2020a; Ahmad *et al.*, 2020b; Pramanik *et al.*, 2020; Claveau-Mallet & Comeau, 2020; Chen *et al.*, 2020; Claveau-Mallet; Seltani; Comeau, 2020; Kwon *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2019; Claveau-Mallet; Boutet; Comeau, 2018; Zuo *et al.*, 2018; Barca *et al.*, 2018; Hamdan; Arshad; Ahmad, 2018; Yuan *et al.*, 2017; Claveau-Mallet *et al.*, 2017; Kuwahara; Yamashita, 2017; Park *et al.*, 2017. A Figura 1 apresenta um resumo detalhado do processo de triagem.

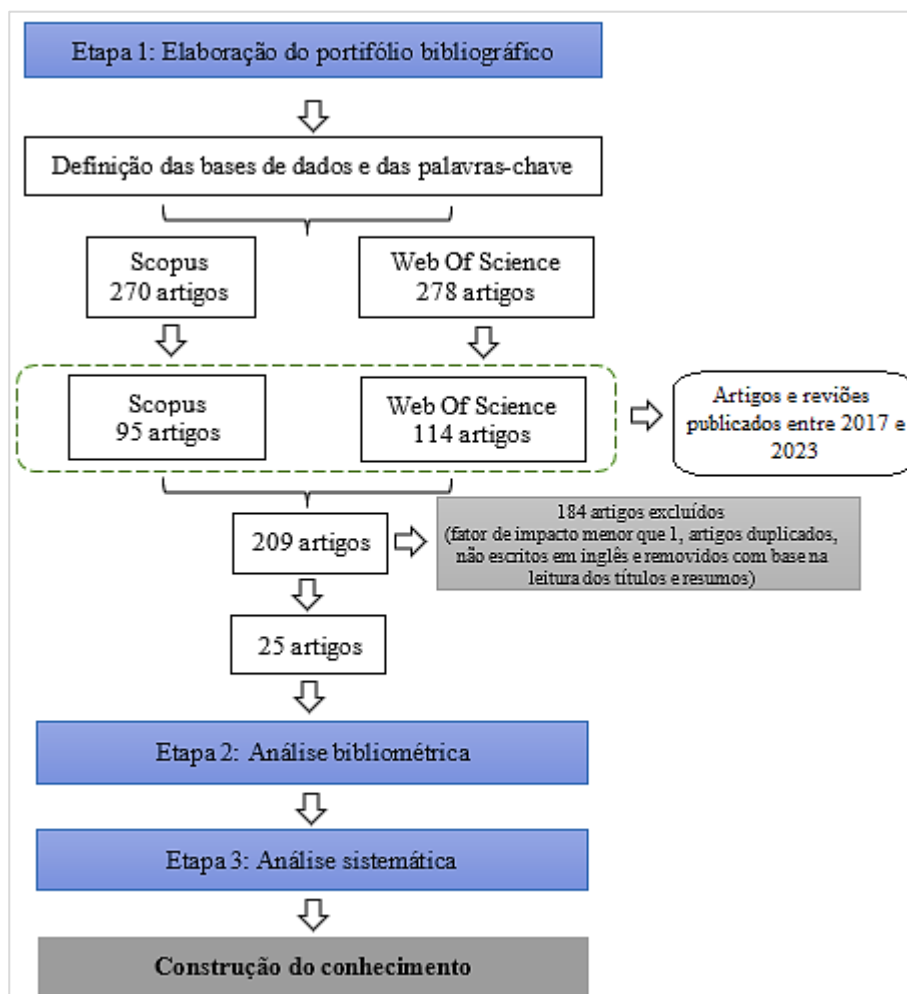


Figura 1. Resumo do processo de triagem com os números dos artigos obtidos em cada etapa. Fonte: Autoria própria

A Figura 2 apresenta as 30 palavras-chave encontradas com mais frequência no portfólio bibliográfico analisado, sendo que quanto maior o tamanho da palavra, maior a frequência com que a mesma apareceu no portfólio. Dessa forma fica fácil visualizar, de forma intuitiva, quais as palavras mais relevantes na temática estudada. Um ponto a ser destacado é a ausência de estudos que citaram em suas palavras-chave as fases mineralógicas hidroxiapatita e estruvita, mesmo elas sendo as fases formadas majoritariamente nos processos de recuperação dos nutrientes contidos no esgoto sanitário, quando utilizados na precipitação química íons de Ca e Mg.



Figura 2. Palabras-clave más frecuentes no portfólio bibliográfico selecionado. Fonte: Autoria própria

Dos 25 trabalhos que integraram o portfólio bibliográfico, evidenciou-se que 2 artigos ainda não foram citados e 23 foram citados pelo menos uma vez durante os anos de 2017 a 2023. O número de citações foi expressivo, sendo que 28% dos artigos do portfólio bibliográfico foram citados mais de 10 vezes. Além disso, foi observado que os artigos com maior número de citações foram os mais antigos. O artigo publicado por PARK *et al.*, (2017) foi o que apresentou o maior número de citações (33), seguido pelos trabalhos de Claveau-Mallet; Boutet; Comeau. (2018) e Barca *et al.*, (2018) com 25 e 19 citações, respectivamente.

O número das publicações sobre o tema selecionado tem crescido nos últimos anos, conforme apresentado na Figura 3. Porém, a produção bibliográfica nessa área ainda é considerada muito pequena, visto que somente 25 artigos foram selecionado em um período de 5 anos. Portanto, é evidente a necessidade do desenvolvimento de mais pesquisas abordando a remoção de fósforo do esgoto com a utilização de escórias de aço.

A respeito da internacionalização das publicações, a maior parte dos artigos foram publicados pela China (8), seguida pela Malásia e Canadá, ambos com 4 publicações, conforme apresentado na Figura 4. Nessa análise foi possível identificar as publicações que tiveram autores de um único país (*Single Country Publications – SCP*) bem como as publicações com a participação de autores de diversos países (*Multiple Country Publications – MCP*). É relevante ressaltar que as fontes dos artigos selecionados que se destacaram com maior número de publicações nesse tema foram: *Water*, *Journal of Environmental Management*, *Environmental Science and Pollution Research*, *Environmental Technology* e *Journal of Environmental Management*.

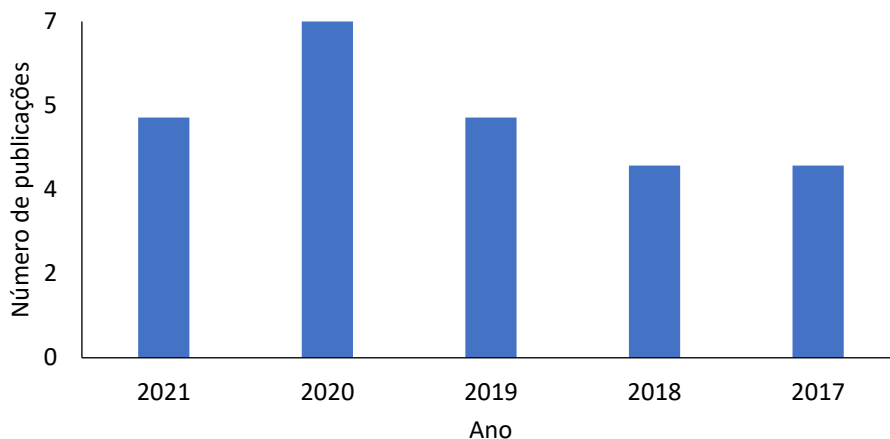


Figura 3. Quantidade de artigos publicados por ano. Fonte: Autoria própria

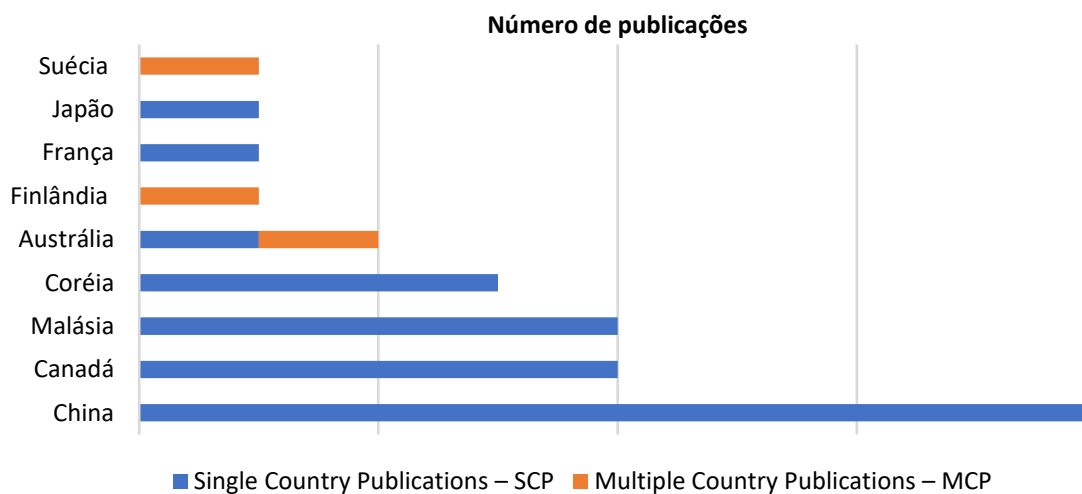


Figura 4. Número de artigos publicados por país. Fonte: Autoria própria

Discussão

Mecanismo da remoção do fósforo

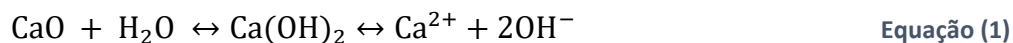
A remoção de fósforo do esgoto em filtros de escórias ricos em cálcio associa-se com a dissolução da escória na água. A dissolução da escória é constituída por reações cinéticas complexas de diversas fases mineralógicas como bredigite ($\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)_8$) e gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$). Quanto

maior a concentração de cálcio na escória utilizada como adsorvente, maior será o valor do seu pH. O alto valor de pH é o fator principal que garante a eficiência de remoção do fósforo. Sabe-se que em condições alcalinas o fósforo precipita em fosfatos de cálcio metaestáveis e que no decorrer do processo são transformados em hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), que é uma fase mineralógica estável (Claveau-Mallet; Wallace; Comeau, 2011).

Segundo Barca *et al.*, (2012), a hidroxiapatita é o principal precipitado de fósforo formado na superfície da escória nos filtros/reatores. Porém Valsami-Jones (2001), destaca que antes da formação da fase cristalina desse cristal, uma fase amorfa de Ca-P é formada.

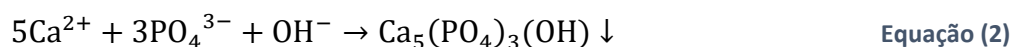
Em filtros reativos ocorre forte ligação entre o fósforo e o pH. Nos filtros, as partículas ficam retidas e quando a velocidade do fluxo líquido for alta, os precipitados são lixiviados. Claveau-Mallet; Wallace; Comeau (2011), detectaram que em TDH de 1.5 e 3.8 h ocorre o carreamento das partículas precipitadas, já quando o TDH é alto, as partículas ficam retidas e ocorrem uma espécie de aglomeramento, podendo ser de forma organizada ou desorganizada. O ordenamento das partículas depende do modelo de fluxo empregado no filtro.

Como mencionado acima, quanto maior o tempo de contato com o meio granular, maior é a obtenção do pH. Esse fato ocorre devido à escória ter maior tempo de liberação do OH^- no meio líquido através da dissolução do CaO (Barca *et al.*, 2013). A Equação 1 expressa esse efeito:



Quanto maior o TDH no FRE, melhor será a remoção de fósforo total e para as aplicações em sistemas em maiores escalas, torna-se necessário um maior volume do meio granular, que consequentemente elevará o pH do efluente.

Nos filtros reativos de escória ricas em Ca, a remoção de $\text{PO}_4 - \text{P}$ é baseada principalmente na precipitação de $\text{Ca} - \text{PO}_4 - \text{P}$ (Bowden *et al.*, 2009). A formação dos precipitados são exclusivamente dependentes dos valores do pH e das concentrações de Ca^{2+} e de $\text{PO}_4 - \text{P}$. Segundo Valsami-Jones (2001) e (Barca *et al.*, 2013), podem ser formados nos filtros: fosfatos de cálcio amorfos, fosfato dicálcico, fosfato dicálcico dihidratado, fosfato octocálcico, fosfato tricálcico e a hidroxiapatita. A precipitação de hidroxiapatita ocorre como mostrado na Equação 2:



Além disso, em análises criteriosas dos processos de remoção de fósforo do esgoto sanitário com o uso de escória de aço em filtros, com alimentação em formato de batelada, é de suma importância

usar modelos de isotermas de adsorção para tratar os resultados experimentais (Vu *et al.*, 2021). Nesse estudo desenvolvido por Vu *et al.*, (2021), as isotermas e a cinética de adsorção do fósforo foram estabelecidas, e assim foi possível identificar os principais mecanismos de remoção. A remoção de fósforo por precipitação química mostrou-se dependente, exclusivamente, do nível de pH e da concentração de Ca^{2+} presente na solução aquosa. Os autores observaram que o pH elevado e as altas concentrações de Ca^{2+} são os principais parâmetros para uma boa eficiência de remoção de fósforo no processo de precipitação química.

De maneira geral, o uso da escória siderúrgica no processo de desfosfatação do esgoto ocorre devido a presença em sua composição de óxidos de Ca, Mg, Fe e Al e é uma alternativa eficiente. Esses elementos favorecem o mecanismo de remoção do fósforo por adsorção e precipitação química. Ahmad *et al.*, (2020a), avaliaram o papel do processo de aeração na remoção de ortofosfato do esgoto utilizando sistemas aerados e não aerados, ambos preenchidos com escórias com alto teor de Ca e aplicando diferentes valores de pH (3, 5, 7, 9 e 11). Em outro estudo no mesmo ano, Ahmad *et al.*, (2020b), investigaram o papel do Fe na remoção de fósforo na presença ou ausência de aeração na coluna. Essa pesquisa aplicou os mesmos valores de pH mencionados na pesquisa anterior, a fim de investigar as eficiências de remoção de fósforo e os mecanismos do processo de desfosfatação do esgoto com a utilização da escória de aço apresentando altos teores de FeO.

Características das escórias

Todas as pesquisas selecionadas nesta revisão bibliográfica utilizaram escórias com granulometria de até 20 mm, sendo que a menor granulometria investigada possuía grânulos menores que 45 μm .

Diversas tipologias de escória foram utilizadas nas pesquisas selecionadas, percebeu-se que cada uma relaciona-se com a localidade das usinas que disponibilizaram o coproduto para as pesquisas. Dentre os 25 artigos, somente o artigo publicado por Sun *et al.*, (2021) utilizou escória consorciada à outros materiais, na qual foi produzido um material compósito composto por gesso de dessulfurização de gases de combustão como a principal matéria-prima, bentonita, argila e a escória de aço. Os demais estudos utilizaram: escória de forno elétrico a arco (8), escória de alto forno (3), escória de forno panela (1), escória de aço (5), escória de forno básico de oxigênio (2), escória de alumínio (1), escória de aciaria (2) e escória de ferro níquel (1). Um dos estudos não apresentou qual a tipologia da escória utilizada. A Figura 5 apresenta detalhadamente esses valores.

Autores relatam que cada tipologia de escória contém composições químicas diferentes, assim como suas características físico-químicas para a precipitação de Ca-P são diferentes de acordo com cada lote de escória produzida na usina. A composição da escória influencia diretamente na morfologia e nas características cristalográficas dos cristais precipitados no filtro (Drizo *et al.*, 2002).

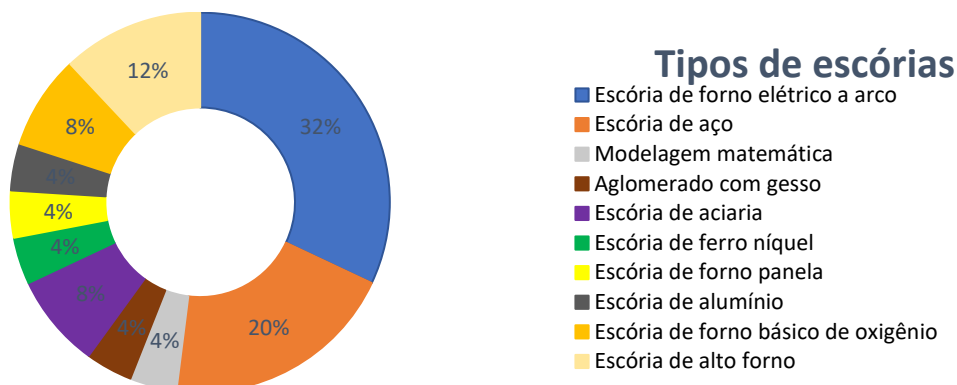


Figura 5. Tipode de escórias utilizadas nos estudos selecionados. Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que o termo *constructed wetland* encontra-se entre as 30 palavras mais citadas no portfólio bibliográfico, conforme apresentado na Figura 2. Essa evidência mostra que, diversas pesquisas têm considerado, a utilização de *wetlands* preenchidos com diversas tipologias de escória de aço como meio filtrante para a remoção de fósforo através do tratamento de esgotos CHEN *et al.*, (2020) utilizaram um *wetland* de fluxo subsuperficial horizontal preenchido com escória de aço e ceramsite para o controle do N/P do efluente. O diâmetro da ceramsite foi de 5-8mm e da escória de 2-3mm.

Já na pesquisa de LU *et al.*, (2021) foi utilizado um *wetland* para a desfosfatação da água de um rio poluído. Para isso, os autores utilizaram como meio filtrante a escória de aço com granulometria entre 10-20mm. Em outro estudo, XU *et al.*, (2019), chegaram a conclusão que o uso da escória como meio granular do *wetland* é bastante favorável, sendo possível alcançar uma eficiência de remoção de 98% e 70% para o fósforo e nitrogênio, respectivamente. Estes valores são consideravelmente altos, quando comparados aos *wetlands* preenchidos somente com brita. Essa eficiência é alcançada devido às características químicas das escórias, onde é favorecido o processo de adsorção química.

A utilização de diferentes tipologias de escória foi investigada por ZUO *et al.*, (2018), na qual fizeram a combinação de cinco filtros verticais, construídos em material plástico transparente, preenchidos com escória e alimentados com esgoto oriundo de fossas sépticas domésticas. Foram utilizados as seguintes tipologias de escória: blast furnace slag (BFS), *argon oxygen decarburisation slag* (AOD) e *electric arc furnace slag* (EAF). Em todos os experimentos utilizando as diferentes tipologias de escória, os minerais majoritariamente formados nas superfícies das escórias foram a hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), a calcita (CaCO_3) e a estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sendo que a proporção de cada mineral encontrado foi de acordo com as composições química de cada escória.

Na pesquisa de BARCA *et al.*, (2018), a análise de DRX foi capaz de identificar somente as fases cristalinas de Ca-P, porém o fosfato de cálcio amorfo não pôde ser identificado. Foi verificado que a cristalinidade do precipitado de Ca-P é minimizada com a existência de ligantes orgânicos, ocorrência essa também citado por Claveau-Mallet & Comeau (2020).

Concentrações elevadas de fósforo no esgoto, associadas às altas concentrações de Ca da escória e o favorecimento de um meio com o pH elevado, são as condições químicas ideais para a ocorrência das reações de precipitação de Ca-P (Gonzalez; Penn; Livingston, 2020). Por outro lado, em ambientes de pH baixo, a tendência é que se formem cristais contendo fósforo com características menos cristalinas ou até mesmo sólidos amorfos, que são os sólidos compostos por átomos, moléculas ou íons que não tiveram condições de apresentarem uma ordenação de longo alcance (Zuo *et al.*, 2018).

Fontes de fósforo (P)

A Figura 6 apresenta as fontes de fósforo utilizadas pelos pesquisadores do portfólio bibliográfico selecionado. Foi observado que existe um número considerado de estudos que utilizaram águas residuárias sintéticas (44%), seguido por esgoto sanitário real (20%). Os outros 36% dos estudos utilizaram diversas fontes, incluindo lodo digerido, lixiviado de solo, efluentes de fossa séptica, suinocultura, indústria têxtil e de tratamento secundário, entre outros.

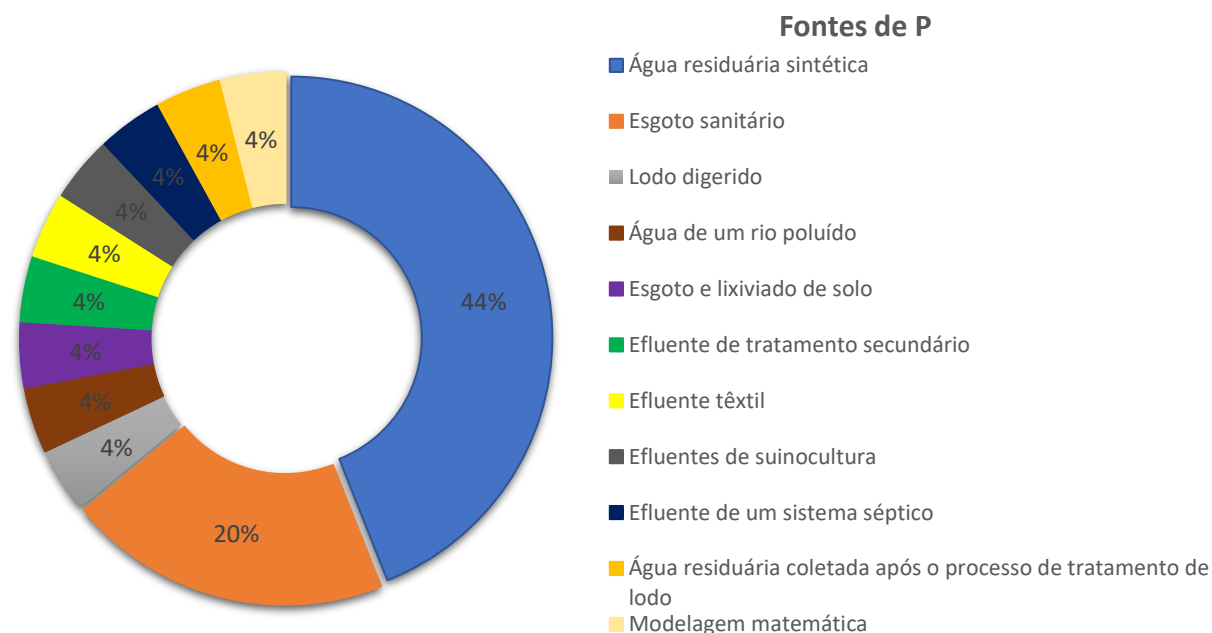


Figura 6. Fontes de fósforo utilizadas nas pesquisas do portfólio bibliográfico estudado. *Fonte: Autoria própria*

Muitos pesquisadores optam pelas águas sintéticas devido a facilidade de se preparar a água residuária no local de uso, além de oferecer um melhor controle da concentração de fósforo presente em solução. Nos experimentos estudados, a mesma foi produzida com concentração em torno de 10 mg P/L. A fonte de fósforo e potássio utilizada com frequência foi o fosfato monopotássio (KH_2PO_4), que é um sal solúvel, também usado como fertilizante.

Porém, é válido ressaltar a relevância de serem feitas mais pesquisas sobre a desfosfatação do esgoto sanitário (real), haja visto que diversas características físico-químicas são inexistentes em águas residuárias sintéticas. Além disso, foi observado que a maioria dos estudos consideraram um tempo de operação bem reduzido, sendo que apenas três destes apresentaram um período de operação superior a 365 dias.

Retenção hidráulica dos filtros de escória

Qualquer modelo de filtro reativo de escória está sujeito ao entupimento, que pode ocasionar em falhas hidráulicas. Com o passar do tempo há uma redução da porosidade da camada filtrante bem como diversas modificações no comportamento do fluxo granular. Isso acontece devido ao acúmulo dos sólidos em suspensão, que é composto por precipitados químicos e de material biológico. Um panorama desse efeito em filtros reativos de escória foi abordado por Claveau-mallet & Comeau (2020). Mesmo que o ambiente alcalino de um filtro granular seja, a priori, desfavorável ao crescimento bacteriano, é possível que ocorra a formação de biofilme à longo prazo.

Um modelo sistemático com a finalidade de avaliar o desempenho e eficiência hidrodinâmica dos filtros de escória de aço em condições de funcionamento reais foi investigado por Barca *et al.* (2018). Durante um ano de operação dois filtros de escória estiveram em funcionamento. No início da operação, o filtro de escória BOF/LD (*Basic Oxygen Furnace*) apresentou maior eficiência hidráulica e menor dispersão, quando comparado com o filtro de escória EAF (*Electric Arc Furnace*). Porém, com o passar do tempo o modelo do fluxo hidrodinâmico no interior dos filtros modificou-se devido às mudanças físico-químicas ocorridas. Segundo os autores, essas foram as causas principais da ocorrência do acúmulo dos precipitados, carbonatação da escória e a segregação de partículas no sistema.

Em aplicação de filtros reativos de escória em escala real, a eficiência da remoção de fósforo do esgoto pode ser favorecida se ocorrer um tratamento preliminar antes da sua inserção no filtro reativo. Uma tecnologia capaz de favorecer esse tratamento inicial são os sistemas alagados construídos (SAC), conhecidos como *wetlands* construídos ou também jardins filtrantes. Nos *wetlands* o esgoto é filtrado e nele ocorre alguns processos, sendo eles os físicos (filtração, sedimentação, volatilização), químicos (adsorção, oxidação, redução, precipitação, quelação) e biológicos (degradação e absorção pelos microrganismos). Essa tecnologia tem a capacidade de

reduzir a matéria orgânica do esgoto, tornando a aplicação subsequente no filtro reativo de escória mais eficiente e com menor possibilidade de formação de biofilme, é reduzido o acúmulo dos sólidos que com o passar do tempo ocasiona a retenção hidráulica, aumentando assim a vida útil do filtro de escória. (Claveau-Mallet; Wallace; Comeau, 2011).

Lacunas do conhecimento

De acordo com essa revisão bibliométrica, identificou-se algumas lacunas:

- - Devido a escória ser uma substância com características alcalinas, é gerado no filtro reativo de escória um efluente com pH elevado e não adequado ao parâmetro que atende à Resolução CONAMA número 430/2011 (seção III Art. 21), que é a resolução que dita as condições obrigatórias do lançamento direto dos efluentes oriundos dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário. Não foi identificadas pesquisas abordando esse assunto em uma escala de aplicação real. É de conhecimento que esse tratamento pode ocorrer por processos de acidificação com ácidos comerciais como o ácido sulfúrico, por técnicas de injeção de CO₂ ou por sistemas de aeração com ar.
- - Identificou-se a ausência de estudos com abordagem no refinamento estrutural para a identificação das fases cristalinas presentes no material precipitado através da indexação dos picos de Bragg. É importante que além da identificação dos precipitados, das suas morfologias, bem como suas composição químicas, que sejam identificadas quantitativamente as fases cristalográficas presentes, com os referidos parâmetros de rede e o volume das células unitárias dos cristais precipitados.

Conclusões

Conforme descrito nesta análise bibliométrica, uma maneira de remover o fósforo presente no esgoto sanitário é através da sua precipitação química com os íons metálicos presentes na escória de aço, sendo essa uma alternativa sustentável para a produção de fertilizantes fosfatados de liberação lenta.

A maioria das pesquisas que investigaram a remoção de fósforo através de filtros de escória (FRE) utilizaram granulometrias inferiores a 20 mm e efluente sintético. Além disso, apenas alguns estudos acompanharam a operação desses filtros por períodos superiores a um ano.

A recuperação de fósforo contido no esgoto sanitário através dos FRE é uma alternativa viável economicamente. O benefício não é apenas para as estações de tratamento de esgoto (ETE) que serão capazes de produzir um fertilizante comercializável, mas também para as usinas siderúrgicas, vista a grande necessidade do descarte correto das diversas tipologias de escórias produzidas durante a fabricação do aço.

Os resultados mostraram que os FREs possuem uma vida útil dependente da saturação do meio granular com os precipitados de fósforo e também pelo acúmulo de sólidos compostos por matéria orgânica. O tempo de vida útil pode ser alterado em função das características da escória, fundamentalmente pela sua granulometria e pelos parâmetros operacionais submetidos ao filtro, tais como a carga mássica e a carga hidráulica aplicadas ao FRE.

Verificou-se que uma alternativa para a minimização do lançamento dos sólidos com o intuito de aumentar a sua vida útil do FRE, é a instalação de uma tecnologia capaz de reter os sólidos do esgoto antes do mesmo ser lançado no FRE. Nesse caso, os *Wetlands* contruídos são alternativas com um excelente custo benefício e próprio a serem utilizados em regiões descentralizadas.

A interseção entre economia circular, sustentabilidade e a remoção de fósforo do esgoto com escória de aço oferece uma perspectiva promissora na abordagem dos desafios ambientais complexos. Ao adotar uma abordagem circular, utilizando subprodutos industriais como a escória de aço para resolver problemas de poluição hídrica, torna-se possível avançar em direção a sistemas mais sustentáveis e resilientes. Essa prática não apenas contribui para a conservação de recursos naturais, ao fechar o ciclo de materiais, mas também promove a preservação da qualidade da água e dos ecossistemas aquáticos. Além disso, ao integrar princípios de sustentabilidade e engenharia frugal, desenvolve-se soluções eficazes e de baixo custo, que são essenciais para a implementação em larga escala, especialmente em regiões com recursos limitados. Portanto, a combinação desses conceitos oferece uma abordagem holística e inovadora para enfrentar os desafios da poluição hídrica, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável e equitativo

Alguns desafios de pesquisas futuras envolvem o estudo da reversibilidade das reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução. Há também a necessidade das investigações no ramo da Ciência dos Materiais com a aplicação dos conhecimentos da cristalografia. É necessário estudar as propriedades cristalográficas dos precipitados formados nos FREs com foco nos índices cristalinos dos minerais formados, como os parâmetros de rede e o volume das suas respectivas células unitárias. Que são as características que determinará a eficiência das aplicações futuras desses precipitados como fontes fosfatadas na agricultura.

Referências bibliográficas

Ahmad, S. Z. N., Al-Gheethi, A., Hamdan, R., Othman, N. (2020) Efficiencies and mechanisms of steel slag with ferric oxides for removing phosphate from wastewater using a column filter system. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**(28), 35184–35194. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09582-7>

- Ahmad, S. Z. N., Hamdan, R., Al-Gheethi, A., Alkhadher, S., Othman, N. (2000) Removal of phosphate from wastewater by steel slag with high calcium oxide column filter system; efficiencies and mechanisms study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **95**(12), 3232–3240. <https://doi.org/10.1002/jctb.6501>
- Albert, M. (2019) Sustainable frugal innovation - The connection between frugal innovation and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, **237**, 117747. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117747>
- Amato Neto, J. (Organizador). (2011) *Sustentabilidade & Produção: Teoria e prática para uma gestão sustentável*, Editora Atlas. Acesso em 22 de outubro de 2023. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7956435/mod_resource/content/1/LIVRO%20SUSTENTABILIDADE%20%20PRODU%C3%87%C3%83O%20ED.ATLAS.pdf. 211pp.
- ANA, Agência Nacional de Águas (2017) *Atlas Esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília. Acesso em: 02 de janeiro de 2023. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoDeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. 92pp.
- Andrade Neto, C. O. (1997) *Simple systems for sanitary sewage treatment: Brazilian experience*. ABES, Rio de Janeiro, RJ, 301 pp.
- Androniceanu A, Kinnunen J, Georgescu I. (2021) Circular economy as a strategic option to promote sustainable economic growth and effective human development. *Journal of International Studies*, **14**(1), 60–73.
- Aria, M., Cuccurullo, C. (2017) Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, **11**(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Arshad, N. A. N. M., Hamdan, R. (2021) Study of Steel Slag Filter Unit as a Secondary Treatment System for Removing Total Phosphorus from Textile Industry Wastewater. *International Journal of Integrated Engineering*, **13**(3), 192–199. <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.03.023>
- Barca, C., Gérente, C., Meyer, D., Chazarenc, F., Andrès, Y. (2012) Phosphate removal from synthetic and real wastewater using steel slags produced in Europe. *Water Res* **46**(7), 2376–2384. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.012>
- Barca, C., Meyer, D., Liira, M., Drissen, P., Comeau, Y., Andrès, Y., Chazarenc, F. (2014) Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants: Removal mechanisms and performance. *Ecological Engineering*, **68**(1), 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.065>
- Barca, C., Troesch, S., Meyer, D., Drissen, P., Andrès, Y., Chazarenc, F. (2013) Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in constructed wetlands: Two years of field experiments. *Environmental Science and Technology*, **47**(1), 549–556. <https://doi.org/10.1021/es303778t>
- Barca, C., Roche, N., Troesch, S., Andrès, Y., Chazarenc, F. (2018) Modelling hydrodynamics of horizontal flow steel slag filters designed to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, **206**(1), 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.040>
- Brasil (2011) *Resolução CONAMA n°430, de 13 de maio de 2011*. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília.
- Carey, D. E., Yang, Y., Mcnamara, P. J., Mayer, B. K. (2016) Recovery of agricultural nutrients from biorefineries. *Bioresource Technology*, **215**(1), 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.093>
- Castro, G. S. A., Crusciol, C. A.C., Costa, C. H. M., FERRARI NETO, J., MANCURSO, M. A. C. (2016) Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000034>
- Chand, S., Paul, B., Kumar, M. (2016) A comparative study of physicochemical and mineralogical properties of LD slag from some selected steel plants in India. *Journal of Environmental Science and Technology*, **9**(1), 75–87. <https://doi.org/10.3923/jest.2016.75.87>
- Chen, X., Sun, X., Xu, P., Wang, S., Zhou, T., Wang, X., Yang, C., LU, Q. (2020) Optimal regulation of N/P in horizontal sub-surface flow constructed wetland through quantitative phosphorus removal by steel slag fed. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**(1), 5779-5787. <https://doi.org/s11356-019-06696-5>.

- Claveau-mallet, D.; Boutet, É., Comeau, Y. (2018) Steel slag filter design criteria for phosphorus removal from wastewater in decentralized applications. *Water Research*, **143**(1), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.032>
- Claveau-Mallet, D., Comeau, Y. (2020) Chemical Clogging and Evolution of Head Losses in Steel Slag Filters Used for Phosphorus Removal. *Water*, **12**(6), 1517. <https://doi.org/10.3390/w12061517>
- Claveau-Mallet, D., Comeau, Y. (2020) Chemical clogging and evolution of head losses in steel slag filters used for phosphorus removal. *Water (Switzerland)*, **12**(6). <https://doi.org/10.3390/w12061517>
- Claveau-Mallet, D., Courcelles, B., Pasquier, P., Comeau, Y. (2017) Numerical simulations with the P-Hydroslag model to predict phosphorus removal by steel slag filters. *Water Research*, **126**(1), 421-432. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.032>
- Claveau-Mallet, D., Seltani, H., Comeau, Y. (2020) Phosphorus removal and carbon dioxide capture in a pilot conventional septic system upgraded with a sidestream steel slag filter. *Water (Switzerland)*, **12**(1). <https://doi.org/10.3390/w12010275>
- Claveau-Mallet, D., Wallace, S., Comeau, Y. (2011) Model of phosphorus precipitation and crystal formation in electric arc furnace steel slag filters. *Environmental Science and Technology*, **46**(3), 1465–1470. <https://doi.org/10.1021/es2024884>
- Dacach, N. G. (1991) *Tratamento primário de esgoto*. Rio de Janeiro: Didática e Científica, p. 106.
- Dima, A., Bugheanu, A. M., Dinulescu, R., Potcovaru, A. M., Stefanescu, C. A., Marin, I. (2022) Exploring the Research Regarding Frugal Innovation and Business Sustainability through Bibliometric Analysis. *Sustainability*, **14**(3), 1326. <https://doi.org/10.3390/su14031326>
- Drizo, A., Comeau, Y., Forget, C., Chapuis, R. P. (2002) Phosphorus saturation potential: A parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems. *Environ. Sci. Technol.* **36**(21), 4642–4648. <https://doi.org/10.1021/es011502v>
- Dunets, C. S., Zheng, Y., Dixon, M. (2015) Use of phosphorus-sorbing materials to remove phosphate from greenhouse wastewater. *Environmental Technology (United Kingdom)*, **36**(14), 1759–1770. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1009497>
- Ensslin, L., Ensslin, S. R., Lacerda, R. T. O., Tasca, J. E. (2010) ProKnow-C, Knowledge Development Process – Constructivist. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Rio de Janeiro: INPI.
- Ezeudu, O. B., Agunwamba, J. C., Ugochukwu, U. C., Oraelosi, T. C. (2022) Circular economy and frugal Innovation: a conceptual nexus. *Environmental Science Pollution Research*. **29**(1), 29719-29734. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18522-6>
- Geissdoefer, M., Savaget, P., Bocker, N.M.P., Hultink, E.J. (2017) The Circular Economy- A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gomes, H. I., Funari, V., Mayes, W. M., Rogerson, M., Prior, T. J. (2018) Recovery of Al, Cr and V from steel slag by bioleaching: Batch and column experiments. *Journal of Environmental Management*, **222**(1), 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.056>
- Gonzalez, J. M., Penn, C. J., Livingston, S. J. (2020) Utilization of Steel Slag in Blind Inlets for Dissolved Phosphorus Removal. *Water*, **12**(6), 1593. <https://doi.org/10.3390/w12061593>
- Hamdan, R., Arshad, N. A. N. M., Ahmad, S. Z. N. (2018) The effects of PO_4^{3-} removal from aqueous solution with varied concentrations of metal oxides in steel slag filter system. *Journal of Physical Science*, **29**(1), 71–80. <https://doi.org/10.21315/jps2018.29.s3.9>
- Hukari, S., Hermann, L., Nätörp, A. (2016) From wastewater to fertilisers - Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling. *Science of the Total Environment*, **542**(1), 1127–1135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.064>
- Kahle, H.N., Anna, D., Ernst, P., Prabhu, J. (2013) The democratizing effects of frugal innovation: Implications for inclusive growth and state-building. *J. Indian Bus. Res.*, **5**(1), 220–234.

- Kim, B. C., Kim, M., Choi, Y., Nam, K. (2018) Effect of basic oxygen furnace slag addition on enhanced alkaline sludge fermentation and simultaneous phosphate removal. *Journal of Environmental Management*, **239**(1), 66–72, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.043>
- Kuwahara, Y., Yamashita, H. (2017) Phosphate removal from aqueous solutions using calcium silicate hydrate prepared from blast furnace slag. *ISIJ International*, **57**(9), 1657–1664. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-123>
- Kwon, G., Kang, J., Nam, J., Kim, Y., Jahng, D. (2019) Struvite production from anaerobic digestate of piggery wastewater using ferronickel slag as a magnesium source. *Environmental Technology (United Kingdom)*, **42**(3), 429–443. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1631390>
- Liu, M., Liu, X., Wang, W., Guo, J. (2020) Phosphorus removal from wastewater using electric arc furnace slag aggregate. *Environmental Technology*. **43**(1),1-26. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1774664>
- Liu, X., Yuan, L., Yuan, Y., Liu, S. (2019) Phosphorus removal from wastewater by steel slag ceramsite filter. *Nature Environment and Pollution Technology*, **18**(2), 579-585 ISSN: 2395-3454.
- Lu, H., Xiao, L., Wang, T., Lu, S., Wang, H., Guo, X., Li, J. (2021) The application of steel slag in a multistage pond constructed wetland to purify low-phosphorus polluted river water. *Journal of Environmental Management*, **292**(9)(112578). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112578>
- Mahler, R. L. Nutrients plants require for growth. CIS 1124, College of Agriculture and Life Sciences, University of Idaho. Acceso em: 10/04/2022. Disponible em: <https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/CIS/CIS1124.pdf>
- Medeiros, D. L., Queiroz, L. M., Cohim, E., Almeida-Neto, J. A., Kiperstok, A. (2020) Human urine fertiliser in the Brazilian semi-arid: Environmental assessment and water-energy-nutrient nexus. *Science of the Total Environment*, **713**(1), 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136145>
- Molina-Maturan, J., Bucher, J., Speelman, S. (2020) Understanding and evaluating the sustainability of frugal water innovations in México: An exploratory case study. *Journal of Cleaner Production*, **274**(1). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122692>
- Montalvo, D., McLaughlin, M. J., Degryse, F. (2015) Efficacy of Hydroxyapatite Nanoparticles as Phosphorus Fertilizer in Andisols and Oxisols. *Soil Fertility & Plant Nutrition*, **79**(1), 551–558. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.09.0373>
- Nedelciu, C. E., Ragnarsdottir, K. V., Schlyter, P., Stjernquist, I. (2020) Global phosphorus supply chain dynamics: Assessing regional impact to 2050. *Global Food Security*, **26**(1). <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100426>
- Osaki, M. (2022) *After a month, Russia-Ukraine war still concerns the fertilizer sector*. CEPEA - Center for Advanced Studies on Applied Economics. Acceso em: 09/04/2022. Disponible em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/en/opinion/after-a-month-russia-ukraine-war-still-concerns-the-fertilizer-sector.aspx>
- Osório, V. K. L., Oliveira, W. (2001) Polyphosphates in commercial powder detergents. *Química Nova*, **24**(5). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000500019>
- Pacheco, J. E., Pessôa, Arruda, C. (2011) *Tratamento de esgotos domésticos*. 6 ed. ABES, Rio de Janeiro, 1050 pp.
- Paiva, R. F. Da P. De S., De Souza, M. F. DA P. (2018) Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. *Cadernos de Saude Pública*, **34**(1), 1–11. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00017316>
- Park, T., Ampunan, V., Maeng, S., Chung, E. (2017) Application of steel slag coated with sodium hydroxide to enhance precipitation-coagulation for phosphorus removal. *Chemosphere*, **167**(1),91–97. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.150>
- Pramanik, B. K., Islam, M. A., Asif, M. B., Roychand, R., Pramanik, S. K., Shah, K., Bhuiyan, M., Hai, F. (2020) Emerging investigator series: Phosphorus recovery from municipal wastewater by adsorption on steelmaking slag preceding forward osmosis: An integrated process. *Environmental Science: Water Research and Technology*, **6**(6), 1559–1567. <https://doi.org/10.1039/d0ew90029j>

- Prasad, R. (2009) Efficient fertilizer use: The key to food security and better environment. *Journal of Tropical Agriculture*, **47**(1), 1–17 Acceso em: 19/05/2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267261093_Efficient_fertilizer_use_The_key_to_food_security_and_better_environment
- Prosab. (2009) *Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção*. Francisco Suetônio Bastos Mota e Marcos von Sperling (coordenadores) e outros (29 autores). ABES, Rio de Janeiro. 428 pp. ISBN: 978-85-7022-164-3.
- Qteishat, O., Myszograj, S., Suchowska-Kisielewicz, M. (2011) Changes of wastewater characteristic during transport in sewers. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, **7**(1). Acceso em: 27/02/2022. Disponível em: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/environment/2011/54-608.pdf>
- Ragnarsdottir, K. V., Sverdrup, H. U., Koca, D. (2011) Challenging the planetary boundaries I: Basic principles of an integrated model for phosphorous supply dynamics and global population size. *Applied Geochemistry*, **26**(1), 303–306. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.088>
- Shen, D. H., Wu, C. M., Du, J. C. (2009) Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, **23**(1), 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- Simpson, E. Ukraine war 'catastrophic for global food'. Business correspondent, BBC News. 7 de março de 2022. Acceso em: 01/04/2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/business-60623941>
- Sun, S., Feng, C., Tong, S., Zhao, Y., Chen, N., Zhu, M. (2021) Evaluation of advanced phosphorus removal from slaughterhouse wastewater using industrial waste-based adsorbents. *Water Science and Technology*, **83**(6), 1407–1417. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.069>
- Sun, S., Gao, M., Wang, Y., Qio, Q.; Han, J.; Qio, L.; Feng, Y. (2021) Phosphate removal via biological process coupling with hydroxyapatite crystallization in alternating anaerobic/aerobic biofilter reactor. *Bioresource Technology*, **326**(1). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124728>
- Tawfik, A., Bakr, M. H., Nasr, M., Haider, J., Mesfer, M. K. AL., Lim, H., Qyyum, M. A., Lam, S. S. (2022) Economic and environmental sustainability for anaerobic biological treatment of wastewater from paper and cardboard manufacturing industry. *Chemosphere*, **289**(1). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133166>
- Valsami-Jones E. (2001) Mineralogical controls on phosphorus recovery from wastewaters. *Mineral Mag*, **65**(5):10.
- Viegas, C. V., Bond, A. J., Vaz, C. R., BORCHARDT, M., PEREIRA, G. M., SELIG, P. M., VARAVAKIS, G. (2016) Critical attributes of Sustainability in Higher Education: a categorisation from literature review. *Journal of Cleaner Production*, **126**(1), 260-276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.106>
- Vu, M. T., Duong, H. C., Wang, Q., Ansari, A., Xai, Z., Hoang, N. B., Nghiem, L. D. (2023) Recent technological developments and challenges for phosphorus removal and recovery toward a circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, **30**(May 2023), 1031141. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103114>
- Vu, M. T., Nguyen, L. N., Johir, M. A. H., Ngo, H. H., Skidmore, C., Fontana, A., Galway, B., Bustamante, H., Nghiem, L. D. (2021) Phosphorus removal from aqueous solution by steel making slag – Mechanisms and performance optimisation. *Journal of Cleaner Production*, **284**(February 2021) 124753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124753>
- Wang, G., Gao, J., Yang, R., Zhang, J., Guo, H., Gao, J. (2019) Preparation of sustainable non-combustion filler substrate from waterworks sludge/aluminum slag/gypsum/silica/maifan stone for phosphorus immobilization in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, **80**(1), 153–163. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.258>
- Westholm, L. J. (2006) Substrates for phosphorus removal - Potential benefits for on-site wastewater treatment? *Water Research*, **40**(2), 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.006>
- Xu, R. Zhang.; Liu. Rong. Cao, Y. Wang, G. Ji, L. Xu, Y. (2019) Effects of different substrates on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**(16), 16229–16238. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04945-1>
- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., Chen, H. (2012) An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*, **16**(3), 791–801. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>

- Yildirim, I. Z., Prezzi, M. (2011) Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*. **2011**(1), 463638. <https://doi.org/10.1155/2011/463638>
- Yousaf, Z, Panait, M., Tanveer, U., Cretu, A., Hrebenciuc, A., Zahid, S. M. (2022) Value Creation through Frugal Innovation, Innovation Capability and Knowledge Sharing in a Circular Economy. *Sustainability*, **14**(14), 8504. <https://doi.org/10.3390/su14148504>
- Yuan, Z., Fu, S., Xu, X., Wendling, L. A. (2017) Mineral Processing Residue Use as Substrate in a Modular Engineered Wetland for Wastewater Treatment. *Environmental Processes*, **4**(3), 523–547. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0247-6>
- Zancheta, P. G. (2007) *Recuperação e tratamento da urina humana para uso agrícola*, Dissertação Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 83 pp.
- Zuo, M., Renman, G., Gustafsson, J. P., Klysubun, W. (2018) Dual slag filters for enhanced phosphorus removal from domestic wastewater: performance and mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(8), 7391-7400. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0925-y>



REVISTA AIDIS

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

AS CONTRIBUIÇÕES DA RECICLAGEM PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

* Janaína Aparecida Cezário ¹
Maxsuel Bezerra do Nascimento ²
Laércio Leal dos Santos ¹
William de Paiva ¹

THE CONTRIBUTIONS OF RECYCLING TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT: A BIBLIOGRAPHIC REVIEW

Recibido el 4 de octubre de 2023. Aceptado el 8 de enero de 2024

Abstract

This paper presents a bibliographic review on the contributions of recycling to sustainable development. The contemporary scenario demands bold solutions for the harmonious coexistence of economic progress and environmental preservation. In this context, recycling emerges as a key player, orchestrating a series of significant contributions to sustainable development. Recycling is discussed as a fundamental strategy for solid waste reduction, preservation of natural resources, and promotion of more efficient materials management, as well as a source of job creation and social inclusion. Through the analysis of studies from different authors, the paper examines how recycling contributes to the reduction of environmental pollution, generation of employment and income, social inclusion, and environmental awareness. Furthermore, the implications of recycling in specific sectors, such as the construction industry, are explored. The bibliographic review demonstrates the relevance of recycling as a key tool in the pursuit of more sustainable development, emphasizing its ability to promote circular economy principles and social cohesion.

Keywords: solid waste, resource preservation, environmental awareness, social inclusion, circular economy.

¹ Universidade Estadual da Paraíba, Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

*Autor correspondente: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba Campus Universitário, s/n, Bodocongó, Campina Grande/PB, CEP: 58109-790, Brasil. Email: ja_nayna2@yahoo.com.br

Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre as contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável. O cenário contemporâneo exige soluções para a coexistência harmoniosa entre avanço econômico e preservação ambiental. Nesse contexto, a reciclagem emerge como uma peça-chave, orquestrando uma série de contribuições significativas para o desenvolvimento sustentável. A reciclagem é discutida como uma estratégia fundamental para a redução de resíduos sólidos, a preservação de recursos naturais e a promoção de uma gestão mais eficiente dos materiais, como também, uma fonte de criação de empregos e inclusão social. Através da análise de estudos de diferentes autores, examina-se como a reciclagem contribui para a diminuição da poluição ambiental, a geração de emprego e renda, a inclusão social e a conscientização ambiental. Além disso, são exploradas as implicações da reciclagem em setores específicos, como a construção civil. A revisão bibliográfica demonstra a relevância da reciclagem como uma ferramenta chave na busca por um desenvolvimento mais sustentável, enfatizando sua capacidade de promover a economia circular e a coesão social.

Palavras-chave: resíduos sólidos, preservação de recursos, conscientização ambiental, inclusão social, economia circular.

Introdução

A busca pelo desenvolvimento sustentável tornou-se uma prioridade global, encontrando um equilíbrio entre o progresso econômico, a justiça social e a conservação ambiental. Neste contexto, a reciclagem surge como uma ferramenta poderosa para atingir estes objetivos, oferecendo soluções concretas para mitigar os efeitos negativos do consumo e da produção descontrolados.

A reciclagem é uma prática essencial que desempenha um papel significativo no caminho em direção ao desenvolvimento sustentável. Por meio da coleta, triagem e processamento de materiais descartados, a reciclagem oferece uma série de contribuições cruciais que beneficiam o meio ambiente, a economia e a sociedade como um todo. (Fialho *et al.*, 2023)

Segundo o mesmo autor, a informação ambiental permeia todo o trabalho dos colaboradores, desde o recolhimento dos Resíduos Sólidos (RS), passando pela confecção dos produtos e chegando a divulgação e a promoção da educação ambiental nas redes sociais. De maneira abrangente, a informação ambiental desempenha um papel direcionador na condução das apresentações efetuadas em escolas, feiras e outros locais, sobretudo quando se aborda tópicos relacionados a materiais reciclados e coleta seletiva. É enfatizada a identificação dos impactos adversos dos RS nos cursos d'água, no solo, na vegetação e nas espécies, além do período necessário para a degradação, caso ocorra um destino adequado.

Soares (2019) menciona que uma das principais contribuições da reciclagem está na conservação dos recursos naturais. Ao aproveitar materiais recicláveis, como metais, papel, plástico e vidro

reduz-se a necessidade de extrair matérias-primas virgens do meio ambiente. Isso, por sua vez, preserva habitats naturais, reduz a degradação ambiental e minimiza os impactos negativos da exploração excessiva dos recursos naturais.

Para Soares (2019):

“No cenário brasileiro foi inserida a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual prioriza a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos RS e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, em prol de um gerenciamento ambientalmente adequado. O manejo inadequado desses resíduos, como os casos de disposições finais em lixões a céu aberto, interfere negativamente no desenvolvimento sustentável do meio ambiente uma vez que estes liberam agentes poluentes que afetam água, solo e ar, além de propiciar proliferação de vetores de diversas doenças. (Soares, 2019)”

Além disso, a reciclagem desempenha um papel fundamental na redução de resíduos sólidos. Em vez de enviar toneladas de lixo para aterros sanitários, a reciclagem permite que esses materiais sejam reutilizados na fabricação de novos produtos. Isso não apenas diminui a pressão sobre os locais de descarte, mas também evita a contaminação do solo e da água por materiais poluentes e nocivos. (Horst; Freitas, 2016)

De acordo com Peron *et al.* (2023) outro benefício da reciclagem é a economia de energia e a redução das emissões de gases de efeito estufa. A produção a partir de materiais reciclados geralmente requer uma menor quantidade de energia do que a produção a partir de matérias-primas virgens. Logo, isso resulta em menor consumo de recursos energéticos não renováveis e na emissão reduzida de poluentes atmosféricos, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas.

Segundo Peron, *et al.* (2023):

“A reciclagem é ambientalmente correta, pois é capaz de proporcionar o uso de resíduos em forma de matéria-prima reciclada e poupar recursos naturais. Também é socialmente justa, pois possibilita gerar renda e melhores condições de trabalho para os coletores quando organizados em associações e cooperativas. E, por fim, quanto ao pilar econômico, é capaz de gerar receita para as cooperativas de reciclagem, diminuir os investimentos em áreas para a construção de aterros sanitários e servir como diferencial competitivo, quando usada pelas empresas. (Peron et al., 2023)”

A reciclagem também desempenha um papel fundamental na promoção de empregos e no estímulo à economia. A indústria da reciclagem cria oportunidades de trabalho em várias etapas do processo, desde a coleta até o processamento e a comercialização dos materiais reciclados. Esses empregos verdes não apenas contribuem para a geração de renda, mas também fortalecem as economias locais e regionais. (Macedo *et al.*, 2021)

Segundo Macedo *et al.* (2021), o trabalho de reciclagem não é de conhecimento geral da população, onde os catadores são de certa forma desvalorizados socialmente, por mais que esses catadores trabalhem em situações insalubres, por muitas vezes, para garantir que esses RS não sejam descartados de forma incorreta em todo o espaço urbano ou até mesmo no meio ambiente fazendo com que não se tenham impactos negativos gerados.

Costa (2019) cita que além dos aspectos econômicos, a reciclagem fomenta a inovação tecnológica. A busca por soluções eficientes de reciclagem incentiva o desenvolvimento de novas tecnologias para a recuperação de materiais, o aprimoramento de processos de triagem e a criação de novos produtos feitos a partir de materiais reciclados. Isso impulsiona a economia do conhecimento e contribui para o avanço sustentável das sociedades.

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo analisar as contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável, investigando como essa prática influencia a conservação de recursos naturais, a redução de resíduos, a economia de energia e a promoção de empregos, a fim de fornecer *insights* para a formulação de políticas e estratégias que promovam a adoção mais ampla da reciclagem na sociedade.

Como podemos superar os desafios relacionados à falta de adoção plena da prática de reciclagem em muitas sociedades, considerando os impactos ambientais negativos resultantes, como a degradação de recursos naturais e a acumulação excessiva de resíduos? Além da subexploração dos benefícios econômicos e sociais da reciclagem para facilitar uma transição mais eficaz em direção a uma economia verdadeiramente sustentável.

Justificativa

A importância da reciclagem no contexto do desenvolvimento sustentável é indiscutível, no entanto, a compreensão abrangente de suas contribuições específicas é fundamental para orientar políticas públicas, práticas empresariais e comportamentos individuais.

Assim, este estudo visa preencher essa lacuna ao analisar de forma sistemática as diversas dimensões das contribuições da reciclagem, fornecendo evidências sólidas para embasar decisões e ações voltadas para a promoção da sustentabilidade ambiental, a redução de impactos negativos e o estímulo ao crescimento econômico por meio de práticas mais responsáveis e conscientes.

Portanto, a pesquisa também contribuirá para aumentar a conscientização pública sobre os benefícios da reciclagem e incentivará a adoção generalizada dessa prática essencial para a construção de um futuro mais equilibrado e saudável para as gerações presente e futuras.

Metodologia

Tipologia do estudo

Nesse estudo foi feita uma revisão de literatura do tipo integrativa, explicativa com abordagem qualitativa, onde foram utilizadas fontes secundárias referentes à temática em questão.

De acordo com Ercole, Melo e Alcoforado (2014), a revisão integrativa de literatura é um método que tem como finalidade sintetizar resultados obtidos em pesquisas de maneira sistemática, ordenada e abrangente, mediante diferentes metodologias. É denominada integrativa porque fornece informações mais amplas sobre um assunto, constituindo um corpo de conhecimento e podendo ser direcionada para a definição de conceitos, revisão de teorias ou análise metodológica dos estudos.

A Pesquisa qualitativa é uma classificação do método científico que utiliza diferentes técnicas estatísticas para quantificar opiniões e informações para um determinado estudo. Ela é realizada para compreender e enfatizar o raciocínio lógico e todas as informações que se possam mensurar sobre as experiências humanas. (Augusto *et al.*, 2013). Dessa forma, para Menezes *et al.* (2019), uma pesquisa exploratória é aquela que não busca uma resposta específica e definitiva acerca do objeto de estudo. Na realidade, o método exploratório tenta compreender mais aspectos sobre o tema, buscando especificar mais o assunto.

Coleta de dados

Para a realização da presente revisão da literatura houve uma busca integrada no Google Acadêmico que permitiu a localização simultânea de estudos nas bases de dados *SciELO*. A *SciELO* (*Scientific Electronic Library Online*) é uma base de dados bibliográficos e de acesso aberto que abrange uma ampla gama de periódicos científicos e acadêmicos. A plataforma foi criada com o objetivo de aumentar a visibilidade, acessibilidade e qualidade da produção científica, contribuindo para a disseminação do conhecimento e o avanço da pesquisa.

Crítérios de inclusão e exclusão dos estudos

Os critérios de inclusão dos estudos foram artigos completos relacionadas à pesquisa (segurança da informação: desafios e soluções para proteger dados confidenciais em ambientes corporativos) tempo do artigo (últimos 10 anos), idioma (português), tipo de estudo (artigos) e base de dados (*SciELO*). Os critérios para exclusão da pesquisa foram: textos incompletos, resumos, teses, artigos que fogem à temática e artigos duplicados.

Caracterização e análise dos dados

Para tanto foi realizada a seguinte sequência de busca: 1ª etapa- pesquisa dos descritores cadastrados; 2ª etapa- busca nas bases de dados; 3ª etapa- leitura dos títulos dos estudos; 4ª etapa- leitura dos resumos dos artigos selecionados; 5ª etapa- leitura na íntegra dos artigos selecionados a partir da associação dos descritores.

Continuamente foram examinadas as referências de artigos selecionados para identificar aqueles que não serão cobertos pela busca. Finalizada a coleta de dados, foi realizada uma análise dos objetivos e resultados de todos os estudos a fim de obter os pontos de partida e desfechos que mais fundamentam o tema pesquisado.

Aspectos éticos

Quanto aos aspectos éticos, por se tratar de uma pesquisa bibliográfica, o presente estudo não necessitou passar por avaliação de um comitê de ética em pesquisa. Também não houve necessidade de solicitar permissão aos autores, visto que não houve prejuízo aos princípios da bioética em pesquisas e os mesmos, por serem publicações eletrônicas disponíveis nos bancos de dados *online* da rede universal de dados (*Internet*), são de livre acesso a todos.

Resultados e discussão

A discussão sobre as contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável, com base na análise dos autores apresentados na Tabela 1, revela uma convergência de ideias e evidências que destacam a importância crucial da reciclagem como uma ferramenta significativa na busca por um futuro mais equilibrado e saudável para o planeta. Cada autor aborda o tema de maneira única, mas juntos fornecem uma visão abrangente das várias dimensões das contribuições da reciclagem para a sustentabilidade.

Donato *et al.* (2015) enfatizam que a reciclagem desempenha um caminho viável em direção ao desenvolvimento sustentável. Eles destacam que a reciclagem não apenas reduz a quantidade de resíduos sólidos depositados em aterros sanitários, mas também promove uma maior conscientização ambiental na sociedade, gerando uma mudança de mentalidade em relação ao consumo e ao descarte de produtos.

Horst e Freitas (2016) abordam a reciclagem como uma tecnologia social, enfatizando seus impactos sociais e econômicos. Eles apontam que a reciclagem não apenas reduz resíduos, mas também gera oportunidades de emprego e renda para recicladores e cooperativas, promovendo a inclusão social e contribuindo para a melhoria das condições de vida das comunidades.

A pesquisa de Reis e Pontes (2019) ressalta a importância e os benefícios que a reciclagem no contexto da sustentabilidade nos proporciona, apresenta tanto benefícios econômicos, sociais e ambientais. Além de proporcionar inclusão social e geração de emprego e renda a catadores, pode-se dizer que a reciclagem de resíduos sólidos pode contribuir para o desenvolvimento sustentável no país, atendendo aos âmbitos que são proporcionados.

Tabela 1. Caracterização dos artigos

Autores	Ano	Objetivos	Resultado Principal
Donato, <i>et al.</i>	2015	Investigar o papel da reciclagem no desenvolvimento sustentável	Identificaram que a reciclagem contribui para a redução de resíduos sólidos e preservação ambiental promovendo uma maior conscientização da sociedade.
Horst; Freitas	2016	Analisar a reciclagem como tecnologia social para o desenvolvimento sustentável.	Concluíram que a reciclagem, como tecnologia social, pode promover inclusão social, geração de renda e redução da pressão sobre os recursos naturais.
Reis; Pontes	2019	Estudo sobre a condição atual dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil e a viabilidade econômica e socioambiental no processo de reciclagem, análise no contexto da sustentabilidade.	No contexto da sustentabilidade, concluíram que a reciclagem apresenta tanto benefícios econômicos quanto socioambientais, constituindo assim, uma alternativa economicamente viável.
Soares	2019	Avaliar a reciclagem de resíduos sólidos na busca pela sustentabilidade	Mostra que a reciclagem contribui para a diminuição do gás ambiental e a conservação dos recursos naturais, promovendo uma gestão mais eficiente dos resíduos sólidos.
Macedo, <i>et al.</i>	2021	Investigar as contribuições sociais e ambientais da reciclagem de resíduos sólidos.	Identificaram que a reciclagem realizada por recicladores e ferros velhos contribui para a diminuição de resíduos no ambiente e para a geração de emprego e renda.
Peron, <i>et al.</i>	2023	Estudar as contribuições da reciclagem em uma cooperativa de recicladores.	Demonstraram que a reciclagem pode gerar benefícios biológicos e sociais, promovendo a melhoria das condições de vida dos recicladores e a redução do desperdício.
Fialho, <i>et al.</i>	2023	Investigar o papel da coleta seletiva solidária na promoção do desenvolvimento sustentável.	Constataram que a coleta seletiva solidária contribui para a redução do descarte inadequado de resíduos, promovendo uma conscientização ambiental e a participação da comunidade.

A pesquisa de Soares (2019) reforça essa ideia ao ressaltar que a reciclagem desempenha um papel fundamental na redução da poluição ambiental e na preservação de recursos naturais finitos. Através da reutilização de materiais, a reciclagem contribui para minimizar a extração de matérias-primas, como minerais e petróleo, resultando em menos degradação ambiental e em uma gestão mais eficiente dos recursos.

Macedo *et al.* (2021) ampliam as discussões ao analisar as contribuições sociais e ambientais dos recicladores e ferros velhos. Eles destacam que esses atores desempenham um papel crucial na coleta e reciclagem de resíduos, reduzindo a quantidade de resíduos no ambiente e contribuindo para a economia circular, na qual os materiais são reutilizados.

O estudo de Peron *et al.* (2023) reforça essa perspectiva ao investigar a reciclagem em uma cooperativa de recicladores. Ele demonstra como a reciclagem pode ser uma fonte de subsistência para os recicladores, contribuindo para a diminuição do desperdício e para a sustentabilidade econômica desses trabalhadores.

Por fim, a pesquisa de Fialho *et al.* (2023) enfoca a coleta seletiva solidária como uma estratégia para o desenvolvimento sustentável. Eles demonstram como a participação ativa da comunidade na coleta seletiva não apenas contribui para a redução de resíduos, mas também promove a conscientização ambiental e a coesão social.

Em conjunto, os autores analisados convergem para a conclusão de que a reciclagem desempenha um papel fundamental no desenvolvimento sustentável, abordando diversos aspectos, desde a redução de resíduos e a preservação de recursos naturais até a inclusão social e a conscientização ambiental. Através de suas pesquisas, eles fornecem uma base sólida para a compreensão da relevância da reciclagem como um instrumento chave na construção de um futuro sustentável para as próximas gerações.

Conclusão

As contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável são de vital importância para a construção de um futuro resiliente e equilibrado. Ao adotarmos práticas de reciclagem, estamos comprometidos com a preservação do nosso planeta e com a melhoria da qualidade de vida das gerações atuais e vindouras.

A reciclagem desencadeia um ciclo virtuoso, onde materiais descartados são transformados em recursos valiosos, reduzindo a dependência de matérias-primas virgens e minimizando a exploração dos recursos naturais finitos. Essa abordagem não apenas conserva o ambiente, mas também impulsiona a economia, criando empregos em setores relacionados à coleta, processamento e produção de produtos reciclados.

Além de todos os pontos destacados, a reciclagem reduz o desperdício, desviando uma quantidade significativa de resíduos de aterros sanitários e incineradores. Isso por sua vez contribui para a redução da poluição do solo, da água e do ar, bem como das emissões de gases de efeito estufa, auxiliando na mitigação das mudanças climáticas.

Ao promover a educação ambiental e a conscientização pública, a reciclagem também engaja as comunidades e promove um consumo mais responsável. A adoção de hábitos de reciclagem demonstra nosso compromisso em fazer escolhas sustentáveis e em tomar medidas concretas para proteger o meio ambiente.

Portanto, ao reconhecermos as inúmeras contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável, estamos investindo no futuro de nosso planeta. A implementação eficaz de políticas de reciclagem, juntamente com a participação ativa de governos, indústrias e da comunidade, desempenha um papel crucial na construção de um mundo mais harmonioso, onde os recursos são usados com responsabilidade e respeito com a natureza.

Por fim, a reciclagem não é apenas uma ação isolada, é a base de uma sociedade verdadeiramente sustentável e de um legado duradouro para as gerações futuras.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental e ao Grupo de pesquisa GpTeca.

Referências

- Augusto, C. A., Souza, J. P. D., Dellagnelo, E. H. L., Cario, S. A. F. (2013) Pesquisa Qualitativa: rigor metodológico no tratamento da teoria dos custos de transação em artigos apresentados nos congressos da Sober (2007-2011) *Revista de Economia e Sociologia Rural*, **51**, 745-764.
- Costa, M. M. (2019) Um estudo sobre a sustentabilidade. [Monografia]. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. <http://hdl.handle.net/1843/30920>
- Donato, L. A., Barbosa, M. D. F. N., Barbosa, E. M. (2015) Reciclagem: o caminho para o desenvolvimento sustentável. *Polêmica*, **15**(2), 023-034. <https://doi.org/10.12957/polemica.2015.17838>
- Macedo, V. H. de M., Moraes, G. H. S. M. de, do Prado, N. B. (2021) As contribuições sociais e ambientais dos recicladores e dos ferros velhos para os canais reversos de resíduos sólidos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **10**(2), 125-149. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e22021125-149>
- Ercole, F. F., Melo, L. S. D., Alcoforado, C. L. G. C. (2014) Revisão integrativa versus revisão sistemática. *Reme: Revista Mineira de Enfermagem*, **18**(1), 09-11
- Fialho, J., Santos, F. B. D., Santos, C. D., Thompson, M. (2023) Informação ambiental para o desenvolvimento sustentável: coleta seletiva solidária de materiais recicláveis pela Associação Gota do Óleo (AGO) de Eunápolis, BA. *Encontros Bibli*, **28**, e89667. <https://doi.org/10.5007/1518-2924.2023.e89667>
- Horst, L. V. M., Freitas, C. C. G. (2016) Desenvolvimento sustentável e inovação social: a reciclagem sob a perspectiva da tecnologia social. *Revista Tecnologia e Sociedade*, **12**(26), 20-41. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496654013003>
- Menezes, A. H. N., Duarte, F. R., Carvalho, L. O. R., Souza, T. E. S. (2019) Metodologia científica: a teoria e aplicação na educação a distância. *Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina-PE*, 1-84.



- Peron, C., Cintrão, J. F. F., Gallo, Z., Mello, F. O. T. de. (2023) As contribuições da reciclagem para o desenvolvimento sustentável: estudo de caso na Cooperativa dos Recicladores de Penápolis/SP (Corpe) RACE - *Revista De Administração, Contabilidade E Economia*, 1–20. <https://doi.org/10.18593/race.30830>
- Reis, A. C. M., Pontes, A. N. (2019) Resíduos sólidos urbanos no Brasil: a reciclagem no contexto da sustentabilidade. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (11), 6. <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/11/residuos-solidos-brasil.html>
- Soares, S. A. (2019) A relevância da reciclagem de resíduos sólidos para a sustentabilidade. [Dissertação de pós-graduação] Instituto federal de educação, ciência e tecnologia Goiano, Iporá.



REVISTA AIDIS

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

REGULAÇÃO DE SERVIÇOS DE SANEAMENTO: AVANÇOS, NECESSIDADES DE MELHORIA E OPORTUNIDADES EM MUNICÍPIOS DE PEQUENO PORTE NO ESTADO DO MARANHÃO

Joel Carlos Zukowski Junior¹

Demétrius Jung Gonzalez²

André Pereira Raposo³

* Rhaifran Roberth Queiroz de Lemos⁴

REGULATION OF SANITATION SERVICES: ADVANCES, IMPROVEMENT NEEDS AND OPPORTUNITIES IN SMALL MUNICIPALITIES IN THE STATE OF MARANHÃO

Recibido el 23 de octubre de 2023. Aceptado el 21 de junio de 2024

Abstract

This study aimed to assess the current regulatory framework for sanitation applied to public water supply in small municipalities within the Southwest Maranhão Metropolitan Region. The primary objective was to propose a regulatory model for environmental sanitation in these municipalities. The methodological approach involved a systematic literature review, data collection, and analysis of the historical context of sanitation regulation in the state of Maranhão. Additionally, a regulatory exposure model was proposed for the Southwest Maranhão Metropolitan Region. The findings revealed the existence of universalization goals for basic sanitation services in the state of Maranhão, with specific targets for service coverage and quality to ensure equitable and adequate access for the entire population. However, the study also identified challenges related to water quality and solid waste management. These findings provide valuable insights for implementing regulatory exposure as a more efficient and sustainable strategy for sanitation services in this region. Regulatory exposure entails the clear and accessible dissemination of information to the public regarding the sanitation actions undertaken by the concessionaire and their corresponding outcomes.

Keywords: environmental sanitation, governance, regulation.

¹ Universidade Federal do Tocantins, Brasil.

² Agência Reguladora Intermunicipal de Saneamento do Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Centro Universitário Católica do Tocantins, Brasil.

⁴ Universidade Federal do Tocantins, Brasil.

* *Autor correspondal:* Universidade Federal do Tocantins, Brasil. Quadra 109 Norte, Avenida NS-15, ALCNO-14, CEP 77001-090, Palmas/TO, Brasil. Email: rhaifran.lemos@mail.uft.edu.br

Resumo

Este trabalho tratou de conhecer a situação da regulação no saneamento aplicado ao abastecimento público de água nos municípios de pequeno porte inseridos na região metropolitana do sudoeste Maranhense, cujo objetivo principal foi apresentar proposta da regulação em saneamento ambiental nesses municípios. Metodologicamente, foi realizada revisão sistemática de literatura com levantamento de dados, histórico de regulação no saneamento no estado do Maranhão, além de ter sido apresentada proposta de modelo de regulação por exposição para a região metropolitana do sudoeste maranhense. Os resultados demonstram a existência de metas de universalização para os serviços de saneamento básico no estado do Maranhão, com objetivos a serem alcançados em termos de cobertura e qualidade dos serviços, visando assegurar o acesso igualitário e adequado a toda a população. Demonstram também problemas relacionados à qualidade da água e à gestão dos resíduos sólidos. Tais resultados fornecem subsídios importantes para instituir a regulação por exposição para os serviços de saneamento como estratégia mais eficiente e sustentável nesse setor, a partir da divulgação clara e acessível de informações à sociedade sobre as ações de saneamento da concessionária e seus resultados.

Palavras-chave: saneamento ambiental, governança, regulação.

Introdução

Tratar do saneamento ambiental, além da responsabilidade do Estado para com o direito humano à água de qualidade, também pode ser visto pela lente da economia quando gera uma série de externalidades positivas, como por exemplo, à saúde pública, ao meio ambiente, à qualidade de vida e, também, à geração de renda.

Segundo dados do *Joint Monitoring Programme (JMP)* – da Organização Mundial da Saúde (OMS) e Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) sobre abastecimento de água, saneamento e higiene, o Brasil está em uma posição média no mundo em termos de saneamento. Com base em dados da OMS e Unicef, em 2020, o Brasil ficou em 101º lugar em termos de higiene básica no mundo, incluindo 195 países no mundo (Cucolo, 2023).

Nesse cenário, o país aprovou a Lei nº 14.026/2020 que estabelece o marco legal do saneamento básico, cuja meta principal e mais desafiadora é a universalização dos serviços de água e esgoto até o ano de 2033. Entende-se como desafiador porque, conforme a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2021), somente uma capital brasileira, Curitiba - PR, está muito próxima da universalização na sua plenitude.

Outro dado que pode evidenciar déficit na dimensão do saneamento vem da Associação Brasileira de Agências de Regulação (ABAR, 2020), ao informar que a regulação (saneamento) alcança 3.378 municípios, atingindo pouco mais de 60% dos municípios brasileiros. Entende-se que a ABES (2021) apresenta a real dimensão do desafio para atingir

a universalização dos serviços de saneamento básico que é levar a regulação aos mais de 2 mil municípios brasileiros que ainda não têm esses serviços ou não estão adequadamente regulados.

Agência reguladora é uma entidade governamental ou independente responsável por supervisionar, monitorar e regulamentar setores específicos da economia ou da sociedade. Esse tipo de agência tem o objetivo de garantir que os mercados funcionem de maneira justa, eficiente e segura, protegendo os interesses dos consumidores, do público em geral e do meio ambiente.

Esse é o caso do estado do Maranhão que, em consonância com a lei federal, por meio da aprovação de Lei Complementar Nº 239/2021, instituiu a divisão do estado em microrregiões, visando entre outros objetivos a regulação do saneamento básico conforme excerto de sua proposição no art. 19:

Art. 19. A regulação da prestação dos serviços de saneamento básico prestados nas Microrregiões de Saneamento Básico será feita preferencialmente pela Agência Estadual de Mobilidade Urbana e Serviços Públicos (MOB) (Maranhão, 2021).

Nessa contextualização é que este trabalho se justifica na medida em que busca apresentar subsídios acerca de modelo de regulação. Conforme apontam Araújo e Bertussi (2018), a falta de investimentos em saneamento está relacionada, em parte, à falta de uma regulação efetiva, que tem permitido práticas tarifárias que deixam as principais empresas de saneamento em situação deficitária ou, quando superavitária, elas ficam com baixa capacidade para realização de investimentos.

Concessionária de saneamento é uma empresa, pública ou privada, responsável pela prestação de serviços de saneamento básico com o fornecimento de água potável, coleta e tratamento de esgoto e, em alguns casos, gestão de resíduos sólidos e drenagem urbana. Tais concessionárias operam com base em contratos de concessão firmados com o poder público que podem ser de âmbito municipal, estadual ou nacional.

Assim, tem-se também que é motivo de preocupação da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - Caema a implantação de um programa de combate a perdas, conforme descrito na figura 1, por exemplo.

Além disso, a Caema (s.d.) estabelece como sua diretriz econômica a construção de um modelo de gestão pública com resultados eficazes que garantam a sustentabilidade empresarial, entendida como economicamente viável, socialmente justa e ambientalmente correta. Por ora, tais preocupações podem ser interpretadas como um rol de boas intenções, mas carente, por exemplo, de índices para mensuração.

DIRETRIZ SOCIOAMBIENTAL	DIRETRIZ ECONÔMICA	DIRETRIZ OPERACIONAL
Programa de sistema de gestão ambiental	Programa de investimento ambiental	Programa de combate a perdas.
Programa de educação ambiental	Programa de manutenção dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário	Programa de gerenciamento de resíduos
Programa de regularização ambiental	Programa de prevenção de riscos ambientais - PPRA	Programa de gestão da segurança da água.
Programa de proteção dos mananciais superficiais e subterrâneos	Programa de atendimento a emergências	Programa de eficiência energética.
	Programa de Regularização Fundiária	

Figura 1. Programas da política ambiental. *Fonte: Caema, adaptado pelo Autor.*

Nesse caminho, o art. 2º, XIV, da Lei nº 11.445/2007 e Lei nº 14.026/2020 defendem a regionalização dos serviços de saneamento básico como princípio fundamental (Brasil, 2007; 2020). Tais normativas combinadas com a proposta do estado do Maranhão em instituir as microrregiões para o saneamento é que este trabalho delimitou como foco a microrregião sul maranhense. Essa microrregião possui 55 municípios, entre eles, Imperatriz, considerado município polo, porque é o mais desenvolvido da região ao destacar-se em termos de área urbana, população, densidade demográfica e PIB, além de ser centro educacional, comercial e de saúde.

A Região Metropolitana do Sudoeste Maranhense, criada por Lei Complementar Estadual do Maranhão nº 89, de 17 de novembro de 2005, e reformulada pela Lei complementar Estadual nº 204 de 2017, contempla vinte e dois municípios: Imperatriz, João Lisboa, Governador Edison Lobão, Buritirana, Senador La Rocque, Davinópolis, Montes Altos, Ribamar Fiquene, São Pedro da Água Branca, Vila Nova dos Martírios, Porto Franco, São Francisco do Brejão, Amarante do Maranhão, Sítio Novo, Carolina, Itinga do Maranhão, Açailândia, Campestre do Maranhão, Cidelândia, Lajeado Novo, São João do Paraíso, Estreito (Maranhão, 2005; 2017). Todos esses municípios fazem parte da microrregião de saneamento sul maranhense (Maranhão, 2021).

Para citar apenas um exemplo da dimensão do desafio na área de saneamento dessa microrregião maranhense na qual se insere a região metropolitana do sudoeste maranhense tem-se que o Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) indica que nessa área apenas 7.78% têm acesso ao serviço de coleta e tratamento de esgoto (Brasil, 2021).

A falta de regulamentação é atribuída, principalmente, pela dificuldade de obter fontes bibliográficas atualizadas, restando recorrer ao estudo do dispositivo legal a que se vincula, sejam leis ou resoluções das agências reguladoras ou demais dispositivos. A ausência de Planos Municipais de Saneamento Básico também é um gargalo que impede a regulação, uma vez que esta ocorre com base nas diretrizes estabelecidas nesses planos, conforme determinado pela legislação.

Nesse cenário, nos interessamos em saber qual modelagem de regulação nos serviços públicos de abastecimento de água pode melhor atender a região metropolitana do sudoeste maranhense para que ela possa atingir a meta de universalização desse serviço. Então, para atingir o principal objetivo de apresentar proposta de um modelo de regulação por exposição (*Sunshine*) para essa região, foi proposto levantamento da situação de regulação no saneamento no estado do Maranhão e descrição do histórico da gestão em saneamento ambiental nos municípios de pequeno porte na região metropolitana do sudoeste maranhense.

Desenvolvimento

Conforme Lebelein (2019), o saneamento é um monopólio natural e, de certa maneira, as organizações responsáveis por esse tipo de serviço são monopolistas e possuem vantagens incontestáveis à medida em que ampliam o número de consumidores. É justamente as vantagens que levam à conseqüente necessidade de regulação, visando impedir que os prestadores com grande poder de mercado se favoreçam dessa condição para determinar preços, aumentar lucratividade em detrimento de tarifas fora do ponto considerado como módico para consumidores e eficientes para o mercado em geral (Lebelein, 2019).

Nesse sentido, Lebelein (2019) aponta que os desafios da regulação podem assim ser sintetizados:

- i) Atração de investimentos em parcerias público-privadas;
- ii) *Players* de qualidade;
- iii) Competição;
- iv) Universalização;
- v) Qualidade do serviço.

No âmbito de ser imperativo um modelo de regulação é que emerge a regulação por exposição ou regulação *sunshine*, que é a prática regulatória baseada na medição (por meio de indicadores), comparação e exposição pública dos resultados do desempenho dos prestadores de serviços. Nesse sentido, conforme explicam Costa *et al.* (2017), com tal exposição, espera-se que os prestadores com pior desempenho sejam pressionados pela sociedade, pelo poder público e, inclusive, por outros prestadores a adotar ações para melhoria dos serviços.

Do inglês, a palavra *sunshine* é adotada com a ideia central de que a exposição pública de dados, indicadores e metas reguladas criará incentivos para que as empresas melhorem seus serviços e cumpram as normas regulatórias (Almeida, 2018).

Na prática, a regulação *sunshine* obriga empresas, órgãos públicos e outras entidades a divulgarem publicamente informações sobre suas atividades, como: dados de desempenho, que contemplam indicadores de qualidade; eficiência e produtividade, entre outros. Como também custos e gastos tais como orçamentos, contratos e licitações. E ainda relações com terceiros com

os quais envolvem pagamentos, doações etc. (Almeida, 2018). Tal regulação promove ainda a comparação entre diferentes entidades do mesmo setor, permitindo que a sociedade civil e os órgãos de controle avaliem seu desempenho e identifiquem possíveis irregularidades.

Lebelein (2019) já havia concluído em sua investigação que, para além das questões econômicas, ainda seria necessária a construção de indicadores de eficiência para os prestadores de serviço em saneamento. Contudo, esse autor alerta para evitar análises prematuras, o que pode ser entendido ao considerar o tamanho continental do país e, por isso, cada realidade deverá ser vista a partir de suas especificidades.

Costa *et al.* (2017) vão na mesma linha e orientam que, ao implantar indicadores no modelo de regulação *Sunshine*, não se faça imediata comparação entre Minas Gerais e Maranhão, por exemplo, sem antes embasar e ajustar os estudos realizados com dados que reflitam as respectivas realidades locais.

Arnstein (1969) estabeleceu a *Ladder of citizen participation* (Escada de participação cidadã), um modelo para classificar os níveis de participação dos cidadãos nos processos de tomada de decisão. Essa escala é frequentemente utilizada para avaliar o grau de poder que os cidadãos exercem em relação às autoridades públicas. Então, regulação *sunshine* e escada de Arnstein aplicadas em conjunto fornecem mais subsídios de controle social ao que está sendo regulado.

Assim, a Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo (ARSESP, 2020) consoante a esse entendimento reafirma que a regulação *sunshine* (Figura 1) permite maior participação do cidadão que visualiza onde precisa de melhorias e pode realizar cobrança, resultando em sujeição a quem é de direito responder pela qualidade do serviço.

Nesse caminho, a regulação *sunshine*, ao considerar a escada de Arnstein como mecanismo de controle social, atende ao que Hendges, Santos e Picanço (2018) já entendiam como essencial para o saneamento ambiental que é a necessária implementação de modalidades que visem tornar a comunidade do entorno protagonistas do processo. Como também pontuado por Sousa *et al.* (2016) para quem a participação da comunidade é essencial na gestão de resíduos, por exemplo. Assim, a regulação funciona como uma via de mão dupla, onde há o incentivo para que a comunidade exerça pressão por melhorias, mas também a mobiliza para que cumpra com a sua parte.

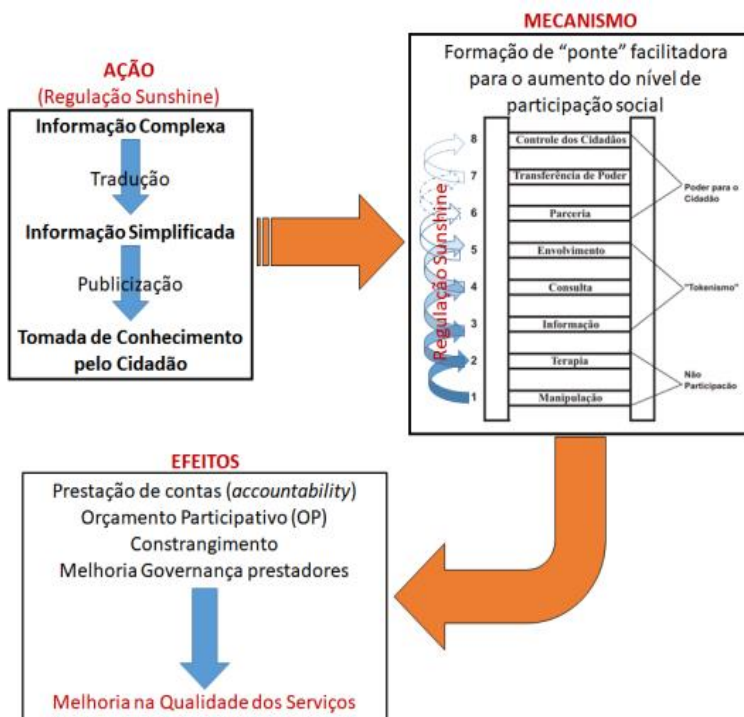


Figura 2. Regulação *sunshine* e escada de Arnstein. Fonte: ARSESP (2020) com adaptação a partir de Heller, Rezende e Heller (2007).

Metodologia

Como procedimento metodológico, foi realizada revisão sistemática de literatura que teve como objetivo principal analisar e sintetizar estudos anteriores relevantes sobre o tema em questão. Destaca-se que tal revisão seguiu o fluxo de processos de revisão sistemática de literatura sugerida por Brereton *et al.* (2007). E foi uma etapa fundamental para embasar o estudo quanto à identificação de lacunas de pesquisa e contextualização dos resultados obtidos.

Para obter informações relevantes sobre a gestão de regulação de serviços de saneamento no estado do Maranhão, foram adotados como fontes de dados os documentos oficiais do estado e de municípios maranhenses. Tais documentos foram utilizados para a análise de dados; e, para caracterizar municípios de pequeno porte, foi considerada a classificação da Confederação Nacional dos Municípios que estabelece a classe de pequeno porte aos que possuem menos de 50 mil habitantes (CNM, 2015).

Em relação aos documentos oficiais, foi realizada revisão em relatórios governamentais, planos de saneamento, legislação pertinente, contratos de concessão e regulação. Esses documentos forneceram informações essenciais sobre a estrutura regulatória, os indicadores de desempenho, as metas de universalização e outros aspectos relevantes da gestão de saneamento no estado.

A análise dos dados coletados foi realizada por meio de abordagem qualitativa, uma vez que as informações obtidas a partir dos documentos oficiais foram cuidadosamente revisadas e categorizadas em temas e subtemas relevantes para a gestão de regulação de serviços de saneamento no estado do Maranhão. Envolveu a identificação de padrões, tendências e lacunas nas políticas e práticas existentes. Para isso, foram realizadas comparações e contrastes entre as informações obtidas a partir das diferentes fontes de dados para compreensão da situação atual e identificação dos principais avanços, das necessidades de melhoria e oportunidades de intervenção na gestão de regulação de serviços de saneamento.

Resultados e discussões

Com base nas legislações pesquisadas, foram identificados os dispositivos legais elencados na figura 3.

TIPO	Nº	DESCRIÇÃO	ANO DE PUBLICAÇÃO
Lei Estadual Complementar	239	Instituiu a divisão do estado em microrregiões de saneamento	2022
Medida provisória	229	Transfere as competências e recursos, antes da extinta Agência Reguladora de Serviços Públicos do Maranhão – ARSEMA, à MOB. Dispõe sobre as atribuições da Agência Estadual de Transporte e Mobilidade Urbana – MOB	2017
Resolução ARSEMA	11	Disciplina a obrigatoriedade de divulgação das informações e comunicações encaminhadas pela ARSEMA para as empresas concessionárias, permissionárias e delegatárias de serviços públicos no estado do Maranhão.	2014
Resolução ARSEMA	10	Disciplina a aplicação de penalidades por irregularidades na prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário.	2014
Resolução ARSEMA	1	Aprovação do Regulamento de Serviços Públicos de abastecimento de água e coleta de esgotos sanitários, administrados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão-Caema.	2012
Decreto Estadual	2.653	Criação da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – Caema.	1966

Figura 3. Prazos futuros do Marco do Saneamento e suas respectivas metas. *Fonte: elaborado pelos autores.*

A análise dos documentos oficiais da Agencia Reguladora Estadual revelou a existência de uma estrutura regulatória estabelecida no estado do Maranhão, uma vez que foram identificados órgãos responsáveis pela regulação dos serviços de saneamento, bem como a legislação pertinente ao setor. Isso indica esforço do governo em promover uma gestão regulatória adequada para garantir a prestação eficiente e de qualidade dos serviços.

Adicionalmente, os documentos analisados mediante revisão sistemática de literatura forneceram informações sobre os indicadores de desempenho utilizados para monitorar a qualidade dos serviços de saneamento no estado e foram identificados indicadores relacionados à cobertura de água potável, coleta e tratamento de esgoto, bem como a qualidade da água fornecida (Wetters *et al.*, 2020).

Os documentos oficiais também revelaram a existência de metas de universalização para os serviços de saneamento básico no estado do Maranhão. Essas metas estabelecem objetivos a serem alcançados em termos de cobertura e qualidade dos serviços, visando assegurar acesso igualitário e adequado a toda a população (Maranhão, 2017).

Tais documentos também abordaram a regulamentação e fiscalização dos serviços de saneamento, já que foram identificadas cláusulas contratuais e regulamentos que estabelecem diretrizes e requisitos para as concessionárias responsáveis pela prestação dos serviços. Além disso, observou-se a existência de mecanismos de fiscalização para monitorar o cumprimento das obrigações contratuais e dos padrões de qualidade estabelecidos (Maranhão, 2014).

Também foram identificadas oportunidades de melhoria, porque a existência de metas de universalização e indicadores de desempenho demonstra o compromisso do governo estadual em melhorar a gestão de saneamento. Além disso, a estrutura regulatória estabelecida e os mecanismos de fiscalização são fundamentais para garantir a prestação adequada dos serviços.

Isso se deve ao fato de que as empresas prestadoras de serviço de saneamento teriam até 31 de dezembro de 2023 para realizarem requerimento de comprovação econômica e financeira perante a entidade reguladora responsável pelo julgamento em cada estado, incluindo o Maranhão. Este deveria atestar a capacidade da organização e realizar a prestação do serviço de saneamento (Brasil, 2020).

O Marco do Saneamento estabelece uma série de mudanças no setor de saneamento básico em nível nacional, porém sua implementação e impacto específico nos estados dependem da adesão e regulamentação realizadas pelos governos estaduais (Brasil, 2020). Para isso, o Marco do Saneamento (Brasil, 2023) ainda estabelece alguns objetivos a serem cumpridos pelas Unidades Federativas (UF) de acordo com critérios previamente definidos, conforme Figura 4.

PRAZO	OBJETIVO
31/03/2023	Prazo para os titulares com contratos de prestação vigentes irregulares publicarem o edital de licitação para concessão dos serviços que substituirá o contrato irregular.
31/03/2025	Prazo para os titulares com contratos de prestação vigentes irregulares substituírem os contratos de programa vigentes por contratos de concessão.
31/12/2033	Prazo para que se atinja a meta de atendimento de 99% da população com água potável e de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos.

Figura 4. Prazos futuros do Marco do Saneamento e suas respectivas metas. *Fonte: Adaptado de Instituto de Água e Saneamento (2023).*

No caso do Estado do Maranhão, a adesão e implementação do Marco do Saneamento podem ter impactos significativos na regulação dos serviços de saneamento. A lei estabelece a necessidade de contratos de concessão ou parcerias público-privadas para a prestação dos serviços de água e esgoto, visando à universalização desses serviços (Brasil, 2023).

Com base nessa legislação, o governo do Maranhão pode promover alterações em sua estrutura regulatória para se adequar às novas exigências e fomentar a participação da iniciativa privada no setor. Isso poderia envolver a criação de uma agência reguladora específica para o saneamento básico, responsável por fiscalizar e regular a prestação dos serviços no estado (Brasil, 2020).

Além disso, o Marco do Saneamento prevê a realização de licitações para a contratação de empresas de prestação dos serviços o que permite oportunizar novos players ao mercado e estimular a competição. O Estado do Maranhão, portanto, pode estabelecer critérios e diretrizes para essas licitações, de forma a garantir transparência e qualidade dos serviços contratados (Brasil, 2020).

No entanto, vale ressaltar que o impacto do Marco do Saneamento no Maranhão também dependerá da infraestrutura existente no estado, das condições socioeconômicas da população e das políticas específicas adotadas pelos governos locais. Cada estado tem autonomia para definir suas estratégias de implementação, desde que respeite os princípios e diretrizes estabelecidos pela lei nacional.

O levantamento realizado revelou que a regulação do saneamento no Maranhão passou por várias fases e mudanças ao longo dos anos. Foram identificadas diferentes abordagens regulatórias adotadas em períodos distintos com o objetivo de melhorar a eficiência, a qualidade e a sustentabilidade dos serviços de saneamento prestados à população.

Os dados mais recentes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) para o Maranhão revelam alguns desafios e avanços no setor de saneamento básico. Em 2022, o SNIS apontou

que o estado ainda enfrenta dificuldades significativas na universalização do abastecimento de água e esgotamento sanitário, especialmente em áreas rurais e comunidades de baixa renda (Brasil, 2022).

A análise revelou também que a situação da gestão em saneamento ambiental nos municípios de pequeno porte na região metropolitana do sudoeste maranhense enfrenta desafios significativos. A cobertura de abastecimento de água é baixa em muitas áreas, assim como a coleta e o tratamento de esgoto. Devido a essas questões, a qualidade da água também apresenta problemas, e a gestão dos resíduos sólidos precisa ser aprimorada.

A cobertura de abastecimento de água tratada alcançou aproximadamente 60% da população, mostrando aumento gradual, mas ainda é aquém da universalização. O índice de perdas na distribuição continua elevado, pois cerca de 40% da água tratada é perdida antes de chegar aos consumidores. Esse índice é um indicativo de problemas na infraestrutura e na gestão dos serviços (Brasil, 2022).

Os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2022, também mostram que 50,2% de todos os municípios maranhenses, até a data do levantamento, não possuíam Planos Municipais de Saneamento e 21,7% sequer cumpriram o requisito de envio de informações pelo sistema (Brasil, 2022).

O modelo de regulação por exposição (*sunshine*) proposto busca melhorar a governança e a *accountability* no setor de saneamento, por meio da disponibilização de informações detalhadas sobre contratos, tarifas, indicadores de desempenho, qualidade dos serviços e outros aspectos relevantes. Espera-se, dessa forma, que a transparência e a participação pública possam contribuir para aprimorar a eficiência e a qualidade dos serviços de saneamento na região. E, para aplicá-lo, é preciso seguir as etapas que constam na figura 5.

ETAPA	AÇÕES
Planejamento	Diagnóstico inicial; Definição de objetivos.
Implementação	Criação de ferramentas e plataformas; Institucionalização da participação; Capacitação e educação.
Monitoramento	Coleta e análise de dados; Auditorias e fiscalizações.
Avaliação	Relatórios e publicações; Revisão de políticas.

Figura 5. Etapas sugeridas para implementação da Regulação *Sunshine* na Região Metropolitana do Sudoeste Maranhense. Fonte: Elaborada pelos autores.

O modelo *Sunshine*, que se baseia na transparência e na divulgação de informações relacionadas à regulação do saneamento pode utilizar uma série de indicadores para avaliar a gestão dos municípios de pequeno porte, conforme figura 6.

INDICADOR	DESCRIÇÃO
Cobertura de abastecimento de água	Mede a proporção da população atendida por serviços de abastecimento de água potável.
Cobertura de coleta e tratamento de esgoto	Avalia a proporção da população com acesso a serviços de coleta e tratamento adequados de esgoto.
Qualidade da água	Verifica a conformidade dos padrões de qualidade da água potável fornecida aos moradores do município.
Eficiência operacional	Analisa indicadores de eficiência na prestação dos serviços de saneamento como perdas de água na rede de distribuição, índice de ligações clandestinas, entre outros.
Gestão dos resíduos sólidos	Avalia a efetividade das ações relacionadas à coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos gerados no município.
Investimentos em saneamento	Verifica os recursos financeiros investidos no setor de saneamento, incluindo investimentos em infraestrutura, manutenção e expansão dos serviços.
Participação da comunidade	Avalia a existência e efetividade de mecanismos de participação da comunidade na tomada de decisões relacionadas ao saneamento, como conselhos municipais, audiências públicas, entre outros.

Figura 6. Indicadores para avaliação da gestão de saneamento de pequenos municípios. *Fonte: Araújo e Bertussi (2018).*

Os resultados deste trabalho demonstram o histórico da regulação do saneamento no estado do Maranhão, a situação da gestão em saneamento ambiental nos municípios de pequeno porte na região metropolitana do sudoeste maranhense e a proposta de um modelo de regulação por exposição (*sunshine*) para essa região. Tais resultados fornecem subsídios importantes para a melhoria dos serviços de saneamento e para o desenvolvimento de políticas e estratégias mais eficientes e sustentáveis nesse setor.

Considerações finais

Para avançar, é fundamental fortalecer a parceria entre os setores público e privado de forma a incentivar a participação do setor privado por meio de parcerias público-privadas e concessões. Isso pode impulsionar a modernização da infraestrutura e aprimorar a prestação dos serviços, desde que sejam estabelecidos contratos claros, com tarifas justas e padrões de qualidade adequados. No entanto,

alguns desafios precisam ser enfrentados, visto que a ampliação da cobertura e a melhoria da qualidade dos serviços de saneamento requerem investimentos adicionais, especialmente em áreas rurais e comunidades de baixa renda. Concomitantemente, a gestão dos recursos hídricos e a sustentabilidade ambiental emergem como questões cruciais para o desenvolvimento regional.

Apesar desses desafios, existem oportunidades para aprimorar a gestão de saneamento no estado do Maranhão, pois a existência de metas e indicadores demonstra o compromisso do governo estadual em melhorar a prestação dos serviços. Além disso, a regulação e a fiscalização adequadas são essenciais para garantir a qualidade e eficiência dos serviços de saneamento.

Nesse sentido, é fundamental promover a participação ativa da sociedade civil na gestão dos serviços de saneamento. Por meio de consultas públicas, audiências e mecanismos de prestação de contas, é possível garantir que as decisões tomadas estejam alinhadas com as necessidades e expectativas da população.

Destaca-se que a regulação por exposição pode ajudar a garantir que pequenos municípios tenham as mesmas condições de alcançar metas de saneamento que os municípios de grande porte, pois essa abordagem se baseia na transparência, na prestação de contas das ações e nos resultados relacionados ao saneamento.

A regulação por exposição envolve a divulgação clara e acessível de informações sobre as ações de saneamento e seus resultados. Isso permite que os pequenos municípios tenham conhecimento das práticas e dos avanços adotados pelos municípios de grande porte, possibilitando a identificação de boas práticas e a aprendizagem com experiências bem-sucedidas.

Além disso, com a regulação por exposição, os pequenos municípios são incentivados a prestar contas de suas ações de saneamento, tornando-as responsáveis por seus resultados. Dessa forma, promove-se a melhoria contínua e a busca por soluções eficazes, uma vez que o desempenho de cada município é exposto e comparado a outros. Por fim, a regulação por exposição direciona o foco para os resultados em termos de alcance das metas de saneamento para que os pequenos municípios tenham a oportunidade de aprender com os municípios de grande porte e adotar abordagens comprovadas para melhorar seu desempenho.

Agradecimentos

O artigo contou com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA)

Referências bibliográficas

- ABAR, Associação Brasileira de Agências de Regulação (2020). *ABAR lança nova pesquisa sobre regulação no setor de saneamento*. Acesso em: 20 de jan. 2022. Disponível em: <https://abar.org.br/abar-lanca-nova-pesquisa-sobre-regulacao-no-setor-de-saneamento>
- ABES, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (2021). Ranking do Saneamento 2021. Acesso em: 20 de jan. 2022. Disponível em: https://abes-dn.org.br/?page_id=41939
- Araújo, F. C., Bertussi, G. L. (2018) Saneamento básico no Brasil: estrutura tarifária e regulação. *Planejamento e políticas públicas*, **51**, 165-202.
- Arnstein, S. R. (1969) A Ladder of Citizen Participation. *Journal of the American Institute of Planners*, **35**(4), 216-224.
- ARSEMA, Agência Reguladora de Serviços Públicos do Maranhão. (2012) *Resolução nº 01. Aprovação do Regulamento de Serviços Públicos de abastecimento de água e coleta de esgotos sanitários, administrados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão-CAEMA*. Acesso em: 20 de jan. 2022. Disponível em: <https://mob.ma.gov.br/programas-ou-campanhas/gas-e-saneamento>
- ARSEMA, Agência Reguladora de Serviços Públicos do Maranhão. (2014) *Resolução nº 10. Disciplina a aplicação de penalidades por irregularidades na prestação dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário*. Acesso em: 20 de jan. 2022. Disponível em: <https://mob.ma.gov.br/programas-ou-campanhas/gas-e-saneamento>
- ARSEMA, Agência Reguladora de Serviços Públicos do Maranhão. (2014) *Resolução nº 11. Disciplina a obrigatoriedade de divulgação das informações e comunicações encaminhadas pela ARSEMA para as empresas concessionárias, permissionárias e delegatárias de serviços públicos no Estado do Maranhão*.
- ARSESP, Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo. (2021) *Metodologia para implantação da regulação por exposição (Regulação Sunshine) no âmbito dos serviços de saneamento básico regulados pela ARSESP*. Acesso em: 04 de jun. 2023. Disponível em: <http://www.arsesp.sp.gov.br/ConsultasPublicasBiblioteca/NTS-0005-2021.pdf>
- Brasil (2007) *Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico*. Acesso em: 12 de jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm
- Brasil (2020) *Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Estabelece o marco legal do saneamento básico*. Acesso em: 10 de jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm
- Brasil. (2022) *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento*. Acesso em: 10 de jan. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>
- Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M., Khalil, M. (2007) Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, **80**(4), 571-583. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.009>
- CAEMA, Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão. (s.d.) Política ambiental. Acesso em: 01 de jun.2024. Disponível em: <https://caema.ma.gov.br/index.php/27-a-caema/governanca/politicas/2926-politica-ambiental-antigo>
- CNM, Confederação Nacional de Municípios (2015) *Planos Diretores para municípios de pequeno porte: limites e perspectivas para a aplicação dos instrumentos do Estatuto da Cidade*. Brasília: CNM. Acesso em: 15 de mai.2024. Disponível em: [https://cnm.org.br/storage/biblioteca/Planos%20Diretores%20para%20Municípios%20de%20pequeno%20porte%20\(2015\).pdf](https://cnm.org.br/storage/biblioteca/Planos%20Diretores%20para%20Municípios%20de%20pequeno%20porte%20(2015).pdf)
- Costa, S. A. B., Fonseca, G. A. B., Lopes, L. V. S., Oliveira, M. D., Castro, R. L. V. (2017) Projeto Sunshine: a regulação por exposição aplicada ao Estado de Minas Gerais. X Congresso brasileiro de regulação, 4o. *Expo-ABAR*. Florianópolis. Acesso em: 15 de mai 2024. Disponível em: http://www.arsae.mg.gov.br/images/Img_Artigos/ABAR_2017_ProSun_Cart.pdf

- Cucolo, E. (2023) Brasil fica atrás de China, México e Chile em ranking global de acesso a água e esgoto. *Folha de São Paulo*. 05 jan. 2023. Mercado. Acesso em: 15 de mai.2024. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2023/01/brasil-fica-atras-de-china-mexico-e-chile-em-ranking-global-de-acesso-a-agua-e-esgoto.shtml>
- FEITOSA, A. C. (2022). *Regulação por exposição (sunshine regulation) no setor do saneamento básico: a experiência da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais (Arsae/MG)*. Instituto Brasileiro de Ensino, Desenvolvimento e Pesquisa, Brasília. Acesso em: 15 de mai.2024. Disponível em: https://repositorio.idp.edu.br/bitstream/123456789/3892/1/DISSERTACAO_ANDREIA%20COSTA%20FEITOSA_MESTRA_DO%20EM%20DIREITO%20_2022.pdf
- Hendges, C. S., Santos, D. R., Picanço, A. P. (2018) Percepção atual dos diversos atores sociais da Regional de Palmas em relação à gestão dos resíduos sólidos. *Novos cadernos NAEA*, **21**(3). <http://dx.doi.org/10.5801/ncn.v21i3.4597>
- IAS, Instituto Água e Saneamento (2023) *Relatório Institucional*. Acesso em: 15 de mai.2024. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/transparencia/>
- Lebelein, C. W. (2019) *Saneamento no Brasil: uma análise da regulação tarifária*. 84 f. Dissertação de Mestrado em Economia. Fundação Getúlio Vargas. São Paulo. Acesso em: 18 de mai.2024. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/c5166f99-68fb-473d-a0d9-60b51bab1de3/content>
- Maranhão (1966) Medida Provisória nº 2.653, de 1966. Institui a Criação da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA. Acesso em: 15 de mai. 2024. Disponível em: https://arquivos.al.ma.leg.br:8443/ged/legislacao/MP_2653
- Maranhão (2005) Lei Complementar nº 089, de 17 de novembro de 2005. Cria a Região Metropolitana do Sudoeste Maranhense, e dá outras providências. Acesso em: 15 de mai. 2024. Disponível em: https://arquivos.al.ma.leg.br:8443/ged/legislacao/LC_089
- Maranhão (2017) Lei Complementar nº 204, de 11 de dezembro de 2017. Altera a Lei Complementar nº 089 e cria o Colegiado Metropolitano da Região Metropolitana do Sudoeste Maranhense. Acesso em: 15 de mai. 2024. Disponível em: https://arquivos.al.ma.leg.br:8443/ged/legislacao/LC_204
- Maranhão (2021) Lei Complementar nº 239, de 30 de dezembro de 2021. Institui as Microrregiões de Saneamento Básico do Norte Maranhense, do Sul Maranhense, do Centro-Leste Maranhense e do Noroeste Maranhense. Acesso em: 15 de mai. 2024. Disponível em: https://arquivos.al.ma.leg.br:8443/ged/legislacao/LC_239
- Silva, J. P.; Sousa, P. R., Oliveira, R. M. S., Zukowski Junior, J. C. (2016) Proposição de método participativo de gestão de resíduos sólidos no assentamento rural Sítio, Palmas-TO. *Engenharia ambiental* (online). **13**(2), 98-109.
- Wetters, M. L. de F. F., Boni, S. da S. N., Pinheiro, N. C. A., Boni, R. C. (2020) Avaliação do abastecimento de água do Maranhão através do sistema nacional de informações sobre saneamento. *Interfaces Científicas - Saúde e ambiente*, **8**(2), 39-48.

REVISTA AIDIS

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

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE UM BIORREATOR A MEMBRANA EM BATELADAS SEQUENCIAIS NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

* Guilherme Gavlak ¹
Carlos Raphael Pedrosa ¹
Gabriele Monique de Andrade Setnarski ¹
Lucas Eduardo Müller ¹
Andressa de Andrade ¹

EVALUATION OF THE APPLICATION OF A MEMBRANE BIOREACTOR IN SEQUENTIAL BATCHES IN THE TREATMENT OF DOMESTIC SEWAGE

Recibido el 31 de octubre de 2023. Aceptado el 9 de abril de 2024

Abstract

The membrane bioreactor system (MBR) has been gaining prominence in recent years compared to traditional domestic effluent treatment systems, as restrictions are increasingly greater due to its release into water bodies. Therefore, the present study aimed to evaluate the application, on a pilot scale, of a sequential batch membrane bioreactor (MBR-SB) in the treatment of domestic sewage. Reactor performance was evaluated based on the removal of parameters: soluble chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), ammonia nitrogen, soluble phosphorus, apparent color and turbidity. At the same time, analyzes related to membrane fouling processes were evaluated in the reactor: soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) in terms of proteins and polysaccharides, as well as transmembrane pressure (TMP). MBR-SB showed significant efficiencies in removing CODs, true color and turbidity, being 94%, 93% and 99%, respectively. The values of SMP, EPS, CODs significantly correlated with the increase in PTM, however, with a low clogging speed. In conclusion, the use of MBR-SB presents a promising approach to mitigate the environmental impacts associated with domestic sewage.

Keywords: membrane filtration, biological treatment, membrane fouling.

¹ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO), Campus de Irati, Rua Professora Maria Zanon de Almeida s/n, Riozinho, Irati/PR. CEP 84505-677. Brasil. Email: eng.guilhermegavlak@gmail.com

Resumo

O sistema de biorreator com membranas (BRM) vem ganhando destaque nos últimos anos em comparação aos sistemas tradicionais de tratamento de efluentes domésticos, uma vez que as restrições estão cada vez maiores em função dos seus lançamentos em corpos hídricos. Desse modo, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicação, em escala piloto, de um biorreator a membranas em bateladas sequenciais (BRM-BS) no tratamento de esgoto doméstico. O desempenho do reator foi avaliado com base na remoção dos parâmetros: demanda química de oxigênio solúvel (DQOs), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio amoniacal, fósforo solúvel, cor aparente e turbidez. Paralelamente, foi avaliado no reator análises relacionadas aos processos de colmatação das membranas: produtos microbianos solúveis (SMP) e substâncias poliméricas extracelulares (EPS) em termos de proteínas e polissacarídeos, assim como a pressão transmembrana (PTM). O BRM-BS, apresentou eficiências expressivas na remoção de DQOs, cor verdadeira e turbidez, sendo de 94%, 93% e 99%, respectivamente. Os valores de SMP, EPS, DQOs correlacionaram significativamente com o aumento da PTM, porém, com baixa velocidade de colmatação. Em conclusão, a utilização de BRM-BS apresenta uma abordagem promissora para mitigar os impactos ambientais associados aos esgotos domésticos.

Palavras-chave: filtração por membranas, tratamento biológico, colmatação das membranas.

Introdução

Devido à grande expansão populacional somado com a falta de medidas adequadas de saneamento básico e educação sanitária, parte da população tende a lançar seus efluentes diretamente em solos e corpos hídricos, ocasionando a poluição e a contaminação destes ambientes os quais são altamente degradados, o que favorece a disseminação de doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado (Moura *et al.*, 2016).

A coleta e o tratamento de esgotos desempenham um papel fundamental na sociedade e são vitais para promover a saúde pública e conservar os recursos naturais, especialmente os mananciais dos quais a água para o abastecimento público é captada. Uma das principais fontes de poluição de corpos hídricos hoje no Brasil está associada a inexistência do tratamento dos esgotos doméstico, assim como, a ineficiência das estações quando existentes. De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2022, aproximadamente 56% da população brasileira tinha acesso a serviços de coleta de esgoto, sendo que apenas cerca de 52.2% do esgoto coletado recebia tratamento adequado antes de ser lançado no meio ambiente, o que corresponde a um volume de esgoto coletado de 6.1 bilhões de m³ e somente 5.0 bilhões de m³ deste montante é tratado corretamente (SNIS, 2022).

O esgoto doméstico, quando tratado de forma ineficiente gera a poluição dos recursos hídricos, devido ao alto teor de material orgânico, sólidos, nitrogênio, fósforo e organismos patogênicos. Estes fatores favorecem a eutrofização em corpos d'água, a qual está relacionada ao aumento da concentração de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, aumentando o desequilíbrio dos

ciclos biogeoquímicos e da cadeia trófica, além da perda do oxigênio dissolvido (Esteves, 2011). Entre os efeitos negativos também pode ser citado o aumento da cor e turbidez dos corpos receptores, devido a presença de sólidos provenientes do esgoto descartado, resultando na redução da zona eufótica sendo prejudicial no processo de fotossíntese o que reduz a entrada de oxigênio no meio aquático, restringindo a diversidade de vida biológica.

Devido às restrições impostas por lei, os esgotos domésticos, assim como os demais efluentes industriais, precisam receber um tratamento necessário de acordo com as classes dos corpos hídricos nos quais são lançados (Brasil, 2005), assim como, para se enquadrar nos padrões de lançamentos dispostos na Resolução CONAMA 430 de 2011 (Brasil, 2011). Portanto, devido a elevada deterioração ambiental da qualidade dos corpos receptores e suas restrições cada vez maiores, faz-se necessário a implantação de sistemas avançados de tratamento deste tipo de água residuária.

Dentre os tratamentos utilizados destaca-se os biorreatores de membranas (BRMs). Os BRMs vêm aos poucos sendo reconhecidos de forma global, devido à elevada qualidade do efluente obtido por meio da utilização deste sistema (Lin *et al.*, 2014). Os BRMs operam de maneira semelhante ao processo de lodo ativado (Bernhardt e Newfield, 2006), porém com redução significativa da área de instalação através da substituição do decantador secundário por um módulo de membranas, normalmente de microfiltração ou ultrafiltração (Belli *et al.*, 2019).

Segundo Judd e Judd (2011), este módulo de membrana mantém a concentração de biomassa elevada dentro do reator, o que intensifica o processo de degradação da matéria orgânica aumentando a eficiência do tratamento. A utilização das membranas possibilita ainda gerar um efluente livre de patógenos e com reduzido teor de sólidos em suspensão (Melin *et al.*, 2006), portanto, esse tipo de sistema tem a capacidade de reduzir de forma muito significativa o potencial poluidor dos efluentes.

Diante deste cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a viabilidade de um biorreator a membranas em bateladas sequenciais aplicado ao tratamento de esgoto doméstico, avaliando a eficiência de remoção dos parâmetros físicos e químicos, assim como, o processo de colmatação do módulo de membranas.

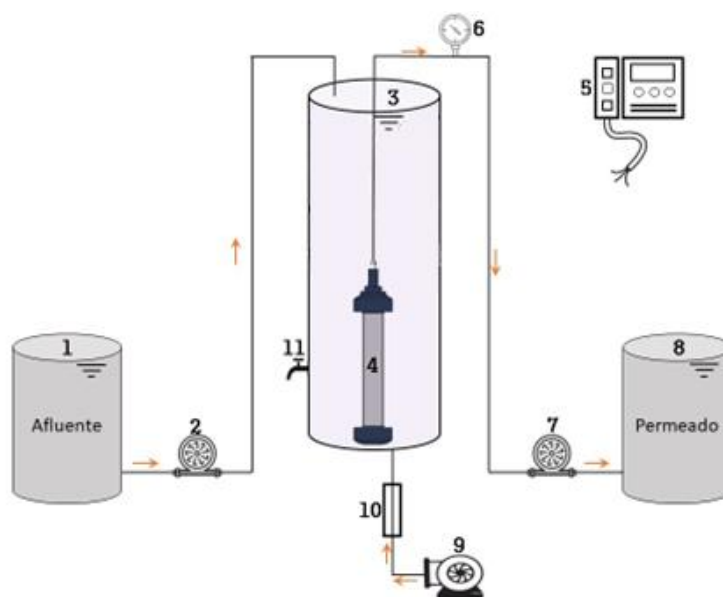
Metodologia

O efluente a qual foi submetido ao tratamento proposto, foi coletado em uma estação de tratamento de esgotos (ETE) após os processos de gradeamento e sedimentação dos sólidos em um decantador primário da ETE e armazenado a 4 °C para que não houvesse degradação anaeróbia no período de armazenamento. Já a biomassa utilizada como inóculo foi oriunda de

uma lagoa aeróbia pertencente a um sistema de tratamento de esgotos gerados em uma indústria de laticínios e concentrada por gravimetria até que fosse atingido a concentração de 5 g/L de sólidos suspensos totais (SST). Antecedente ao início da coleta de dados, o biorreator a membrana passou por um período de aclimação e estabilização da concentração de SST por um período de aproximadamente 30 dias, obtendo uma concentração de 4.5 g/L.

Características da unidade experimental

A esquematização da unidade experimental operada em escala piloto composta por um biorreator a membrana em bateladas sequenciais (BRMBS) utilizada no presente estudo está apresentada na Figura 1.



1 – Reservatório afluente; 2 – Bomba de alimentação; 3 – reator; 4 – Módulo de membranas; 5 – Painel de controle; 6 – Vacuômetro; 7 – Bomba para filtração; 8 – Reservatório do permeado; 9 – Soprador de ar; 10 – Rotâmetro; 11 – Descarte de lodo.

Figura 1. Esquematização da unidade piloto do biorreator a membrana em bateladas sequenciais utilizado na presente pesquisa. *Fonte: os Autores, 2023.*

O biorreator com membranas utilizado foi constituído de um tanque em formato cilíndrico feito de acrílico com um volume total e útil de 20 e 15 litros, respectivamente. Para que fosse possível manter o sistema totalmente aeróbio, era fornecida uma aeração com oxigênio por meio de um compressor de ar e sua vazão de 8 L/min era regulada com o auxílio de rotômetros, sendo que a mesma era dividida entre a base do sistema e o módulo de membranas.

Para que o sistema fosse automatizado, foi utilizado de uma central lógica de processamento (CLP) a qual era responsável pelo acionamento dos processos de filtração e enchimento do reator.

Para realização da filtração, foi utilizado de uma bomba peristáltica e um módulo de membranas submerso de fibras ocas compostas de fluoreto de polivinilideno (PVDF), com comprimento de 53.5 cm cada fibra, totalizando 300 unidades. O diâmetro externo das fibras era de 2 mm e seus poros possuíam diâmetro de 0.04 μm , resultando em uma área de filtração de 0.93 m^2 . Acoplado a bomba peristáltica e o módulo de membranas, foi inserido um vacuômetro com o intuito de medir a pressão de filtração e monitorar a colmatação.

Condições operacionais do biorreator a membrana em bateladas sequenciais

Para a operação do sistema em bateladas sequenciais foram adotados ciclos de 6 horas com filtração intermitente, no final de cada ciclo, 30 minutos eram destinados a esse processo, sendo interrompida a filtração a cada 10 minutos para o relaxamento da membrana, o tempo destinado ao relaxamento foi de 1 minuto (Judd, 2016). Por meio das condições adotadas, resultou em um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 18 horas. O valor de fluxo de filtração foi de 10.75 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, o qual está situado dentro da faixa de operação de BRM municipais, entre 5 – 30 $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (Judd e Judd, 2011). No período destinado a filtração, eram retirados do sistema 5 litros de efluente tratado no período de filtração no final de cada ciclo, após esse processo, o enchimento era acionado realizando a reposição do mesmo volume de esgoto *in natura*. A aeração do sistema era realizada de maneira constante, sendo responsável pelos processos de homogeneização e oxigenação do licor misto. A concentração média de oxigênio dissolvido no reator era de 5 mg/L e, a demanda específica de aeração era de 0.5 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ e o tempo de homogeneização do reator era de 80 segundos.

A idade do lodo adotada para a operação do sistema foi de 20 dias controlada por meio da retirada diária de 750 mL de licor misto (biomassa). O tempo de operação do sistema foi de 60 dias corridos após a estabilização do sistema, período este adotado em função do tempo relativo à três vezes a idade do lodo ($\theta_c=20$ dias).

Monitoramento da eficiência do sistema

Foram realizadas análises laboratoriais das amostras coletadas em três pontos do sistema. O primeiro ponto analisado é caracterizado pelo esgoto “bruto” antes de entrar no sistema, o segundo ponto avaliado foi o licor misto localizado no reator aeróbio e o terceiro ponto o permeado, sendo este o efluente após o tratamento proposto.

As amostras coletadas foram caracterizadas de acordo com procedimentos padrão descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) segundo os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para caracterização do efluente e sua metodologia analítica empregada.

Parâmetros	Metodologia empregada
Demanda química de oxigênio solúvel (DQOs)	5220D
Demanda Bioquímica de oxigênio (DBO)	5530D
Nitrogênio amoniacal (NH ₃)	4500-NH ₃ F
Fósforo solúvel (P)	4500B
Cor aparente	2120C
Sólidos suspensos totais	2130B
Turbidez	2540B
pH	4500H+B

Para realização das análises de DQOs, NH₃ e P solúvel, as amostras foram previamente filtradas em membranas de 0.45 µm, com a finalidade de retirar os sólidos presentes no meio líquido e obter apenas a fração solúvel, evitando valores superestimados. Ainda foram monitorados a temperatura, a pressão transmembrana no momento da filtração, a concentração de sólidos suspensos voláteis e de produtos microbianos solúveis (SMP) e substâncias poliméricas extracelulares (EPS) em termos de proteínas e polissacarídeos do licor misto.

Além das análises supracitadas, foram realizados os cálculos da relação Alimento/Microrganismo (relação A/M) e da carga orgânica volumétrica (COV) por meio das equações 1 e 2, respectivamente, dispostas a seguir:

$$COV = \frac{Q \cdot DBO}{Vr} \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{A}{M} = \frac{DBO \cdot Q}{Vr \cdot SSV} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

COV = carga orgânica volumétrica (mg/L.dia)

Q = vazão (L/dia)

DBO = concentração de demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)

Vr = volume do reator

A/M = relação alimento/microrganismo (mgDBO/mgSSV.dia)

SSV = concentração de sólidos suspensos voláteis (mg/L)

Frequência das análises de monitoramento

As análises de monitoramento da pressão transmembrana eram realizadas diariamente com o objetivo de analisar o processo de colmatação do módulo de membranas, assim como, a aferição da temperatura do reator. Juntamente com essa análise, foi realizado o cálculo da velocidade de colmatação (VC) das membranas, a qual foi calculada considerando a variação da PTM ao longo

do tempo total de operação. Já as análises laboratoriais de DQOs, DBO, NH₃, P, SMP, EPS, cor aparente, turbidez e pH dos pontos de amostragem adotados e os sólidos suspensos totais e voláteis do licor misto foram realizadas semanalmente.

Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram analisados por meio da estatística descritiva. A análise de variância de um fator (ANOVA) seguido do teste de comparação de Tukey com significância de 5%, foi feita para a variável DQOs, o qual passou por transformação dos dados (raiz) para atingir os pressupostos da ANOVA. No que se refere aos dados relacionados ao potencial incrustante, foi feita uma matriz de correlação de Kendall envolvendo a PTM com as variáveis SMP, EPS, DQOs.

Resultados e discussão

Caracterização do efluente em estudo

A caracterização do esgoto está apresentada na Tabela 2 para os parâmetros avaliados.

Tabela 2. Valores médios da caracterização do esgoto doméstico bruto utilizado para tratamento por biorreator a membrana no decorrer da estratégia de operação.

Parâmetros	Valores médios
Demanda química de oxigênio solúvel (mg/L)	823
Demanda Bioquímica de oxigênio (mg/L)	611
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	16
Fósforo solúvel (mg/L)	4.6
Cor aparente (uC)	520
Turbidez (uT)	74
pH	5.18

Ao analisar a Tabela 2, é verificado elevados valores de demanda química de oxigênio solúvel e de demanda bioquímica de oxigênio, essas elevadas concentrações resultam numa relação entre DQO e DBO inferior a 2.5 (relação DQO/DBO: 1.3), o que segundo Von Sperling (2009), indica que o efluente é caracterizado por possuir uma elevada fração de material orgânico biodegradável. Este tipo de efluente, quando lançados em corpos hídricos sem seu devido tratamento, é responsável por diversos impactos ambientais, principalmente devido ao decaimento do oxigênio dissolvido por meio da sua degradação por microrganismos aeróbios, o que acarreta num grande desequilíbrio em toda a dinâmica aquática do local (Villa *et al.*, 2007).

Além disso, é expressiva as concentrações dos nutrientes na água residuária de estudo, dando ênfase especialmente na forma amoniacal do nitrogênio, onde o excesso desses compostos

resulta na eutrofização dos ambientes aquáticos. Esse desequilíbrio acarreta a redução das trocas gasosas com a atmosfera e na passagem de luz para o interior da massa líquida, além da poluição visual do local (Brum *et al.*, 2009).

É notório também os elevados teores de cor aparente e turbidez no esgoto os quais se dão principalmente devido a presença de sólidos coloidais, dissolvidos e em suspensão presentes no efluente. Estes quando despejados nos ambientes aquáticos resultam na redução da zona eufótica do meio, afetando os processos fotossintéticos.

Monitoramento do biorreator a membrana

O BRM-BS utilizado foi monitorado por meio da concentração de sólidos suspensos totais e voláteis do licor misto e o comportamento destes sólidos está apresentado na Figura 2.

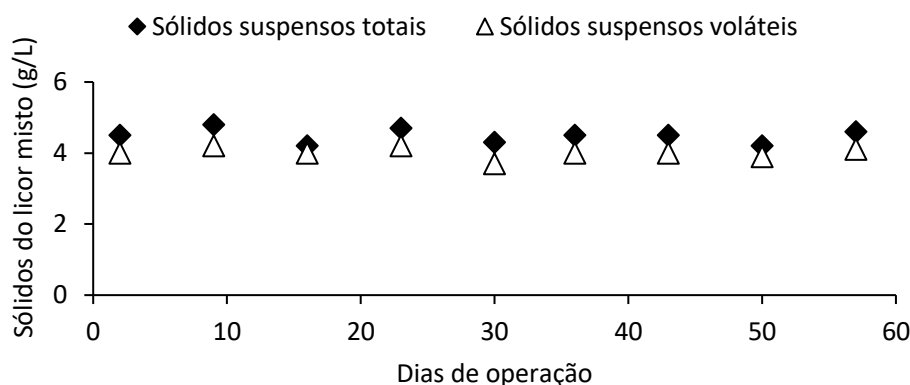


Figura 2. Comportamento da concentração de sólidos no licor misto do biorreator a membrana no decorrer da operação do sistema.

É verificado na Figura 2 que os teores de sólidos suspensos totais e sólidos suspensos voláteis do licor misto sofreram pouca variação no decorrer do período operado, o que indica uma boa estabilização do sistema. A concentração média de sólidos suspensos totais e voláteis no licor misto durante o período de operação do sistema foi de 4.5 e 4.0 g/L, respectivamente. Pode-se verificar uma elevada concentração das frações de sólidos avaliadas e isso se dá principalmente devido a retenção destes por meio do módulo de filtração, uma das principais vantagens dos biorreatores a membrana.

Os elevados teores de sólidos suspensos voláteis estão diretamente relacionados a concentração de microrganismos presentes no sistema, os quais são responsáveis pelos processos de

degradação do material orgânico do efluente (Jordão e Pessôa, 2011). Porém, em alguns casos, as elevadas concentrações destes parâmetros podem afetar de forma negativa, pois, favorecem o processo de colmatação dos módulos de membrana de filtração (Wu e Huang, 2009). Entretanto, diversos estudos foram realizados com biorreatores a membrana utilizando concentrações as quais variam 2 a 24 g/L e a partir dos mesmos, verificou-se que a concentração de sólidos não interferiu de forma negativa no processo de colmatação (Rosenberger e Kraume, 2002).

Ao analisar a relação entre SSV/SST, a qual está diretamente relacionada com o grau de mineralização do licor misto, é verificado o valor de 0.9. Desse modo o lodo é considerado de baixa mineralização e está dentro do recomendado para reatores biológicos (0.85) (Metcalf e Eddy, 2003).

Além dos sólidos do licor misto, monitorou-se também a temperatura a qual foi obtida um valor médio de 28 ± 1.27 °C no decorrer da operação do sistema, ocorrendo pouca variação devido ao seu controle realizado por meio do ar-condicionado presente na unidade. Os valores obtidos diariamente estiveram dentro dos considerados ideais para sistemas de tratamento biológico, os quais variam entre 25°C e 35°C (Jordão e Pessoa, 2011).

Avaliação da eficiência do tratamento

Por meio das análises realizadas obteve-se o monitoramento dos parâmetros avaliados em cada um dos pontos de amostragem adotados e os resultados médios obtidos estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Avaliação da eficiência do tratamento proposto em cada um dos pontos avaliados e sua eficiência total de remoção.

Parâmetros	Efluente bruto	Licor Misto	Permeado	Eficiência (%)
DQOs (mg/L)	797 ± 109	117 ± 60	45 ± 27	94
DBO (mg/L)	615 ± 199	-	0	100
NH ₃ (mg/L)	16 ± 1.3	13 ± 1.5	12.5 ± 1.4	20
Fósforo solúvel (mg/L)	4.6 ± 0.5	4.6 ± 0.3	4.6 ± 0.5	0
Cor aparente (uC)	520 ± 45.5	-	38.2 ± 9.9	93
Turbidez (uT)	74 ± 9.8	-	0.45 ± 0.1	99
pH	5.2 ± 1.1	6.8 ± 0.3	5.2 ± 1.5	-

Quando avaliado a remoção de demanda química de oxigênio em sua fração solúvel, o efluente bruto, antes do tratamento proposto, possuía uma concentração média de 797 mg/L a qual foi reduzida a 117 mg/L no reator aeróbio em função da elevada degradação biológica pelos

microrganismos decompositores. Após a filtração pelo módulo de membranas, a concentração de DQOs foi reduzida a uma média de 45 mg/L, reduzindo ainda mais tal concentração, conforme os testes estatísticos ANOVA e Tukey (5%) ($F=255$; $p=6.7E-17$).

A eficiência total de remoção no sistema BRMBS foi de 94%. Dessa remoção total, 85% foi atribuído à biomassa enquanto que 9% foi atribuído à membrana. A alta eficiência de remoção é resultado principalmente devido a elevada fração biodegradável do efluente em estudo como já mencionado anteriormente, todavia, a alta concentração de biomassa no sistema, a qual é uma das vantagens dos biorreatores a membrana, tende a maximizar os processos de degradação das frações orgânicas, além de não sobrecarregar o módulo de membranas (Judd e Judd, 2011).

Quando realizado o cálculo da estimativa da carga orgânica volumétrica (COV) do efluente em estudo, nota-se que a COV encontra-se dentro dos valores médios considerados ideais em sistemas de lodos ativados convencionais, o qual é operado de maneira similar aos biorreatores a membrana, variando de 0.8 a 2 kgDQO/m³/d, onde foi obtido um valor médio de 0.9 kgDQO/m³.d (Metcalf e Eddy, 2003). Quando realizado a estimativa da relação alimento microrganismo (A/M), ou seja, a quantidade de material orgânico fornecida de alimento para os microrganismos decompositores, foi obtido o valor médio de 0.5 KgDQO/KgSSV.d, valor o qual se encontra entre 0.3 a 0.6 kgDQO/kgSSV.d, que segundo Metcalf e Eddy (2003), são considerados ideais em sistemas de lodos ativados convencional, logo, a operação do sistema com elevadas concentrações de biomassa resultam valores mais baixos da relação A/M e uma remoção expressiva dos compostos orgânicos. Portanto, por meio dos valores obtidos, explica-se a elevada eficiência de remoção de tal parâmetro e torna-se explícito as vantagens da utilização dos BRM. Yang *et al.* (2009) ao operarem um biorreator a membrana de leito móvel e de forma convencional, obtiveram eficiências de remoção de DQO de 95 e 96%, respectivamente.

Da mesma maneira, é notória e muito expressiva a remoção de demanda bioquímica de oxigênio do esgoto tratado, onde 100% da concentração deste parâmetro foi removida. A DBO está diretamente relacionada com a fração orgânica presente no efluente, todavia, como supracitado, a elevada concentração de microrganismos decompositores resultou na remoção total deste parâmetro.

A avaliar a remoção dos nutrientes, as eficiências obtidas foram consideradas baixas, tendo em vista que essa concepção de tratamento não é responsável por remoção de compostos nitrogenados e fosfatados. Em relação ao nitrogênio em sua forma de amônia, foram removidos uma pequena porcentagem de 20%, não sendo de forma tão expressiva. Para que houvesse uma maior eficiência na remoção de nitrogênio, uma das alternativas a serem implantadas é a adição de um leito móvel no reator aeróbio favorecendo o desenvolvimento de microrganismos aderidos ao leito os quais são responsáveis pela degradação do material orgânico e também dos nutrientes

presentes nos esgotos (Fujii, *et al.*, 2013). Segundo Kermani *et al.* (2008), esses tipos de reatores favorecem o crescimento de microrganismos lentos como as bactérias nitrificantes e desnitrificantes o qual é favorecido devido ao seu mantimento no sistema e a produção de zonas anaeróbias e anóxicas no interior das peças.

Quando referido aos nutrientes de formas fosfatadas, o BRM operado de maneira convencional não é capaz de remover as concentrações de fósforo presentes no esgoto, o que fica nítido no presente estudo. Uma alternativa que se observa na prática é a incorporação de uma etapa anaeróbia ao sistema, onde os microrganismos presentes nestas zonas são capazes de assimilar o fósforo do esgoto e posteriormente são retiradas por meio do descarte do lodo, etapa conhecida como desfosfatação (Von Sperling, 2009). Outra alternativa seria a adição da eletrocoagulação, originando o que é chamado de eletrobiorreator, sendo capaz de precipitar o fósforo presente.

Ao avaliar a remoção de cor aparente e turbidez do esgoto, a eficiência é expressiva, uma vez que a filtração por membranas é responsável por reter a maior parte dos sólidos no reator, obtendo as eficiências de 92% e 99%, respectivamente. Devido a existência do processo de filtração nesse tipo de tratamento, resulta-se em um grande potencial de clarificação dos efluentes tratados, principalmente em função da retirada da fração sólida presente no esgoto, melhorando assim os aspectos estéticos e não impactando de forma maléfica nos corpos hídricos quando lançados, principalmente em função da redução da penetração da luz no meio aquático e assoreamento do local (Subtil *et al.*, 2013).

Avaliação do processo de colmatação da membrana de filtração

Na Figura 3 é apresentada o comportamento da pressão transmembrana (PTM) no decorrer dos 60 dias operacionais do BRM-BS. De acordo com a figura, a PTM aumentou gradualmente ao longo dos 60 dias operacionais, apresentando valor mínimo de 0.04 bar, máximo de 0.2 bar e uma velocidade de colmatação de 0.5 kPa/d. Tal valor encontra-se próximo ao observado por Jiang *et al.* (2018) para tempo de detenção hidráulica (TDH) de 18 horas e, abaixo dos valores de 1 – 3 kPa/d observados por Rodríguez-Hernandez *et al.* (2014) em um reator operado de modo contínuo. Desse modo, infere-se que além do TDH, a operação de modo descontínuo contribui em menores velocidades de colmatação das membranas.

Destaca-se que a PTM ficou abaixo do limite de 0.6 bar, assim, não havendo necessidade de limpeza química do módulo de membranas, de acordo com o recomendado pelo fabricante e com os autores Zsrai *et al.*, (2012). Tal comportamento pode estar relacionado com a operação do BRMBS em regime de fluxo sub-crítico, o qual é possível observar um crescimento da PTM mais lento no início da operação, seguido de um crescimento acentuado no decorrer da operação (Pollice *et al.*, 2005).

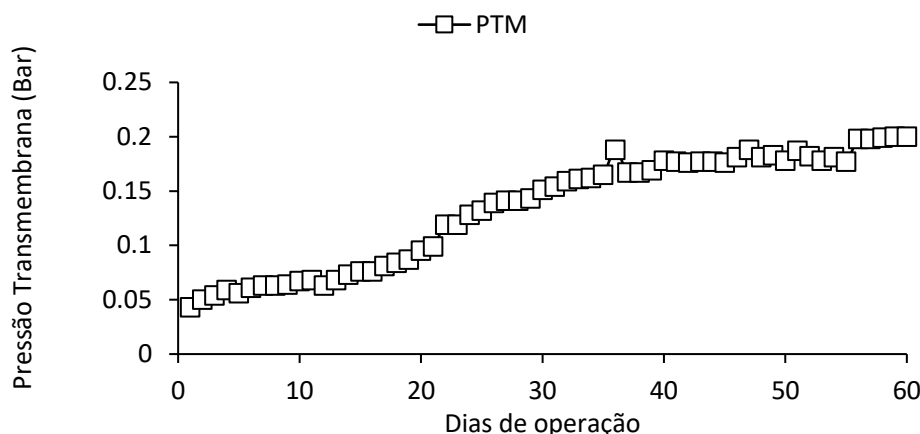


Figura 3. Valores da pressão transmembrana (PTM) ao longo dos dias operacionais

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios da fração solúvel em suspensão (SMP) e aderidas ao floco (EPS) de proteínas e polissacarídeos.

Tabela 4. Concentração média de proteínas e polissacarídeos na fração solúvel (SMP) e aderidas ao floco biológico (EPS) do licor misto

Parâmetros	Valores médios
SMP-proteínas (mg/L)	11.7 ± 1.5
SMP-polissacarídeos mg/L)	10.3 ± 1.6
EPS-proteínas (mg/gSSV)	104.7 ± 17.1
EPS-polissacarídeos (mg/gSSV)	126 ± 17

Segundo Judd (2016) e Lin *et al.*, (2014), SMP e EPS em ambas as formas contribuem com os processos relacionados à colmatagem. Desse modo, na Tabela 5, é apresentada uma matriz de correlação envolvendo esses parâmetros, além da DQOs, com a PTM.

Tabela 5. Matriz de correlação de Kendal da PTM com as variáveis DQOs, SMP e EPS.

Parâmetros	PTM (r_{Kendal} e p-valor)
DQO _s	0.85 – 0.0006*
SMP-proteínas (mg/L)	0.67 – 0.007*
SMP-polissacarídeos mg/L)	0.80 – 0.001*
EPS-proteínas (mg/gSSV)	0.76 – 0.002*
EPS-polissacarídeos (mg/gSSV)	0.70 – 0.0009*

*: significativo à 5% de probabilidade.

É possível observar que a concentração de proteínas e polissacarídeos na fração solúvel (SMP) foram menores quando comparadas as frações aderidas ao floco (EPS) (Tabela 4). Mesmo com baixos valores de PTM e velocidade de colmatação, tais parâmetros tiveram influência significativa com o aumento da PTM nas condições testadas, contribuindo diretamente com os fenômenos de colmatação das membranas. Roseberger *et al.* (2006) observaram correlação entre a concentração de EPS e índice de colmatação das membranas e, Wang *et al.* (2012) mostraram que a concentração de SMP influenciava na colmatação das membranas. O mesmo foi observado nas condições testadas.

Outro fator que pode contribuir com a baixa velocidade de colmatação das membranas é a idade do lodo. De acordo com Meng *et al.*, (2009), idade de lodo na faixa de 20-50 dias, contribuem para controle da concentração de EPS e colmatação das membranas, pois idades de lodo muito baixas favorecem a produção de SMP e EPS. Na presente pesquisa a mesma se encontra dentro da faixa observada pelos autores.

Os dados mostraram que a baixa velocidade de colmatação das membranas podem ser decorrentes, principalmente, da elevada eficiência de remoção de DQOs pela biomassa em conjunto com a idade de lodo utilizada e a forma de operação em batelada sequencial, os quais tornaram os processos relacionados à colmatação menos severos, trazendo a vantagem de uma maior vida útil para o módulo de membranas.

Conclusões

O sistema BRMBS apresentou excelente desempenho no tratamento de efluente municipal, atingindo eficiência média de remoção de: 94% DQOs, 100% de DBO₅, 93% de cor aparente e 99% de turbidez. Em contrapartida não foram observadas eficiências satisfatórias na remoção de nitrogênio amoniacal e fósforo.

Em relação ao potencial incrustante, as variáveis DQOs, SMP e EPS na forma de proteínas e polissacarídeos influenciaram significativamente no aumento da pressão transmembrana.

O modo de operação em batelada sequencial, as variáveis idade do lodo em 20 dias e a elevada contribuição pela biomassa na remoção de DQOs, tornaram os processos relacionados à colmatação menos severos. Outra vantagem observada foi a não necessidade de limpeza química do módulo de membranas devido ao não atingimento da pressão crítica.

Referências bibliográficas

- APHA, American Public Health Association (2017) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23rd.
- Belli, T. J., Battistelli, A.A., Bassin, J.P., Amaral, M.C.S., Lapolli, F.R. (2019). Influência da idade do lodo na colmatção das membranas em um biorreator à membrana tratando esgoto sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **24**(1), 157–168. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019169848>
- Brasil (2011) *Resolução CONAMA n° 430 de 13 de maio de 2011*. Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA. Brasília, DF.
- Brum, L. F. W.; Santos Júnior, L. C. O.; Benedetti, S. (2009) Reaproveitamento de Água de Processo e Resíduos da Indústria de Laticínios. In: *Internacional Workshop Advances in Cleaner Production*, **2**, 2009, São Paulo. Anais. Acesso em: 12 set. 2023. Disponível em: <https://www.advancesincleanerproduction.net/second/files/sessoes/4a/5/L.%20F.%20W.%20Brum%20-%20Abstract.pdf>
- Esteves, F.A. (2011) *Fundamentos de limnologia*. 3a ed. Rio de Janeiro: Interciência, 826 pp.
- Fujii, F.Y., Pivelli, R.P., Campos, F., Bueno, R.F., Sobrinho, P.A. (2013) Desempenho do reator integrado de lodo ativado com biofilme em leito móvel. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **18**(4), 349-358. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000400007>
- Jiang, Q., Hao, H.N.N., Nghiem, L.D, Hai, F.I., Price, W.E., Zhang, J., Liang, S. Deng, L., Guo, W. (2018) Effect of hydraulic retention time on the performance of a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system for micropollutants removal from municipal wastewater. *Bioresource Technology*, **247**, 1228-1232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.114>
- Jordão, E.P., Pessoa, C.A. (2011) *Tratamentos de esgotos domésticos*. 6rd ed. Rio de Janeiro: ABES.
- Judd, S.J. (2016) The status of industrial and municipal effluent treatment with membrane bioreactor technology. *Chemical Engineering Journal*, **305**(1), 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.141>
- Judd, S.J., Judd, C. (2011) *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. 2a ed. Elsevier Ltd, Oxford, UK, 519 pp.
- Kermani, M., Bina, B., Movahedian, H., Amin, M.M., Nikaein, M. (2008) Application of Moving Bed Biofilm Process for Biological Organics and Nutrients Removal from Municipal Wastewater. *American Journal of Environmental Sciences*, **4**(6), 682-689. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.675.682>
- Lin, H., Zhang, M., Wang, F., Mneng, F., Liao, B-Q., Hong, H., Chen, J., Gao, W. (2014) A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies. *Journal of Membrane Science*, **460**, 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.02.034>
- Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Those, C., Wilde, W., Koning, J., Van der Graaf, J., Wintgens, T. (2006) Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination*, **187**, 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.086>
- Meng, F., Chae, S.R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.S., Yang, F. (2009) Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. *Water research*, **43**(6), 1489- 1512. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>
- Metcalf, L., Eddy, H.P. (2016) *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos*. 5rd ed. Porto Alegre: AMGH, 2008 pp.
- Moura, L., Landau, E.C., Ferreira, A.M. (2016) Doenças Relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado no Brasil. In: Moura, L., Landau, E.C. (Eds.), *Variação Geográfica Do Saneamento Básico No Brasil Em 2010: Domicílios Urbanos E Rurais*, Embrapa, Brasília – DF, 189-210.
- Pollice, A.; Brookes, A.; Jefferson, B.; Judd, S. Sub-critical flux fouling in membrane bioreactors: a review of recent literature. *Desalination*, **174**, 221-230, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.09.012>

- Rodríguez-Hernández, L., Esteban-García, A. L., Tejero, I. (2014). Comparison between a fixed bed hybrid membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor for municipal wastewater treatment: A pilot-scale study. *Bioresource Technology*, **152**, 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.081>
- Rosenberger S., Kraume, M. (2002) Filterability of Activated Sludge in Membrane Bioreactors. *Desalination*, **146**, 373-379. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00515-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00515-5)
- Rosenberger, S., Laabs, C., Lesjean, B., Gnirss, R., Amy, G., Jekel, M., Schrotter, J. C. (2006) Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal
- SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2022) *Diagnóstico dos Serviços de Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - Água e Esgotos - 2022*. Acesso em: 22 mar. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>
- Subtil, E. L., Hespagnol, I., Mierzwa, J. C. (2013) Biorreatores com Membranas Submersas (BRMs): alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reúso. *Rev. Ambient. Água*, **8**(3). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1230>
- Villa, R. D., Silva, M. R., A., Nogueira, R. F. P. (2007) *Potencial de aplicação do processo foto fenton/solar como o pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios*. Acesso em: 13 set. 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/fxZjZwkjFPkYpNGZTZG3czp>
- Von Sperling, M. (2009) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3. ed. 4. reimp. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 452 pp.
- Wang, Z., Mei, X., Wu, Z., Ye, S., Yang, D. (2012) Effects of biopolymer discharge from MBR mixture on sludge characteristics and membrane fouling. *Chemical Engineering Journal*, **193**, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.019>
- Wu, J., Huang, X. (2009). Effect of mixed liquor properties on fouling propensity in membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, **342**, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.06.024>
- Yang, S., Yang, F., Fu, Z., Lei, R. (2009) Comparison between a moving bed membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor on organic carbon and nitrogen removal. *Bioresource Technology*, **100**, 2369–2374. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00002890>
- Zsirai, T., Buzatu, P., Aerts, P., Judd, S.J. (2012) Efficacy of relaxation, backflushing, chemical cleaning and clogging removal for an immersed hollow fibre membrane bioreactor. *Water Research*, **46**(14), 4499-4507. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.004>



REVISTA AIDIS

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

THE PRACTICE OF COIL (COLLABORATIVE ONLINE INTERNATIONAL LEARNING) IN BRAZIL: A CASE STUDY ON THE PRACTICE OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE ACADEMIC ENVIRONMENT

* Gilson Lima da Silva ¹
Katherine Copp Brown ²
Cássia Gisele Dias Porto ¹
José Floro de Arruda Neto ¹

Recibido el 8 de noviembre de 2023. Aceptado el 6 de mayo de 2024

Abstract

Recently, the educational system of the planet has been going through several expressive transformations. Examples include the change in the curriculum, the innovation of strategic methodologies for obtaining knowledge and especially the new remote teaching methods arising from the impacts of the COVID-19 pandemic. This study aims to present the teaching methodology of inverted class used in the discipline of Environmental Sustainability Applied to Engineering, promoted by the Federal University of Pernambuco (UFPE), at the Academic Campus of Agreste (CAA). This discipline proposes to create a collaboration network model, with national and international partnerships, for the broad teaching of environmental education. In this discipline, cultural exchanges, learning about the concept of sustainability, development of sustainable projects and understanding of the situation of environmental resources on the planet are promoted. Adopting an innovative and practical teaching methodology, with the presence of strong aggregating partnerships, it can be observed that there is a greater contribution to the dissemination of the concept of sustainability linked to environmental conservation for future generations. The entire course is based on the concept of thinking globally and acting locally.

Keywords: educational system, methodology of inverted class, environmental sustainability applied to engineering, environmental education.

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Campus Acadêmico Agreste, Brasil.

² The State University Of New York, Rockland Community College, United States of America.

* *Autor correspondente:* Universidade Federal de Pernambuco, Campus Acadêmico Agreste Technology Core. Av. Marielle Franco, s/n Km 59 - Nova, Caruaru, Pernambuco. 55014-900. Brasil. Email: gilson.lsilva@ufpe

Introduction

Almost all aspects of current everyday life are influenced by new information and communication technologies (NICTs) (Castro *et al.*, 2019). As a result, higher education institutions (HEIs) and educators are faced with the need to adapt teaching-learning methods to meet the demands of today's society. Technological innovations have not only increased access to online education (e.g. Finardi & Tyler, 2015), but also allowed for a more personalized approach to teaching and learning. In this way, NICTs have become increasingly present elements in educational institutions, as it is evident the need for higher education institutions to form digitally and interculturally competent citizens to navigate global oceans and local seas. We live in an increasingly interconnected world where the boundary between the global/local is porous in what could best be described as global issues (Piccin & Finardi, 2019a; Patel & Lynch, 2013).

The increasing complexity of NICTs has made people increasingly connected with other individuals from geographically and culturally distant locations. Thus, HEIs are being challenged to create learning environments that integrate the communicative tools and practices present in this new reality/society. The culturally diverse university community becomes globally and locally relevant, enabling intercultural awareness through contact with various perspectives and worldviews. HEIs have the task of preparing citizens to actively participate in this intercultural world, and the internationalization of higher education plays an important role in this process.

Many scholars note that “information, knowledge and innovations, as well as ways of their practical application, are increasingly considered as a source of profit in a post-industrial society” (Ussenova *et al.*, 2020). According to British scholars Bridges and Bridges (2017); Menzies and Baron (2014), “transnational education refers to all types of higher education programs, complexes of educational courses or educational services, dual enrolment opportunities, summer bridge programs and team projects”. Such programs can be provided by a country's educational system or may be independent of any systems at all. International students' exchange may be studied theoretically and applied practically. According to different research's meta-analysis, the main problems of students' exchange are the institutionalization of international education and management of students' needs, psychological and social support shapes and structure, and the transition from the national to international. Thus, “research focuses on the methods of internationalization at the individual, institutional, and national levels” (Bedenlier *et al.* 2018, p.108).

Global Citizenship Education (GCE) has been used as a catchphrase and umbrella term by researchers, educators and national/international education stakeholders to refer to the context of internationalization of education (in various levels) and its relation to globalization and citizenship. The concept of GCE can be traced back to the 1980s (Cantón & Garcia, 2018), when the United Nations (UN) Commission on Environment and Development defined “sustainable development” as meeting present needs without compromising the resources of generations future, considering aspects such

as economic growth, social inclusion, governance and environmental sustainability. At the 2015 UN summit, seventeen sustainable development goals (SDGs) were presented with 169 targets, which were then included in the 2030 agenda for sustainable development.

The legitimacy and relevance of Higher Education Institutions (HEIs) and GCE, in terms of their roles and responsibility to address society's wicked problems, have been in the spotlight, since the Covid-19 outbreak. The legitimacy/relevance crises of higher education, fueled by the pandemic, have offered a unique opportunity for HEIs to put their dysfunctional strategies behind, reviewing their mission to offer more community outreach and internationalized teaching, research, and services (Santos & de Almeida Filho, 2012). One can cite as dysfunctional education strategies the fact that higher education generates middle and upper class citizens who obtain greater benefits than those from the lower class (Rashid, 2016).

Another vital example of the higher education dysfunction experienced in so-called "one of the most developed nations in the world", the United States, explains David Brooks (2005) is how economic circumstances affect one's educational opportunities in the United States, stating that almost 75 % of students in the top quarter of the population have the opportunity to earn a college degree (Rashid, 2016). These difficulties in the educational system occur not only in specific regions, but globally. In relation to GCE in HEI, several studies have been carried out regarding ECG in HEI. In this article, the contributions of the authors stand out: Morosini and Ustárroz (2016), Jarrar (2012), Grimwood (2018), Ortega, Córdón-Pedregosa, and Sianes (2013) and Khoo (2011), various studies on GCE in this level of education can be found.

The United Nations SDG 4 (Target 4.7) challenges universities to integrate GCE across the curriculum, empowering people to assume active roles, thus contributing to a more inclusive, secure, and sustainable world. Teaching and learning initiatives that integrate international, technology enabled collaborations with multiple languages (Hildeblando Júnior & Finardi, 2018) across the curriculum stand a better chance of preparing students for the complexities of life within the context of globalization (Rubin & Guth, 2015) and, more recently, for facing the challenges posed by the pandemic. And it is precisely a teaching initiative based on this SDG, in the style as mentioned, that is being reported in this article. The case study refers to the international partnership between the Federal University of Pernambuco (UFPE), practiced between the Agreste Academic Campus (CAA) and the State University of New York (SUNY), with the participation of the Rockland Community College (RCC) unit.

Though those initiatives are proliferating, especially after the Covid-19 pandemic, their potential as alternatives for GCE remains under-researched. Considering the current scenario of HE challenged by the crisis of the modern university (Sterling, 2001), internationalization seems to have been moved to a non-priority role (Marmolejo, 2020). Other more 'pressing' issues have

caught the attention of society and higher education institutions, such as the gap between university and society; decreasing government funding for HE; equity and access to HE; emergency aid for students and institutions, just to cite a few.

The global sustainability agenda challenges traditional pedagogies and calls for an education that promotes awareness of the complexities and uncertainties of the surrounding world. An academic organization that promotes such changes can be considered reflective of social learning and social movements (Lotz-Sisitka *et al.*, 2015). Mentioning this, it can be understood that school improvement refers to collective support factors in the organization that increase students' possibilities to learn in relation to a complex surrounding world. Thus, the focus of learning within the organization is a characteristic central point in a learning improvement process (Harris *et al.*, 2013). Thinking about this mentioned situation, a teaching methodology was created used in the discipline of Environmental Sustainability Applied, an undergraduate course at the Federal University of Pernambuco (UFPE).

This teaching method used at UFPE is COIL (Collaborative Online International Learning). This method is a teaching/learning modality created at The State University of New York (SUNY) by Professor Jon Rubin in 2006. Its objective was to encourage the growth of international online cooperative learning. This action remains, has developed, and in practice, occurs as follows: a professor from university A, in partnership with a professor from international university B, set up an online teaching program for their classes. So we have 2 universities, 2 professors, 2 classes, possibly 2 languages, at least 2 cultures and a course/module being co-taught by professors from both universities, with tasks to be developed in the virtual modality in a cooperative.

Global learning is not exclusive to traveling abroad, and thanks to current technology, it has never been easier to bring the world into the classroom. Collaborative Online International Learning advances SUNY Brockport's strategic creates greater access to global engagement for their students. COIL projects prepare students with the necessary employment skills to be successful in today's culturally diverse workforce and global economy. As an online course, it is advisable to connect with your partner and start the development of the course at least one semester before offering collaboration, so that knowledge of the methodology used can be possible. In this case study it became clear that the participation of the responsible academic advisors and the engagement of the participating university students from both universities formed the basis for the development of this teaching and learning program.

As benefits of this practice, the academic community has access to global learning integrated into the curriculum and for all; applied learning; developing the skills needed for the 21st century; intercultural awareness and skills development; interdisciplinary application of knowledge; diversity and inclusion; scalable and low-cost internationalization; high-impact practice for

teaching and learning. This practice has been attracting many other universities around the world in the last year, since the COVID-19 pandemic has increased the certainty that the virtual teaching/learning environment still has much to be explored and that it is a space for interculturality and development, for those who teach and learn.

Explaining the case of study

Sustainability has many definitions, including the ability to long-term “self” sustenance (Geraldino and Mendonça, 2006) to encompass interactions between economic factors, political, environmental and social (Nunes, 2009). Creating sustainable development (SD) is one of the biggest challenges that societies around the world face today. The global sustainability debate centers on how to achieve environmental sustainability and at the same time develop our world socially and economically (Berglund *et al.*, 2020). Therefore, we can say that sustainability is searching for balance and harmonious relationship between environment and human settlements. Worldwide governors, researchers, politicians, specialists are noticing the need for change in the way we humans create, maintain and develop our settlements.

The resources (food, water, land, gas, oil, etc.) are disappearing little by little, but the population is growing faster and faster, the scale of urbanization is rapid, and the climate change is more than obvious. In a global scale, the plans and policies are getting oriented into a direction ensuring the creation of “sustainable cities and communities.” This issue is highlighted as a GOAL 11 in the 2030 Agenda for Sustainable Development of The United Nations. The goal is focused on sustainable development, including sustainable urbanization and capacity for participation, integrated and sustainable human settlements planning and management in all countries to make cities more inclusive, safe, resilient and sustainable (UN, 2015).

In this case study described in this article, the SDG that is effectively put into practice is SDG 17. SDG 17 is about partnerships, national and international, to achieve the Millennium Goals and meet the Development Goals Sustainable Development proposed by the 2030 Agenda and the UN (United Nations). The SDG 17 can be considered a basis for compliance with the other SDGs, as it proposes to strengthen the means of implementation and revitalize the global partnership for sustainable development.

In this scenario, The Collaborative Online International Learning, called COIL, is an emerging pedagogy which re-purposes online education so that it serves a new goal. The main goal is providing meaningful international experiences for university students. Many students will have careers in which they must work with other nationalities or with clients or partners in other countries, often at a distance or as part of virtual teams. But very few institutions teach the skills needed to be successful in this emerging workplace. According to Rubin (2016), it is important to note that the institutions involved need to be equally engaged and committed.

The origin of COIL dates to 2006, when SUNY established the COIL Center to encourage faculty across New York State to incorporate an intercultural dimension into their courses, undergraduate and graduate programs. The COIL Center has provided guidance to dozens of SUNY campuses as well as other US institutions implementing COIL in their efforts to develop new collaborative courses (Rubin, 2016). In this context, COIL grew out of the grassroots efforts of a group of faculty at Purchase College who were researching ways to bring tangible international perspectives into their classrooms (Rubin and Guth, 2015).

The language of instruction is a critical point in any COIL proposal and should be discussed during project planning. The reflection on the language of instruction should consider both practical issues (availability and level of proficiency of students) and political (the role of majority/minority languages, the hegemonic role of some languages, among other issues). In the case study analyzed in this work, the language of instruction used is English, the classes are taught in part in English and in Portuguese. Thus, there is a linguistic exchange between the participants, with Brazilian students improving their English and learning new expressions with American students, and Americans learning Brazilian expressions and Brazilian accents. It is not uncommon to also find in RCC students who speak Spanish due to having attended, or even belonging to, Latin countries.

This educational model emerged in an innovative and spontaneous way. While innovators around the world created similar models such as Virtual Mobility, Global Network Learning, Virtual Exchange and Telecollaboration, Jon Rubin created the COIL format in 2002, after returning from a Fulbright fellowship in Belarus. He wanted his State University of New York (SUNY) students to interact with the students he taught in Eastern Europe, so he created an intercultural video production course where these students collaborated online to co-produce videos about their lives.

According to Haug (2017), most COIL projects consist of five essential phases, namely: 1) socializing or getting to know each other; 2) project management and process planning (organizing remote teamwork); 3) research and analysis; 4) presentation of research results; and 5) evaluation and reflection. Rubin and Guth (2015) argue that courses can employ a synchronous and asynchronous combination, or, depending on institutions' academic calendars, time zone differences between countries, and student learning objectives for modules, interactions can be fully synchronous or asynchronous.

The Courses give new contextual meaning to the ideas and texts that students explore, while providing new spaces to develop their intercultural awareness (Rubin and Guth, 2015). COIL can be thought of in different disciplines as well as within different courses/modules within the same discipline. The modules can last between four weeks or an entire semester and can be an online component of a traditional class or a hybrid course as well as a fully online course (Ceo-Difrancesco and Bender-Slack, 2016). COIL is not a one-size-fits-all model, but a framework

adaptable to any course, discipline and institution. This method has become even more widespread as the COVID-19 pandemic has progressed. Due to social restrictions imposed to prevent the spread of the virus, universities had to adopt remote and distance learning practices to continue with the main purpose of mediating knowledge and forming honorable civil citizens.

Within the context of internationalization, global competencies are quintessential as students should have the capacity to examine local, global and intercultural issues in general, to be able to understand and appreciate the perspectives and world views of others, to engage in open, appropriate and effective interactions with people from different cultures, and to act for collective well-being and sustainable development (OECD, 2018). Thus, it is imperative to ascertain, to what degree students can understand and appreciate multiple cultural perspectives and establish positive interactions with people of different national, ethnic, religious, social or cultural backgrounds.

In the example of Brazil studied in this article, communication and the knowledge mediation were carried out through online platforms recognized worldwide. At the beginning of the discipline of Environmental Sustainability Applied, in 2019, communication and classes were held synchronously, in person, among UFPE students, in the classrooms of the Agreste Academic Campus (CAA). The coordinator and professor in charge for the subject led the course, detailing tasks and projects to be carried out according to the themes of environmental sustainability. Communication with SUNY students and tutors was carried out asynchronously, through meetings via video calls via the WhatsApp platform according to scheduled times.

With the establishment of the COVID-19 pandemic, in mid-2020, the entire world scenario was changed, also interfering in the educational sector across the planet. As a result, the classes and meetings necessary to proceed with the COIL began to be carried out completely asynchronously, using a more robust and sophisticated digital platform to support the number of students in the discipline and meet the demands of the discipline. The platform used became Google Meet, which has a series of video and audiovisual resources and allows online recording. The classes held among the students of the UFPE discipline, as well as the virtual meetings provided by the adoption of COIL, were all carried out by Google Meet.

The students participating in the discipline had the means of accessing technology to hold virtual meetings, allowing remote teaching to be established in the period of aggravation of the pandemic. Therefore, even with a global health crisis, COIL was still possible to be implemented. This meant a great advantage for university from both higher education institutions and did not affect the process for acquiring knowledge. On the contrary, it made access to knowledge, information and the possibility of cultural exchanges a more democratic process. In addition, online learning allows for the possibility of fast and flexible communication between educators and their students as well as providing students with easy access to information (Curran, 2001).

This study plan is based on co-teaching and co-learning in a particular course, in this case, in the Civil Engineering undergraduate course, more specifically in the teaching and learning of topics related to environmental sustainability. The students are committed to working collaboratively in online shared learning environments, under the supervision of tutors from each culture. Villela (2014) mentions some advantages for institutions, tutors and students who engage with the COIL approach, such as developing intercultural awareness and understanding the communicative and digital skills, increasing new institutional partnerships driving curricular internationalization and attracting international students, new perspectives on the content covered and fostering professional and international development for tutors and staff.

This international partnership, using the SUNY COIL model, was implemented between the universities in early 2019, and continues to provide auspicious results. Therefore, universities are constantly renewing international partnerships. This international collaboration plan was designed around a topic that is much discussed these days, environmental sustainability. In the past decade or so, sustainable development has been one area that has received an ever-growing and undisputed attention whether we talk of governments, industry or academics (e.g. European Union 2014; United Nations 2016; Silvestre and Țîrcă 2019).

The discipline is conducted in person at the beginning, before the COVID-19 health emergency was declared, and then it became a discipline with remote classes due to the restriction of virus circulation. There was always the participation of professors and students from both institutions. Theoretical classes are conducted with didactic tools that arouse interest in the subject, through synchronous classes with a maximum duration of 2 hours using the G-Suite platform. Asynchronous activities will be made available through Google Classroom with their respective deadlines. The course is taught partly in English and partly in Portuguese, all for greater cultural contact and foreign language learning.

The discipline Environmental Sustainability Applied to Engineering, which addresses the different themes of environmental management, is based on the methodology of the G5 Environmental. The G5 environmental methodology, created in 2015 by the environmentally friendly extension project (AMA), aims to meet these needs by instituting an efficient and lasting environmental awareness. The methodology is composed of five axes, called G's, which address the following topics: water resources management; energy management; solid waste management; management of fauna and flora; knowledge management. This kind of example is based on five stages that underlie and structure the G5 Environmental Methodology are: G1-Water Management, G2- Energy Management, G3- Waste Management, G4- Flora and Fauna Management and G5- Knowledge Management.

This innovative G5 Environmental Methodology can be analyzed from two perspectives, the first as a practical teaching methodology that seeks a rapid dissemination of knowledge of environmental management and the second as a technology to mitigate impacts. environmental. The G5 Environmental Methodology consists of a knowledge management tool, functioning as a five-step cycle aimed at environmental management, where each of the five steps provides a detailed view of its topic and a relationship with the next step, thus creating, an endless closed cycle. At the end of the G5 Environmental cycle, it is possible to create an environmental awareness in the program.

Breaking down the teaching methodology used in the academic discipline of an international nature, each of the G's has a goal to be achieved. The G1 aims to demonstrate the importance of water in the life of living beings and the way it is distributed on the planet, highlighting the small amount of existing potable water and highlighting the need to minimize the inappropriate use of this water, such a precious resource. In addition to presenting this importance, the G1 demonstrates techniques that can be used to maximize and optimize the use of water resources to achieve various benefits for the environment. Throughout the course, sustainable projects, definitions and important updates on the topic are presented.

The G2 has the purpose of presenting the needs that human beings have in relation to energy sources, mainly with the sustainable use of this resource, which can be acquired by renewable and non-renewable sources. Soon the G2 will work on how to use this resource correctly, through techniques that avoid waste and direct the use of renewable energy sources. The G3 aims to raise awareness about the proper destination and disposal of waste, demonstrating the negative effects on the environment if this disposal is not carried out correctly. The G3 clearly conveys selective collection techniques and models such as the 5Rs (Rethink, Refuse, Reduce, Reuse and Recycle), encouraging the reuse of materials to reduce extraction of the planet's natural resources.

The G4 seeks to disseminate the importance of preserving the fauna and flora, presenting both animals and plants that are in a delicate situation due to the uncontrolled exploitation of ecosystems. The G4 encourages contributing to the conservation and revitalization of ecosystems damaged by environmental impacts. The G5 is considered as the main G of the cycle, since it has the objective, at first, to carry out a review of all the G's presented, in this way it is possible to verify and consolidate the knowledge taught. In a second moment, the G5 seeks to develop a critical and constructive sense of the members who are in the training phase to start a new cycle in search of new technologies and new knowledge so that there can be continuous improvement.

Meetings with international partners were always held asynchronously, but classes between students of the discipline in each location are held in person. In face-to-face synchronous classes, students can apply the inverted classroom methodology, where the students themselves are the

holders of knowledge that will be discussed with the tutors for a better improvement of the topic addressed. It is worth noting that the Rockland Community College system includes students from various locations, ethnicities and mainly from various courses at the teaching center, since the academic discipline is open to all courses present at the local university. Regarding UFPE, the profile of the academic discipline is more directed to undergraduate students in CAA.

Methodology

The central theme of the international partnership of this case study presented in the article is environmental sustainability. Which means that all synchronous and asynchronous encounters are modeled around the theme of sustainability. The base methodology of the discipline, already mentioned and explained above, is the G5 Environmental methodology. According to Haug (2017), most COIL projects consist of five essential phases, namely: 1) socializing or getting to know each other; 2) project management and process planning (organizing remote teamwork); 3) research and analysis; 4) presentation of research results; and 5) evaluation and reflection. This example mentioned between UFPE and SUNY has specific characteristics that guide the model used in the discipline, but the essence is based on the five essential phases mentioned by Haug.

The first phase, which may seem trivial, simple and recreational, is fundamental in creating group unity (Haug 2017). During this phase, trust is built, tutors, faculty, instructors and students are introduced, and cultural differences are explored. If this phase is omitted, the participants may have problems regarding the lack of communication, interaction and knowledge among themselves for the continuation and development of activities during the project. This stage can be defined as the moment when the person behind the technology is discovered, the participating individual is known and analyzed. For this reason, it is important that tutors facilitate some icebreaker activities and motivate students to use videoconferencing as a collaborative tool in asynchronous activities.

The second phase should also receive the necessary attention (Haug 2017). Cultural factors such as time orientation, leadership, communication styles, task orientation, level of ambition and group focus play an important role. It is up to tutors to explain how cultures may differ in their approaches and to help students deal with these differences (Haug 2017). The research and presentation phases show, according to Haug (2017), similarities with face-to-face projects. It is important to emphasize that it is essential to mention and decide deadlines in the delivery of tasks, since virtual teams are already challenged by the need to work remotely, needing a period to organize and produce the requested tasks. shorter periods and moments of reflection help maintain the student motivation.

In this context of the reported case study, the teaching-learning method used was based on online meetings as mentioned, where each meeting addressed a specific theme with a presentation activity. All synchronous online meetings are based on the five phases described by Haug. According to the teaching plan used, a weekly online meeting is held, and each meeting lasts approximately one hour, corresponding to the teaching time established by the teaching plan of the subjects. The amount of necessary online meetings was foreseen, however, according to the flow of the discipline, adjustments are always necessary so that all programming and teaching content are fulfilled, properly addressing all topics related to environmental sustainability, always based on the methodology G5 Environmental.

At the beginning of the course, a presentation is made of the teaching plan prepared by the academic discipline advisor. At the beginning, the partnerships, national and international, of the discipline, the G5 methodology of Environmental Management, the forms of evaluation, projects and presentations that are requested for the correct fulfillment of the academic discipline are presented. Basically, it is explained what will be charged and how it will be charged to each student of the discipline. Soon after, the students are divided into five teams, so that the G5 Environmental methodology is consolidated. Each team have to be responsible for a G of the G5 Environmental methodology. This division is important because it directs the subject of study of each participant of the discipline and leads to the main subject addressed during synchronous meetings.

In the case of Environmental Sustainability Applied, in addition to the international partnership with Rockland Community College through SUNY, there is the formation of a local partnership between CAA and a municipal school, Escola Maria do Socorro de Freitas Municipal Intermediary. This partnership is based on the elaboration of sustainable projects to be implemented in the environment of the school institution. Sustainable projects are developed throughout the discipline by each team responsible for one of the G's, and these projects must aim at improving the management of the respective resource related to the environmental G. All sustainable projects must be analyzed according to the feasibility for implementation in the Municipal School, since it is useless to elaborate a project that does not have the feasibility of effective execution.

The project elaboration scheme has a line of reasoning and follow-up according to the theme of the proposed initiative. The working dynamic works as follows: the G1 group must propose a project to improve water management in the municipal school, the G2 group must propose a project to improve the school's energy management, the G3 group must improve the management of waste from the school environment, the G4 must preserve the local fauna and flora, the G5 group must propose initiatives to expand the knowledge management of the members of the educational institution. During these semesters, the sustainable projects developed always showed satisfactory results and won over the students of both educational institutions.

Regarding the international partnership, the online meetings are called Face to Face Meeting, being considered unique and enriching moments due to the opportunity of an experience of cultural exchanges. One can analyze the division of the course into four modules. The first module consists of the Face to Face Meeting which is called icebreaking. The second module consists of the presentation of environmental problems, present in the country and in the cities of the Members, related to each G of the G5 Environmental methodology. The third module consists of the presentation of sustainable projects designed by Brazilian students and some innovative solutions for managing the resources being studied. The fourth and final module consists of the exchange of cultural presentations between the course members.

Icebreaking

In Icebreaking, which consists of the initial meeting, normally the duration time is 50 min and only a virtual meeting is needed to carry out this stage. At this stage, the course tutors introduce themselves, introduce the subject, and the participants socialize by getting to know each other. As mentioned earlier, if this phase is omitted, participants can have problems regarding the lack of communication and the development of activities. To further direct this step, some icebreakers and motivating activities are suggested to encourage students to use videoconferencing to build friendships and as a tool for collaboration in asynchronous activities.

What is usually done at this stage is the individual presentation of each member. During a certain time, the student of the course presents his name, age, his course, its characteristics, his experiences and talks about the most varied and diverse subjects possible, such as the family, what he likes and what he doesn't like (books, movies, series, music, food, sports etc.), basically it is allowed to talk about each one's life story. This sparks interest and creates connections between the students themselves. Some students present where they are currently present, such as their homes, school or work environment. Despite being a short presentation, it is possible to get to know the other person behind the camera better, creating bonds and lasting friendships with each other.

Presentation of environmental problems

In this module of the course, the groups already established, the 5 G's, start online presentations about each topic. The sequence of presentations does not follow a rigid rule, following the flow of information. Usually, the Brazilian and American groups G1, the G2, the G3, the G4 and the G5 are presented, to follow the logical sequence of the cycle of the G5 Environmental methodology. These presentations are delivered by any virtual instrument preferred by the teams, PowerPoints, Words, Videos, Canvas or any other digital tool and technological resource.

The Brazilian teams must present about the environmental problems correlated with the environmental resources of Brazil and the city of Caruaru. The American teams must present about the environmental problems related to the United States and New York State. If any

participant studies in one of the educational institutions participating in the international partnership, but is from another location (Country, State, City or Municipality), the team can, and is recommended, present about the environmental problems of these locations. This further enriches the process of cultural exchange and learning.

Environmental problems are presented according to the team's theme, the G1's groups discuss and exemplify existing water management problems, the G2 on energy management problems, the G3 on waste management problems, the G4 on the problems of fauna and flora management and the G5 mentions the difficulties and challenges for knowledge management. A deep and solid analysis of the problems related to the environmental resources of each location must be carried out. Therefore, it is possible to have a global perspective on environmental sustainability, the main theme of the discipline.

After the presentations, a time interval is available for questions, doubts and curiosities inherent to the process of acquiring knowledge. It is an active teaching methodology, called a flipped classroom, in which the students themselves are the researchers and holders of knowledge that will be mediated to their colleagues. The tutors help a lot in this phase, answering the pertinent questions, improving and adding knowledge, in addition to leading the members in an observant way, not interfering with the classic form of education. The key is the experience, research and knowledge exchange that are generated in this module.

The meetings are provided for the duration of fifty minutes per class established by the discipline's teaching plan. However, due to the amount and diversity of information, only one weekly meeting is usually not enough, sometimes requiring three meetings in total, which can be distributed in the most favorable way for the participants (one weekly meeting, two weekly meetings, or any another alternative). The duration of this module depends a lot on the profile of the semester's teaching class, the schedule adopted and the number of students in the class.

Presentation of possible solutions to environmental problems

In this module of the course, possible solutions, recent studies and research on the environmental problems mentioned in the previous module are presented. Each team will mention innovative solutions and methods that mitigate, or may mitigate in the future, the environmental problems that exist in the countries and localities studied, in order to make the environment more sustainable. This module is very challenging, as it proposes that students leave their comfort zone to provide means for sustainable development.

The Brazilian teams report on the local partnership with the Escola Municipal Intermediaria Maria do Socorro de Freitas, presenting the context of the sustainable projects developed by each team to provide better management of environmental resources. Sustainable projects, ideas and

conceptions are mustards, as well as the forecast of how they will impact the environment of the local partner educational institution. All details and forecasts are estimated and based on previous research and statistical data. These are projects that should be simple, but that have a significant impact on local environmental sustainability.

The American teams present current solutions, and even propose new solutions, for the environmental problems reported in the country and in the city. With this, the G's integrate with each other, and expand the perspective of analysis. The G1 reports on the sustainable management of water resources, the G2 on energy management, the G3 on the management of solid resources, the G4 on the management of fauna and flora, and the G5 on knowledge management. Sustainable initiatives are presented for the correct management and handling of natural resources.

This course module follows the same pattern as the others, with an estimated duration of 50 minutes for each virtual meeting. As the presentations are developed, knowledge is shared, and depending on the profile of the class and the scope of the related topics, a greater number of synchronous meetings will be necessary for the conclusion of the topic. At the end of each presentation, a period of time is available for questions and pertinent questions. The presentation and research phases show the ability of students and teams to approach and acquire knowledge about the topics covered in the discipline, in addition to consolidating the concept of applied environmental sustainability proposed by the course.

Cultural exchange

COIL prepares future professionals for a diverse and multicultural work environment of cultural exchange, assists teachers in offering subjects that promote interculturality, leverages online learning methods and helps achieve the institutions' academic objectives (Canto *et al.*, 2022). For Crawford, Swartz, et al. (2020, p. 993), COIL also enables the learning of social skills that are valued by employers and that are necessary in workplaces in the globalized world.

Academic cultural exchange is important for the emergence of new institutional cultural patterns. It is through this that a transformation can occur in the institutions involved. This is due to the fact that by opening dialogue between institutions, learning takes place in both, providing opportunities for transformation in both. Therefore, over the years of collaboration, continuing this collaboration from generation to generation, an adequate portion of the institutional culture of University A can be transmitted to University B, and from University B to A.

It is because human beings internalize forms of mediation provided by cultural, historical and institutional forces that their mental functioning is sociocultural situated (Vygotsky 1978) and each culture has its own set of tools and psychological situations in which the tools are appropriate (Wachter, 2003). In this sense, culture, according to Severino (2010, p. 81) means “a

conjunction of objects that result from the productive, social and symbolic activities of men". To expand cultural exchanges, the concept of cyberspace has been increasingly used. Cyberspace is used as a space for obtaining new knowledge, the locus of practices that constitute cyberculture, providing cultural exchange without effort providing cultural exchange without spending great efforts related to financial expenses on travel, food or accommodation, and the use of sophisticated equipment that requires qualified labor to handle.

In this final module of the course related to international partnerships, cultural exchange is the main target. It lasts for approximately 50 minutes, but most of the time, since it is a fundamental step, the time is extended so that this interaction can be completed in a single synchronous meeting. Students, through this stage, learn about the main cultural aspects of each study location. Different cultural aspects are addressed in this virtual meeting, making possible the knowledge of the existing cultural diversity on the planet. Without leaving the country of origin, it is possible to know the culture of other countries in a more comfortable and comprehensive way due to globalization, which entails the transposition of barriers for the transformation of cultural education.

Brazilian students present about the culture of Brazil, giving main emphasis to the cultural aspects of the city of Caruaru, where the CAA is located. Through videos, photos, music and other utilitarian digital resources, students present information about the region's cuisine, the main tourist attractions, the main commemorative parties and events in the region, as well as the main renown and representatives of Brazilian and local culture. To address each of the cultural topics mentioned, teams are divided differently, in order to standardize the number of members, groups G1, G3 and G3 are usually included in a single team, and groups G4 and G5 in another team, directing the topics to each other.

North American students also present on the main cultural aspects of their country and region. Cultural topics such as cuisine, main festivals and local attractions, festive and commemorative dates, social behavior, habits and traditions are addressed, as well as the main renown and highlights that are part of the local culture. As the RCC is a very comprehensive university center that houses members from various regions, countries and continents; if there are members from other locations, it is productive for these members to also present the cultural aspects ingrained in their culture, for a more enriching cultural exchange.

Results

The collaborative universities centers CAA and RCC developed an ideal curriculum to enhance and nurture students' "Future Work Skills 2020" define by the Institute for the Future. Such Future Work Skills, defined as Sense Making, Social Intelligence, Novel & Adaptive Thinking, Cross-Cultural Competencies, Computacional Thinking, New Media Literacy, Transdisciplinary, Design

Mindset, Cognitive Load Management, and Virtual Collaboration, are very necessary in a globalized world. The curriculum fully employs PBL (Problem Base Learning) strategies in global teams, where teams for PBL are organized with students with heterogenous cultural backgrounds in a virtual environment.

In the case study of the UFPE international partnership there is still an additional factor that is observed as a result of synchronous interactions. This additional factor is the use of COIL to develop a distance project between two or more institutions involved, intercultural competences, digital skills and exchange of teaching, knowledge and learning. The interest of Brazilian students in internationalization offers practical experiences that are highly valued in the job market, such as: Managing situations of leadership and motivation; Improve communication skills; Interculturality; Learning new languages; Interact, participate and collaborate with people from different cultures; Networking; Find new applications of technology in the current scenario; Development of digital skills, etc.

The effective participation of students in this COIL project is the key to providing an international experience at low cost to the institution, providing intercultural experience to those who did not have an opportunity to exchange. The project aims to increase the interest of international students in Brazil, as a study destination, more specifically, at UFPE, since it aims at the internationalization of the campus, providing its exposure to interested parties. It is also possible to mention the incentive for Brazilian students to develop exchange partnerships with SUNY, aiming to overcome barriers to expand the frontiers of Knowledge.

An interesting result is that the practice of COIL can develop linguistic competence due to its multimodal form (audio, video and multimedia materials)" (Hildeblando Júnior, 2019). The use of multimodal materials not only helps retain students' attention, but also has the potential to improve learning outcomes, as participants feel more engaged with interactive video conferencing materials as they enable the provision of immediate, accurate, consistent and individualized feedback. In addition to assisting language development, COIL can also facilitate content development, as features, for example, "screen sharing, images, music, chat options, audio calling and other features of the software used", can be used as mediation tools to help in this process (Júnior; Finardi & El Kadri, 2022).

Qualitatively, it is observed that students who go through this experience of academic internationalization do not have the same mentality as before when they started the discipline. The first factor that is transformative for university students who take this discipline of the undergraduate course is the development of a sustainable conscience, which provides sustainable development. Students, throughout the course, learn about existing environmental problems in a global sphere, about how it is possible to implement an adequate management of environmental resources, and even to propose innovative solutions to ensure environmental sustainability.

With this, the vision of environmental sustainability is expanded, and students thinking globally can act in a practical way locally, proposing improved alternatives for the management of environmental resources. Students who participated in this course report that it is a unique and innovative experience. Academic students are very interested in the subject of environmental sustainability, and when this discipline is combined with the opportunity for cultural exchange with other universities, with learning of multicultural interaction, the challenges of the discipline become even more instigating for the intellectual development of the participants.

Indirectly, the benefits observed for those who attended the discipline are the development of leadership skills, due to the need for constant weekly teamwork, and mainly the indirect benefit in obtaining academic results in other disciplines of the courses, since the discipline of Environmental Sustainability encourages students to participate in new challenges and proposes a more effective way to implement study plans, where the student must pursue and obtain new knowledge, always with the help of the professors. Directly, there is the opportunity to practice new languages, especially English, which is so necessary in the globalized world.

Conclusion

The internationalization of higher education, in turn, is the hallmark of the relationships between the different universities and is at the heart of the university process, legitimizing the circularization of knowledge. Thus, the characteristics of education are closely intertwined with the process of globalization and internationalization. Basically, it is the impacts of these processes that will shape the social profile of graduating students, who will now be considered active citizens in promoting effective changes in society. In this analyzed case of study, the international partnership is carried out through the UFPE and SUNY universities, having as a basis for conducting the process the COIL prepared by SUNY.

This internationalization partnership offers practical experiences that are highly valued in the job market, such as: managing situations of leadership and motivation; improve communication skills; interculturality; interact, participate and collaborate with people from different cultures; learning different languages; Networking; find new applications of technology in the current scenario; digital skills development. Therefore, the basis of this taught subject is to provide cultural exchange between university students.

As part of the science course Environmental Pollution Topics, American students effectively practiced the concepts of water, energy, waste and fauna and flora management, also applying ways of managing the knowledge obtained. Through research and information exchange, students have accumulated a certain amount of knowledge about environmental sustainability and sustainable development. With the diversity of professions and university education on the

part of Americans, the use of the acquired knowledge can be applied in the most diverse areas of student training. Already in the job market, they also improved their ability to manage leadership situations; improve communication skills; interculturality; interact, participate and collaborate with people from different cultures; and learn a different language.

The main differential of the COIL partnership mentioned in the article is the training of individuals, mainly engineers in the case of CAA, with adequate training about environmental sustainability, and with a practical environmental awareness that can be implemented in daily life. The course discipline proposes to act locally, thinking globally, so that the concept of sustainable development can be disseminated in countries. Initiatives of educational plans like this prove that it is possible to fight for a more sustainable and global world, where there are no insurmountable barriers to development.

Agradecimientos

The authors would like to thank the Foundation for the Support of Science and Technology of the State of Pernambuco (FACEPE), the Postgraduate Program in Civil and Environmental Engineering (PPGECAM), the Advanced Environmental Management Group (GAMA), and the Academic Center of Agreste from UFPE, for all the support and encouragement for the development of the research.

References

- Bedenlier, S., Kondakci, Y., Zawacki-Richter, O. (2018) Two Decades of Research Into the Internationalization of Higher International Education: Major Themes in the Journal of Studies in International Education (1997-2016). *Journal of Studies in International Education*, **22**(2), 108-135. <https://doi.org/10.1177/1028315317710093>
- Berglund, T., Gericke, N., Boeve-de-Pauw., Olsson, D., Chang, T-C. (2020) A cross-cultural comparative study of sustainability consciousness between students in Taiwan and Sweden. *Environmental, Development and Sustainability*, **22**, 6287–6313. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00478-2>
- Bridges, W., Bridges, S. (2017) *Managing Transitions, 25th anniversary edition: Making the Most of Change*. Hachette Books. 208 pp.
- Canto, R. C. R., Dergint, D. E. A., Stankowitz, R. F., Mendes, M. A. (2022) Collaborative Online International Learning: revisão de literatura para um modelo de intercâmbio virtual como alternativa de internacionalização nas Instituições de Ensino Superior. *REPPE-Revista de Produtos Educacionais e Pesquisas em Ensino*, **6**(1), 176-198. <https://seer.uenp.edu.br/index.php/reppe/article/view/1006>
- Cantón, A., Garcia, B. I. (2018) Global citizenship education. *New directions for student leadership*, **2018**(160), 21-30.
- Castro, A. L. S., Hildeblando Júnior, C. A., K. Finardi, K. R. (2019) Teachers and students online but disconnected. *INTED2019 Proceedings*, 420-427. <https://doi.org/10.1002/yd.20307>
- Centro COIL da Universidade Estadual de Nova York. (2015) *COIL Faculty Handbook*. Nova York: Centro COIL da Universidade Estadual de Nova York, 2015.
- Ceo-Difrancesco, D., Bender-Slack, D. (2016) *Collaborative Online International Learning: Students and professors making global connections*. In: MOELLER, A. J. (Ed.). *Fostering connections, empowering communities, celebrating the world*. Egg Harbor: Central States Conference on the Teaching of Foreign Languages, 2016, 147-174. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1297&context=teachlearnfacpub#page=162>

- Crawford, I., Swartz, S., Luck, S., Barbosa, B. (2020) *Employability Through Experiential Delivery of Intercultural Communication Skills Online*. In 6th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'20), No. 30-05-2020, 993-1000. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/HEAd20.2020.11185>
- Curran, C. (2001) The phenomenon of on-line learning, Department of Higher Education. National plan for higher education. Pretoria: Department of Education, *European Journal of Education*, **36**(2), 113–132. <https://www.jstor.org/stable/1503647>
- De Wit, H. (2002) *Internationalization of higher education in the United States of America and Europe: A historical, comparative, and conceptual analysis*. Westport: Greenwood Press, 2002. https://pure.uva.nl/ws/files/3024706/11302_UBA002000438_19.pdf
- De Wit, Hans. (2011) Internationalization of Higher Education: Nine Misconceptions. *International Higher Education*, **64**, 6–7. <https://www.eurashe.eu/wp-content/uploads/2022/02/wg4-r-internationalization-trends-issues-and-challenges-hans-de-wit.pdf>
- De Wit, Hans. (2020) Internationalization of Higher Education: The Need for a More Ethical and Qualitative Approach. *Journal of International Students*, **10**(1): i–iv. https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/42916/1/2020_Book_EuropeanHigherEducationAreaCha.pdf#page=55
- De Wit, H., Leask, B. (2017) *Global: internationalization, the curriculum, and the disciplines*. In: MIHUT, G.; ALTBACH, P. G.; DE WIT, H. (Eds.). Understanding higher education internationalization: Insights from key global publications. Rotterdam: Sense Publishers, 345-348.
- European Union. (2014) Report on the EU and the Global Development Framework after 2015 (2014/2143(INI)). European Union. Committee on Development. Retrieved May 8, 2017. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2014-0037_EN.html
- Finardi, K. R., Prebianca, G. V. V., Momm, C. F. (2013) Tecnologia na educação: O caso da internet e do inglês como linguagens de inclusão. *Cadernos do IL*, (46), 193-208. <https://doi.org/10.22456/2236-6385.35931>
- Finardi, K. R., Tyler, J. R. (2015) *The role of English and technology in the internationalization of education: Insights from the analysis of MOOCs*. In: Edulearn15 Proceedings. 7th International Conference on Education and New Learning Technologies. Barcelona: IATED, v. 1. 11-18. <https://library.iated.org/view/FINARDI2015ROL>
- Finardi, K. R. (2016) Language policies and internationalization in the role(s) of English as an additional language. In: SCIRIHA, L. (Ed.). *International Perspectives on 87 Bilingualism*. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, v. 1, 2016, 79-90.
- Finardi, K. R., Archanjo, R. (2018) *Washback Effects of the Science Without Borders, English Without Borders and Language Without Borders Programs in Brazilian Language Policies and Rights*. In: SIINER, M.; HULT, F. M.; KUPISCH, T. (Eds.). *Language Policy and Language Acquisition Planning*. Cham: Springer International Publishing AG, 2018, 173-185. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-75963-0_10
- Geraldino, A., Mendonça, M. (2006) *SUSTENTABILIDADE EMPRESARIAL: Conceito e Indicadores*. III Convibra, 20. https://web.archive.org/web/20180425181003id/http://www.convibra.com.br/2006/artigos/61_pdf.pdf
- Grimwood, R.. (2018) Producing Global Citizens? How New Zealand Universities Implement the Concept of Global Citizenship. *New Zealand Sociology*, **33**(1), 97–120. <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/INFORMIT.777565281145745>
- Guimarães, F. F., Finardi, K. R. (2018) Interculturalidade, internacionalização e intercompreensão: Qual a relação? *Ilha do Desterro*, **71**(3), 15-37. <https://doi.org/10.5007/2175-8026.2018v71n3p15>
- Guth, S. (2013) *The COIL Institute for globally networked learning in humanities*. http://coil.suny.edu/ites/default/files/case_study_report.pdf

- Harris, A., C. Day, D. Hopkins, M. Hadfield, A. Hargreaves, and C. Chapman. (2013) *Effective Leadership for School Improvement*. London: Routledge Falmer. Retrieved from: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=i5Pi4M1DPNsC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Harris,+A.,+C.+Day,+D.+Hopkins,+M.+Hadfield,+A.+Hargreaves,+and+C.+Chapman.+\(2013\).+Effective+Leadership+for+School+Improvement.+London:+Routledge+Falmer.&ots=37Vy2Pklk4&sig=FyXI6OI6q_SqPS3cokN760V9XZA#v=onepage&q=Harris%2C%20A.%2C%20C.%20Day%2C%20D.%20Hopkins%2C%20M.%20Hadfield%2C%20A.%20Hargreaves%2C%20and%20C.%20Chapman.%20\(2013\).%20Effective%20Leadership%20for%20School%20Improvement.%20London%20Routledge%20Falmer.&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=i5Pi4M1DPNsC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Harris,+A.,+C.+Day,+D.+Hopkins,+M.+Hadfield,+A.+Hargreaves,+and+C.+Chapman.+(2013).+Effective+Leadership+for+School+Improvement.+London:+Routledge+Falmer.&ots=37Vy2Pklk4&sig=FyXI6OI6q_SqPS3cokN760V9XZA#v=onepage&q=Harris%2C%20A.%2C%20C.%20Day%2C%20D.%20Hopkins%2C%20M.%20Hadfield%2C%20A.%20Hargreaves%2C%20and%20C.%20Chapman.%20(2013).%20Effective%20Leadership%20for%20School%20Improvement.%20London%20Routledge%20Falmer.&f=false)
- Haug, E. (2017) *Examples and outcomes of embedding collaborative online international learning (COIL) in the curriculum*. In: Conference Proceedings. 7th International Conference of The Future of Education. Florença: [liberiauniversitaria.it](http://www.liberiauniversitaria.it), 253-255. [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=B4lnDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA253&dq=Haug,+E.+\(2017\).+Examples+and+outcomes+of+embedding+collaborative+online+international+learning+\(COIL\)+in+the+curriculum.+In:+Conference+Proceedings.+7th+International+Conference+of+The+Future+of+Education.+Floren%C3%A7a:+liberiauniversitaria.it,+p+253-255,+2017.&ots=YK0xQJKIAO&sig=EjZsismHCsQBjmB4cCtDO7_iE3A#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=B4lnDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA253&dq=Haug,+E.+(2017).+Examples+and+outcomes+of+embedding+collaborative+online+international+learning+(COIL)+in+the+curriculum.+In:+Conference+Proceedings.+7th+International+Conference+of+The+Future+of+Education.+Floren%C3%A7a:+liberiauniversitaria.it,+p+253-255,+2017.&ots=YK0xQJKIAO&sig=EjZsismHCsQBjmB4cCtDO7_iE3A#v=onepage&q&f=false)
- Hildeblando Júnior, Carlos Alberto, and Kyria Rebeca Finardi. (2018) Internationalization and Virtual Collaboration: Insights from COIL Experiences. *Revista Ensino Em Foco*, 1(2), 19–33. Retrieved from: <https://blog.ufes.br/kyriafinardi/files/2018/09/Hildeblando-Jr-Finardi-2018.pdf>
- Hildeblando Júnior, Carlos Alberto. (2019). *CA Affordances da COIL: análise de uma experiência entre UFES e UAH*. 2019. 142 f (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Educação), Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória). Retrieved from: https://sappg.ufes.br/tese_drupal//tese_13987_Disserta%E7%E3o%20Carlos%20Hildeblando%20%28vers%E3o%20final%29.pdf
- INEP, Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (2017) *Censo da educação superior 2016*. August 31st, 2017. Retrieved from: https://download.inep.gov.br/educacao_superior/censo_superior/documentos/2016/notas_sobre_o_censo_da_educacao_superior_2016.pdf
- ICFE, International Council for Open and Distance Education (2022) *Internationalizing Online Education through COIL (Collaborative Online International Learning)*. May 10th, 2022. Retrieved from <https://www.icde.org/icde-blog/coil>
- Jarrar, A. G. (2012) Global Citizenship Education in Jordanian Universities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 47, 1922–1926. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.924>
- Júnior, C. A. H., Finardi, K. R., El Kadri, M. (2022) Affordances da COIL para a internacionalização do ensino superior: um estudo de caso. *Revista da ANPOLL*, 53(1), 253-272. <https://doi.org/10.18309/ranpoll.v53i1.1615>
- Khoo, Su-ming. (2011) Ethical Globalisation or Privileged Internationalisation? Exploring Global Citizenship and Internationalisation in Irish and Canadian Universities. *Globalisation, Societies and Education*, 9(3–4), 337–353. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315540856-5/ethical-globalisation-privileged-internationalisation-exploring-global-citizenship-internationalisation-irish-canadian-universities-su-ming-khoo>
- Lotz-Sisitka, H., A. Wals, D. Kronlid, and D. McGarry. (2015) Transformative, transgressive social learning: rethinking higher education pedagogy in times of systemic global dysfunction. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 16, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.07.018>
- Marmolejo, Francisco. (2020). Reimagining Internationalization in a COVID-19 World. Oral Presentation, CBIE Online Symposium, June 30, 2020. <https://doi.org/10.1080/14767724.2021.1875808>
- Meneghel, Stela Maria. (2001). *A Crise da Universidade Moderna no Brasil*. PhD dissertation. Universidade Estadual de Campinas. <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2001.212015>

- Menzies, J. L., Baron, R. (2014) International postgraduate student transition experiences: The importance of student societies and friends. *Innovations in Education and Teaching International*, **51**(1), 84-94. <https://doi.org/10.1080/14703297.2013.771972>
- Morosini, M- C. (2016) Estado do conhecimento sobre internacionalização da educação superior - Conceitos e práticas. *Revista Educar*, **28**, 107- 124. <https://doi.org/10.1590/S0104-40602006000200008>
- Morosini, M., Ustárroz, E. (2016) Impactos da Internacionalização da Educação Superior na Docência Universitária: Construindo a Cidadania Global por meio do Currículo Globalizado e das Competências Interculturais. *Revista Em Aberto*, **29**(97), 35–46. Retrieved from: https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/14622/2/Impactos_da_Internacionalizacao_da_Educacao_Superior_na_Docencia_Universitaria_Construindo_a_cidadania_global_atraves.pdf
- Nunes, D. G. (2009) *Crerios para avaliar a Sustentabilidade na Vizinhança ao nível dos Bairros*. Lisboa: UFT. Retrieved from: https://www.researchgate.net/profile/Duarte-Marques-Nunes/publication/281589801_Criterios_para_Avaliar_a_Sustentabilidade_na_Vizinhança_ao_Nível_dos_Bairros/links/55eef6f108aef559dc44a5c7/Criterios-para-Avaliar-a-Sustentabilidade-na-Vizinhança-ao-Nível-dos-Bairros.pdf
- OECD, Organization for Economic Co-operation and Development (2018) *Preparing our youth for an inclusive and sustainable world*. The OECD PISA global competence framework. Retrieved from: <https://www.oecd.org/pisa/Handbook-PISA-2018-Global-Competence.pdf>
- Ortega, L., Cerdón-Pedregosa, R., Sianes, A. (2013) University and Non-Government Organisations: Indispensable Partners in Global Citizenship Education in Spain. *The New Educational Review*, **34**(4), 74–84. Retrieved from: <https://bibliotekanauki.pl/articles/16530331.pdf>
- Patel, F., Lynch, H. (2013). Glocalization as an alternative to internationalization in higher education: embedding positive glocal learning perspectives. *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education*, **25**(2), 223-230. Retrieved from: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1016539.pdf>
- Piccin, G. F. O., Finardi, K. R. (2019.a) A Internacionalização a partir de diferentes loci de enunciação: As concepções de sujeitos praticantes do currículo profissional. *Trabalhos em Linguística Aplicada*, **58**(1), 313-340. <https://doi.org/10.1590/010318138653317425511>
- Piccin, G. F. O., Finardi, K. R. (2019) Questioning global citizenship education in the internationalization agenda. *SFU Educational Review*, **12**(3), 73-89, 2019b. <https://doi.org/10.21810/sfuer.v12i3.1015>
- Porcino, M. C.; Finardi, K. R. (2016) Construção de cidadania por meio do ensino de língua estrangeira e do letramento digital: Uma Proposta de WebQuest. *Antares Letras e Humanidades*, **8**(15), 144-166. Retrieved from: <https://blog.ufes.br/kyriafinardi/files/2017/08/Constru%C3%A7%C3%A3o-de-Cidadania-por-Meio-do-Ensino-de-L%C3%ADngua-Estrangeira-e-do-Letramento-Digital-%E2%88%92-Uma-Proposta-de-WebQuest-2016.pdf>
- Rashid, A. B. A. (2017) Functional and Dysfunctional View Of Higher Education. *Journal of Asian Islamic Higher Institutions*, **3**(1). Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/339593405_FUNCTIONAL_AND_DYSFUNCTIONAL_VIEW_OF_HIGHER_EDUCATION
- Rubin, J. (2015) Faculty guide for collaborative online international learning course development. Retrieved from: http://www.ufic.ufl.edu/UAP/Forms/COIL_guide.pdf
- Rubin, J. (2016) The collaborative online international learning network. In: O'DOWD, R.; LEWIS, T. (Eds.). *Online Intercultural Exchange: Policy, Pedagogy, Practice*. Nova York: Routledge, 2016, 263-272. Retrieved from: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315678931-20/collaborative-online-international-learning-network-jon-rubin>

- Rubin, J., Guth, S. (2015) *Collaborative Online International Learning an Emerging Format for Internationalizing Curricula*. In: MOORE, A. S.; SIMON, S. (Eds.). *Globally Networked Teaching in the Humanities: Theories and Practice*. Nova York/Londres: Routledge, 2015, 15-27. Retrieved from: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315754925-3/collaborative-online-international-learning-jon-rubin-sarah-guth>
- Santos, F. S., de Almeida Filho, N. (2012) *A quarta missão da universidade: internacionalização universitária na sociedade do conhecimento*. Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press.
- Severino, A. J. (2010) *Filosofia da educação: construindo a cidadania*. São Paulo: FTD, 2010. Retrieved from: <https://repositorio.usp.br/item/000867645>
- Silvestre, B. S., Țircă, D. M. (2019) Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, **208**, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.244>
- State University of New York (SUNY). Collaborative Online International Learning. COIL: Brockport's Virtual Global Classroom. SUNY BROCKPORT. Retrieved April 4, 2024, Retrieved from: https://www.brockport.edu/academics/international_education/coil
- Sterling, S. R., Orr, D. (2001) *Sustainable education: Re-visioning learning and change (Vol. 6)*. Totnes: Green Books for the Schumacher Society.
- Teekens, H. (2013). Internationalisation at home – Crossing other borders. *University World News*, 2013. Retrieved from: <https://www.universityworldnews.com/post.php?story=20130613084529186>
- UN, United Nations (2015) *Cities—United Nations sustainable development action 2015*. Retrieved from United Nations, sustainable development website: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/cities>
- UN, United Nations (1992) *Conference on Environment Development Rio de Janeiro, Brazil. (1992, June 3)*. Retrieved from United Nations, sustainable development website. Retrieved from: <https://sustainabledevelopment/documents/Agenda21.pdf>
- Ussenova, A., Malakhova, I., Shmidt, M., Tuliepova, S., Tynyskhanova, A. (2020) Conceptual framework of the model of forming interethnic tolerance in multicultural environment of the university. *International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education*, **8**(2), 15-26. <https://doi.org/10.5937/IJRSEE2002015U>
- Villela, S. C. (2014) *COIL – Collaborative Online International Learning: Internationalization through the Innovative Use of Technology*. SUNY Global, Reunião de verão da Comissão de Iniciativas Internacionais da Associação de Universidades Públicas e Escolas Superiores Agrícolas, Berkeley, julho 13-17, 2014.
- Vygotsky, L. S. (1978) *Mind and society: The development of higher psychological processes*. Cambridge, MA: Harvard University Press. Retrieved from: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=RxjiUefze_oC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Vygotsky,+L.+S.+\(1978\).+Mind+and+society:+The+development+of+higher+psychological+processes&ots=okwWS1r-br&sig=Q5VxBoUxpkpBuEqGHC-T9HUc1PU#v=onepage&q=Vygotsky%2C%20L.%20S.%20\(1978\).%20Mind%20and%20society%3A%20The%20development%20of%20higher%20psychological%20processes&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=RxjiUefze_oC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Vygotsky,+L.+S.+(1978).+Mind+and+society:+The+development+of+higher+psychological+processes&ots=okwWS1r-br&sig=Q5VxBoUxpkpBuEqGHC-T9HUc1PU#v=onepage&q=Vygotsky%2C%20L.%20S.%20(1978).%20Mind%20and%20society%3A%20The%20development%20of%20higher%20psychological%20processes&f=false)
- Wachter, B. (2003) An introduction: Internationalization at Home in context. *Journal of Studies in International Education*, **7**(1),41-51. <https://doi.org/10.1177/1028315302250176>

REVISTA AIDIS

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

ENERGY, ENVIRONMENTAL AND FINANCIAL EVALUATION OF PROGRESSIVE CAVITY PUMPS WITH ROTORS PRODUCED FROM DIFFERENT MATERIALS

* Marcelo Angelo Taparello de Souza ¹
Walter Andrey Fontana ¹
Carlos Alberto Mendes Moraes ¹

Recibido el 15 de noviembre de 2023. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

In industrial applications, pumps traditionally operate for thousands of hours at high pressures, often under severe conditions imposed by abrasive fluids or undergoing chemical attack. However, in tinting dispensers, a progressive cavity pump (PCP) rarely reaches one hundred hours of use, and alternative materials could be explored for its components. An energetic, environmental, and financial assessment was conducted on four distinct materials intended for the rotor of a PCP: chrome-coated steel, PA6, PEEK, and 6082 aluminum alloy. Equipment was built to obtain the characteristic curves of each pump, electrical energy consumption, wear of rotors and stators, and energy efficiency. The rotor machining process was instrumented to measure electrical energy and inputs. The Cleaner Production method was applied, and, finally, the rotors underwent financial evaluation. There was no significant wear on the stator-rotor pairs, the minimum lifetime was not a challenge for the integrity of any of the components, and the polymers studied were not incompatible with the working fluid. Maximum and minimum energy efficiency of the pumps occurred with aluminum alloy and PA6 rotors, respectively, showing a difference of 22.5% in electrical energy consumption. However, the PA6 rotor presented the best energy and environmental efficiency in the manufacturing process, in addition to being the only one capable of dry machining. Financially, all proposed materials registered a significant improvement, particularly highlighting the aluminum alloy and PA6 rotors, which exceeded a 90% cost reduction.

Keywords: progressive cavity pump, energy efficiency, cleaner production, tinting.

¹ Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

* Autor correspondente: Escola Politécnica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Av. Unisinos, 950, Cristo Rei, São Leopoldo/RS, 93022-750, Brasil. Email: marcelotaparello@hotmail.com

Introduction

The tinting system emerged in the United States and Europe in the 1970s and arrived in Brazil in 1992, when the production of paints was no longer exclusive to the industry and began to be shared with specialized retailers. The encouragement of conscious consumption, through the National Solid Waste Policy, in Brazil, was one of the main reasons that subsequently pressured the sector towards this model in which the retailer became a manufacturing unit of colored paints.

The process currently consists of the consumer choosing a color from a specific product line (matte, gloss, semi-gloss, etc.) and a can size, according to their needs, from a catalogue. The retailer consults the information in the formula database to dose the colorants in the can containing the neutral paint. After dosing, the can is shaken for the necessary time until the product is homogenized, traditionally, in a gyroscopic mixer. Typically, dispenser machines operate with 3 to 4 neutral paints and 12 to 16 colorants, depending on the paint manufacturer, which when mixed generate the most varied combinations of final colors, reaching a total of ten thousand. (Análise, 1998; Linhares, 2018; Monfardini, 2013; Zaparolli, 2009).

The tinting system requires the dispenser to reproduce precise and accurate dosages. Therefore, positive displacement pumps are recommended for this application, such as piston, bellows, gear, progressive cavity pumps, among others, also called volumetric pumps, which keep the fluid confined and dose fixed quantities per cycle. These pumps, for dosing colorants, are exposed to a situation of low use of mechanical force, small pressure differential, very low abrasion, and chemical attack of the fluid. Therefore, there is less attack on the integrity of the components, compared to most applications, such as in the oil industry, which shares the applicability of progressive cavity pumps, where the damage to the components is very high. The *PCP* consists of a rotor in the form of a helical screw and a stator made of vulcanized elastomer, natural or synthetic, specified depending on the chemical composition and temperature of the fluid to be pumped (Henn, 2006). The performance and efficiency, in the oil industry, working with extremely abrasive high viscosity oils has consolidated materials, coatings and manufacturing processes of the fundamental components: rotor and stator. Given the significant development of the tinting system in Brazil, improvements in energy efficiency have the potential for large-scale expansion.

The study aims to evaluate different materials applied to the rotor of a progressive cavity pump, used in this industry or system, to improve energy consumption in the production process, environmental and financial benefits, increase pumping efficiency and quality and reduce maintenance costs.

Automatic paint tinting dispensers

Automatic tinting dispensers are equipment that have a computer to access the paint manufacturer's formula database and perform the dosing of colorants using positive displacement pumps, which dose the same quantity per cycle or revolution. Currently, pumps such as piston, bellows, gear, and progressive cavities are used, equipped with controlled drive, which is, using stepper motors, servos, or encoders, which monitor their positioning and control the dosed volume.

Figure 1 illustrates the main components of the tinting system in a dispenser: colorants stored in the reservoirs and the can containing neutral paint positioned for dosing (Geltint, 2018).



Figure 1. Main components of the automatic paint tinting dispensing system (Geltint, 2018).

Tinting machines make a significant contribution to the environment. There is no unnecessary consumption of raw materials, energy and inputs for paint production and storage. This equipment allows the entire distribution chain to work with less stock, as it allows the preparation of paints within the store. In the logistical context, there is less needed to transport ready-made paints to points of sale, reducing fuel consumption and emissions (Ferreira, 2015).

Tinting colorants are concentrated products used in small quantities to produce the final color, compared to the volume of neutral paint contained in the can. Some formulations use less than 1% of colorant of the total paint volume. Therefore, a pump will not reach a total dosage of 1000 liters of colorant throughout its existence in a conventional point of sale.

Progressive cavity pump (PCP)

The PCP is basically formed by a rotor with a profile of n helical cylindrical teeth and pitch p , which rotates in relation to the stator, fixed to the pump housing, with an internal cavity with a profile of $n + 1$ cylindrical teeth and pitch $2p$. Simultaneously with the rotation, the rotor prescribes an eccentric cyclic movement, following a trajectory that varies with the value of n (Aage *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2013; Gravesen, 2008).

In the classic configuration illustrated in Figure 2, when $n = 1$, the PCP has a helical cylindrical rotor, an elastomeric stator with an oblong helical internal cavity and the center of the rotor prescribes a hypocycloid trajectory (Nguyen *et al.*, 2016). The rotor rotates eccentrically within the stator, so the fluid is moved helically throughout the pump. Figure 3 illustrates this shift (Whittaker, 2003).

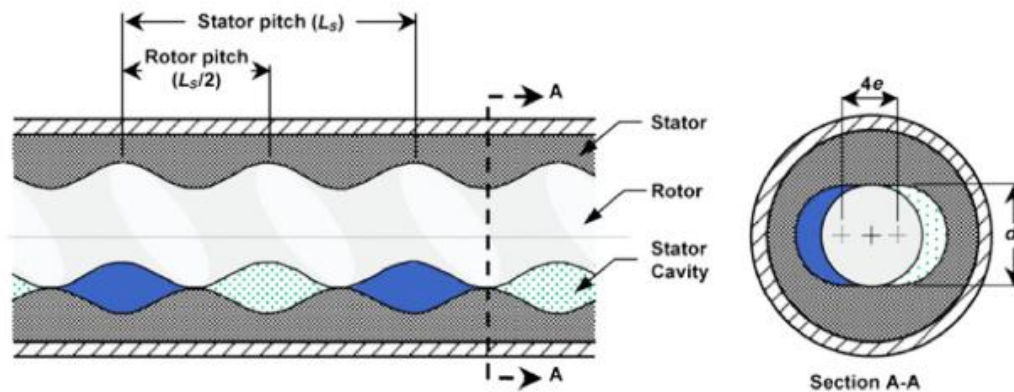


Figure 2. Longitudinal and transverse sections in a stator-rotor pair (Nguyen *et al.*, 2016).

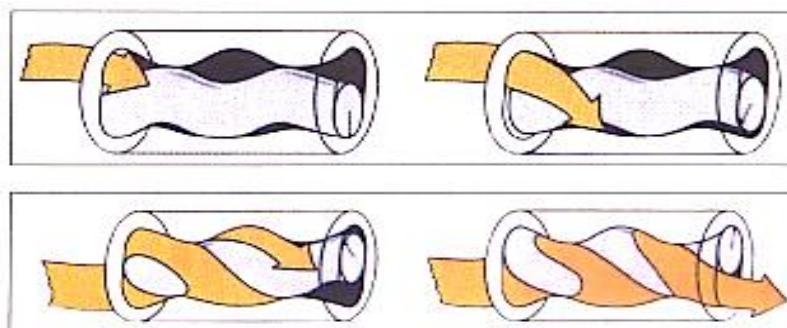


Figure 3. Fluid displacement in the cavities formed by the stator-rotor pair (Whittaker, 2003).

Four main parameters characterize a *PCP*. Three parameters refer to the cross-sectional area of the pump, which is determined by the rotor diameter, eccentricity and interference or clearance. The fourth parameter is the stator pitch. When the section area covers the stator pitch, the volume displaced in one revolution is obtained. (Pessoa, 2009). The stators can be rigid or flexible and define completely different characteristics for the *PCP*, such as tightness, which is not covered by rigid stators and is not acceptable in tinting dispensers. For most applications, the following elastomers stand out: nitrile rubber (NBR) with medium and high concentrations of acrylonitrile (ACN), hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber (HNBR) and fluorinated rubber (FKM), commercially known as Viton.

Rotors are traditionally manufactured from electroplated hard chromium-coated steel or tungsten carbide, or solid stainless steel and silicon carbide. To enable the manufacture of helical geometry, it is necessary to add to traditional machining a process with a rotating tool, called whirling, synchronized with the movement of the other axes of the lathe, limiting this operation only to computerized machining equipment.

The nominal flow of the *PCP* is obtained by multiplying the theoretical volume displaced by the angular speed of the motor shaft. By subtracting the slip, the real flow is obtained. By making the quotient of the real flow with the nominal flow, the volumetric efficiency of the *PCP* is obtained (Chaparro Fonseca, 2008). The two potential slip mechanisms in the pump are depicted in Figure 4: longitudinal and transverse (Paladino *et al.*, 2008). The total efficiency of a pump is evaluated through the theoretical power, which quantifies the variation in the fluid work, divided by the real power consumed, measured by the product of the torque and angular speed of the motor shaft or the voltage and electric current supplied to the motor. This efficiency represents the overall performance of the set formed by all pump components (Pessoa, 2009).



Figure 4. Representation of the slip mechanisms of a *PCP* (adapted from Paladino *et al.*, 2008).

Whirlwind milling process

Most machining operations use lubricant, also known as cutting fluid, which makes the metalworking industry a potential environmental aggressor. They generate harmful effects on the work environment and significant environmental impacts (Oliveira and Alves, 2007).

The Bergsmuller Company created the whirlwind milling process in Germany. It consists of a rotating tool holder with cutting inserts that encloses and removes material from the workpiece, held in the head, which moves, at a certain rate, along the longitudinal axis to produce a helical shape (Mohan and Shunmugam, 2007; Song and Zuo, 2013). In Figure 5, a whirlwind and its kinematic parameters are schematically illustrated (Serizawa and Matsumura, 2016). A variable that represents the energy efficiency of the process and is subject to the influence of machining conditions, the material of the part, and the cutting tool is the specific cutting energy, which is also understood as the ratio between specific cutting power and the material removal rate, equivalent to energy per unit volume (Rigatti, 2010; Souza, 2011).

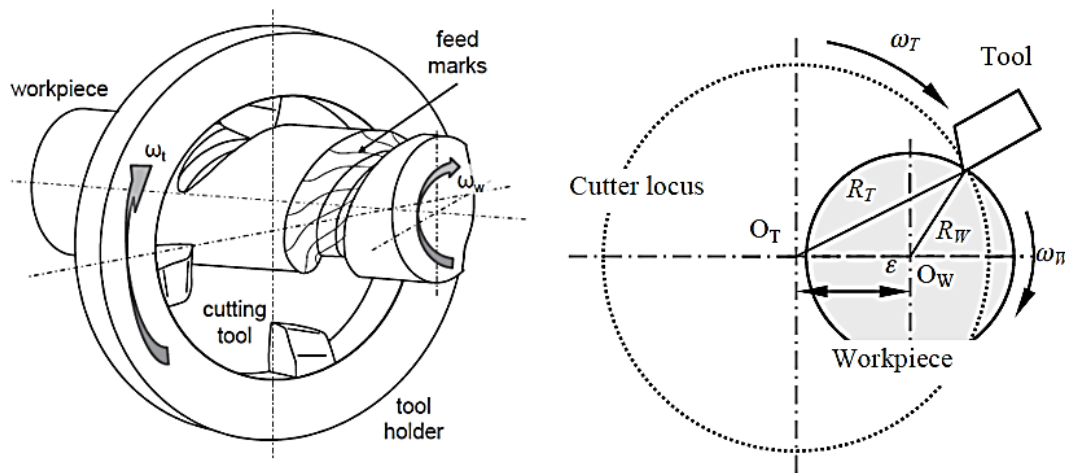


Figure 5. Illustration of the whirlwind milling process (adapted from Zanger *et al.*, 2017 and Serizawa and Matsumura, 2016).

Cleaner production method

Methodologies such as Cleaner Production (CP) emerged from the evolution of the way of thinking in the context of environmental impacts. Preventing pollution consequently leads to continuous improvement in processes instead of managing the waste generated. CP presents a detailed analysis of the production process through the quantification of inputs, energy used and environmental impact, while conventional methods, called end-of-pipe, focus only on the treatment of final waste. The CP technique consists of avoiding or minimizing all waste (Medeiros *et al.*, 2017).

The application structure of the CP methodology is divided into three levels, illustrated in Figure 6. The first two focus on minimizing waste and emissions and the third on their reuse or external recycling. Level 1 deals with waste reduction, and improvements consist of changes to the product or production process. Level 2 refers to internal recycling, reintegrating waste from the production process into components made from the same raw material with the same or lesser purpose than the original. If it is impossible to reintegrate the waste, a means of external recycling is sought; seek destinations and resources outside the company for their treatment, covered in level 3.

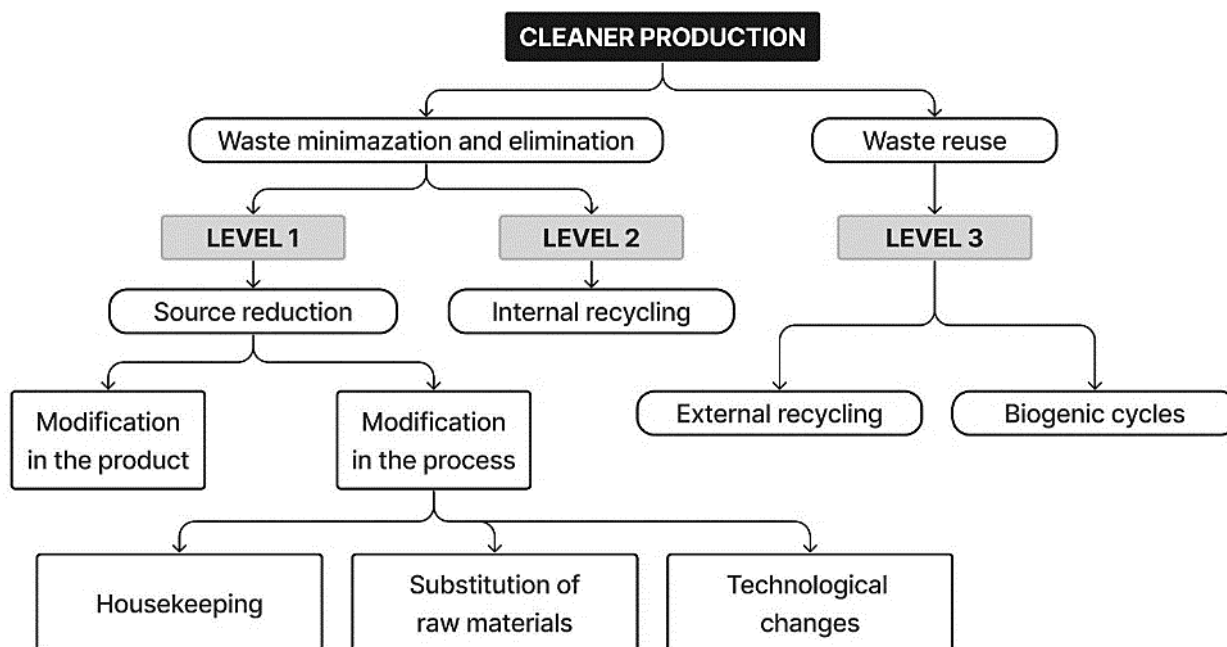


Figure 6. Levels of the CP methodology (adapted from Oliveira and Alves, 2007).

Methodology

Methodologies such as CP emerged from the evolution of a way of thinking in the context of environmental impacts. Preventing pollution consequently leads to continuous improvement in processes, instead of managing waste generated.

Materials

The rotors used in the study were manufactured, through the whirlwind milling process, in the dimensions of the pump's original design, from four different materials: SAE 12L14 chrome-plated

desulfurized steel, currently used in in Percolore brand machines, Polyamide 6 (PA6), PEEK and 6082-T6 Aluminum Alloy. Figure 7 shows the manufacturing drawing of these parts. FKM (fluorinated elastomer) stators were used, as shown in Figure 8. They were produced through vulcanization under pressure in a closed mold.

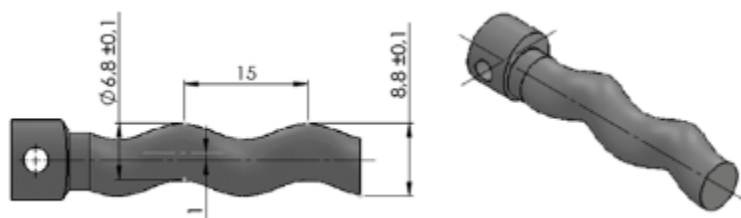


Figure 7. Original Percolore brand PCP rotor design (created by author).

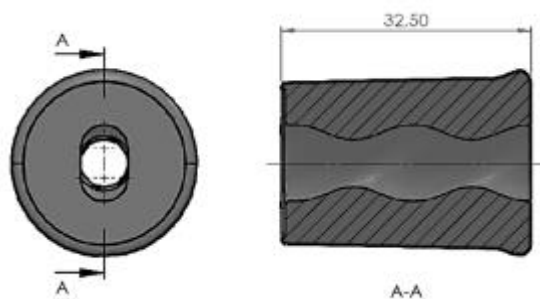


Figure 8. Original Percolore brand PCP stator drawing (created by author).

A precision scale, model S423 by BEL, was utilized to measure the mass of the rotors and stators. The scale had a resolution of 0.001 g and an accuracy of $\pm 0.004\text{ g}$. This measurement is employed to assess wear and facilitate comparison with the final mass. The dimensions of the rotors were determined using a digital caliper with an accuracy of $\pm 0.02\text{ mm}$ and a resolution of 0.01 mm . This enabled the determination of the rotors' cross-sectional diameters, dR , as well as the external diameter of the helicoid, which represents the largest diameter of the rotor. In order to determine the nominal volumetric flow of each pump, these values are utilized.

After manufacturing each stator-rotor pair and the other components that are part of the PCP, shaft, gasket, retainer, etc., the twenty-four pumps that were evaluated in this work were assembled. This pump, used in tinting dispensers from the Percolore brand, a research partner, has a rotor and stator configuration for one stage, is equipped with a stepper motor and operates with an angular speed of 400 *rpm* and an average flow rate of 280 *ml/min*, both nominal quantities. Figure 9 shows the pumps.



Figure 9. Percolore brand PCP (created by author).

Assessment of polymers and tinting material

The density and viscosity values of the tinting colorant E - 96-5 Blue were verified as they are necessary parameters for calculating the volumetric efficiency. Its density was assessed according to the ABNT NBR 5829 standard (2014), with a 100 *ml* pycnometer and viscosity by consulting the technical sheet of the respective fluid. The evaluation of the interaction of the tinting colorant with the polymers was guided by the ASTM D471 standard. Basically, the polymeric rotors had their masses evaluated and then immersed in a container with the fluid, individually. After the time determined by the standard, which for this application was 70 hours, the parts were removed and underwent mass evaluation again. A specimen of each material was used.

Data collection from the rotor machining process

The electrical consumption for machining each type of rotor was evaluated, that is, each of the four materials under study: SAE 12L14 steel, 6082 aluminum alloy, PA6 and PEEK. For the evaluation, digital multimeters were used to measure the electrical current and voltage of each tool on the CNC lathe to calculate the power later. The usage times for each tool were obtained from the cutting program (CAM) that controls the process. From the power and time of each operation on the lathe, the energy consumed in each operation was calculated for each rotor material. Finally, the total energy consumed to manufacture the rotor is the sum of the energy

consumed in each operation or tool. The need to use cutting fluid was evaluated for machining each of the four materials, based on the quality of the surface finish obtained. The use of cutting fluid increases electrical consumption, described in the previous item, because it activates a pump for its recirculation.

Energy efficiency evaluation

An assessment of energy efficiency was carried out throughout the rotor production chain and the work performance of *PCPs*. The analysis of the machining efficiency of the rotors was based on three parameters: material removal rate, specific whirl cutting energy and total specific cutting energy. The efficiency of the *PCP* was evaluated by three parameters, throughout the useful life: volumetric, mechanical, and total.

Environmental assessment, identification of opportunities for the CP methodology

The rotor manufactured from different materials was evaluated using the CP Methodology. Focusing on rotor manufacturing, opportunities for improvement in the process were compared, according to the CP structure, for the four different materials. Through a flowchart of the rotor manufacturing process, the inputs and outputs of energy and materials were documented, and waste and the cause of its generation were identified to suggest improvements.

Financial assessment

The cost of the raw material was obtained from the quotations and purchase of round bars with a diameter of 3/8" (9.525 mm) to produce the rotors and the cost per meter of each material was compared. The cost of the rotor manufacturing process was evaluated through the energy consumed in machining each rotor multiplied by the value of the local supplier's electrical energy. The cost of machining inputs used data from the machining process of the SAE 12L14 steel rotor as a reference. In the specific case of the SAE 12L14 steel rotor, the cost of the chrome coating currently used on the component was increased. The other materials do not use this coating and did not have this value added.

Results and discussion

The results are presented separately to facilitate interpretation. At the end, a table presents the relevance of each result, in a qualitative way, for comparing the materials studied.

Production, metrology of rotors and stators, and assembly of pumps

All rotors and stators presented measurements in accordance with the dimensional tolerance determined by the pump design. In Figure 10, all test specimens are shown.



Figure 10. Rotors and their respective FKM stators. a) Chrome-plated SAE 12L14 steel rotors; b) PA6 rotors; c) PEEK rotors; d) 6082-T6 aluminum alloy rotors (created by author).

The steel rotors presented the highest standard deviation, due to the greater cutting force which, consequently, generates greater vibration and instability in the process. PA6 rotors showed improved dimensional stability compared to steel because they require less cutting force. Using PEEK as materials, the rotors recorded worse dimensional stability results, compared to PA6. Aluminum, on the other hand, recorded the highest dimensional stability and accuracy among the four materials. The averages were 6.78 mm for the rotor cross section with 0.01 mm standard deviation and 8.81 mm for the largest rotor diameter, repeating 0.01 mm standard deviation. The stators underwent mass assessment to subsequently support wear measurements after use. The average was 19.431 g and the standard deviation was 0.201 g and it was found that more than 80% of the stators have 19.270 g and 19.510 g . Figure 11 shows the 24 pumps assembled with the test specimens presented in Figure 10. The assembly of each one followed the same procedure, and all other components are the same, that is, their only differences are exclusively the stator and rotor pair.



Figure 11. Image of the Percolore brand pumps assembled with its respective label indicated the test specimen (created by author).

Physical properties of tinting colorant and polymer resistance

Three measurements were taken in a 100 ml pycnometer, according to the ABNT NBR 5829 (2014) standard, to determine the specific mass of the colorant. After calculating the average, the value of 1.4365 g/ml was obtained, which represents a 3.75% difference in relation to the value reported in the technical sheet, which also informs that the viscosity is approximately 3 Pa.s or 3000 cP. The polymers studied for the rotors, PA6 and PEEK, and the stator, FKM, underwent evaluation of resistance to the absorption of tinting colorant, in accordance with the ASTM D471 standard. The values were negligible, less than 0.1%, showing that the three materials have excellent resistance to the colorant in this study.

Electrical consumption of PCPs

The total power is directly proportional to the torque used by the pump to perform work on the fluid. Therefore, it illustrates the behavior of the stator-rotor contact interface and, consequently, is influenced by its materials. To facilitate interpretation, averages of behavior were taken over the total number of revolutions of each type of pump and displayed on the graph in Figure 12.

It was observed that the greatest power requirement comes from pumps with PEEK rotors, which reduces in the following order: SAE 12L14 chromed-plated rotors, 6082-T6 aluminum and PA6, which recorded the lowest demand. To compare the energy consumed by each type of pump, the dosage volumes and their respective powers were evaluated at each evaluation point (100 thousand revolutions, 200 thousand revolutions, etc.) and at the end of 1 million revolutions they

were extrapolated the flow and power results until reaching 1000 liters to obtain the total estimated working time to reach this volume. Therefore, these results consider the variation in pump power and flow throughout its use. Figure 13 presents the results. Therefore, in terms of electrical consumption, the aluminum rotor obtained the best result, registering 755 Wh to dose 1000 liters of colorant, while the PA6 rotor obtained the worst performance, registering 925 Wh for the same volume. This occurs because this polymer has lower volumetric efficiency than the aluminum rotor. In this way, it produces a lower flow rate for the same power, that is, it requires more time of use to reach the same final volume and, consequently, greater electrical energy consumption.

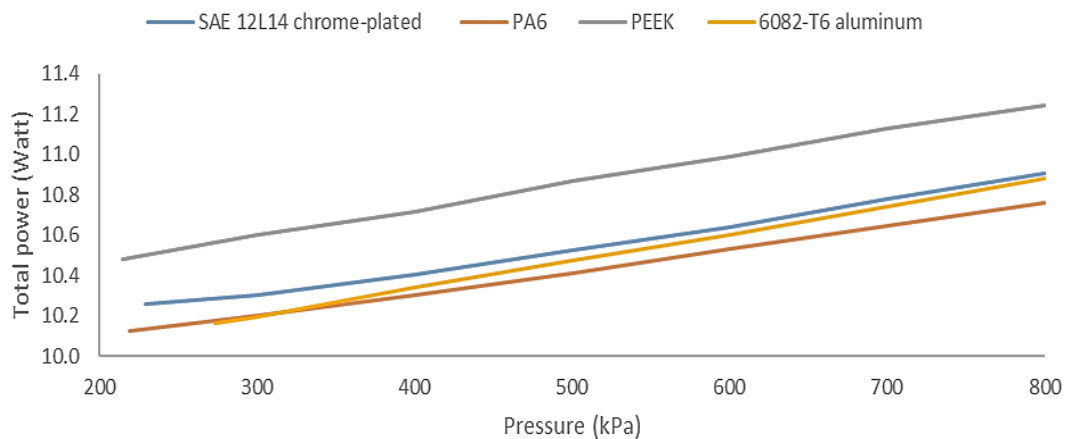


Figure 12. Average total power of PCPs assembled with each rotor material.

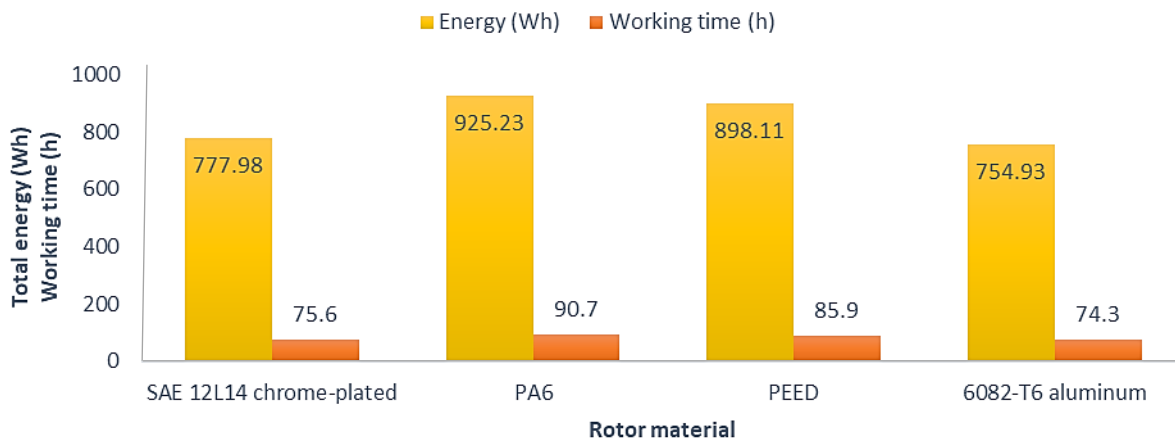


Figure 13. Energy and time consumed to dose 1000 liters of colorant.

Electrical consumption of rotor machining

The steel rotors require greater power to move the axes and machining tools, due to the greater cutting force compared to aluminum and, mainly, to the two polymers. Furthermore, the machining of the PA6 rotors did not require cutting fluid on the lathe used, which eliminated this portion of energy from total consumption, in addition to reducing the generation of liquid effluent.

Figure 14 presents a detailed comparison of the total energy consumption for each material. It is evident from the results that the whirlwind is the instrument that is most susceptible to the type of material being machined. This behavior was anticipated, given that the primary machining operation performed on the rotor was grinding the gross diameter between 9.525 mm and 6.8 mm. PA6 rotors had the lowest overall consumption, followed by PEEK, 6082-T aluminum, and SAE 12L14 rotors.

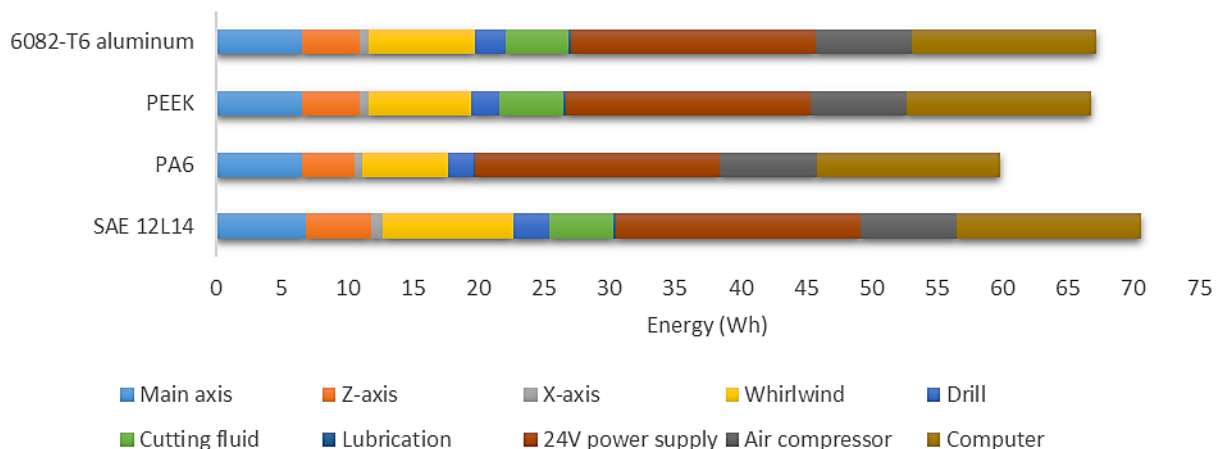


Figure 14. Comparison of energy consumption when machining different materials.

Rotor machining efficiency

Specific machining energy uses values of the material removal rate, measured in volume and time, and electrical consumption of the process, to generate the result in terms of electrical energy consumed in relation to the volume of material machined, as an indicator of efficiency. The results are shown in Figure 15. The SAE 12L14 rotors had the highest specific machining energy, that is, they have the highest electrical energy consumption per volume of material machined. This behavior was expected since this material requires the highest cutting force among the four studied.

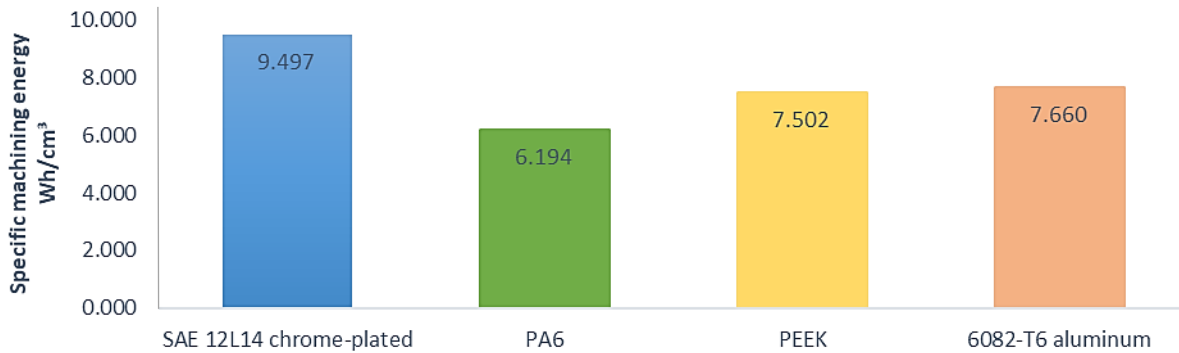


Figure 15. Specific machining energy of different materials.

Energy efficiency of PCPs

The comparison between the average volumetric efficiencies is shown in Figure 16. The lower performance of polymeric rotors and the similarity between steel and aluminum are clearly seen, with a slight superiority of aluminum. The volumetric efficiency range in which the *PCP* with a PA6 rotor operates is the smallest, followed by the PEEK *PCP*, with the aluminum and chromed steel *PCPs* exhibiting the highest results, between 74.5 and 80.5%. A significant outcome, particularly within the tinting sector, was the minimal fluctuation in volumetric efficiency observed at the conclusion of one million cycles of the *PCP*. The colors produced are stable since their variations are less than 2% of the dosed volume, which is an indication of their excellent performance.

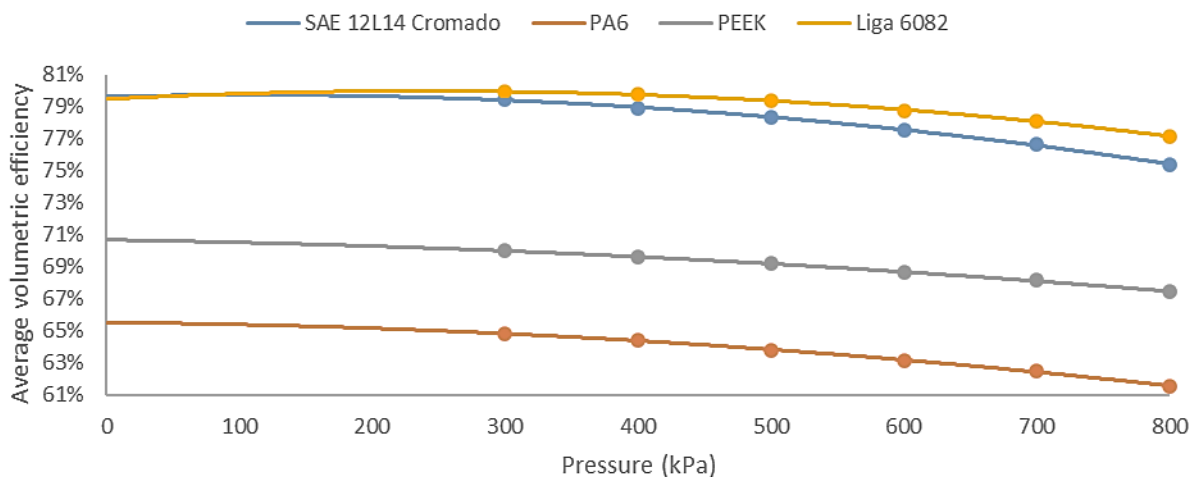


Figure 16. Comparison between average volumetric efficiency of *PCPs*.

The global efficiency results of the *PCPs* are shown in Figure 17. Like the volumetric efficiency, the total efficiency showed a large discrepancy between the polymeric rotors in relation to chrome-plated steel and aluminum.

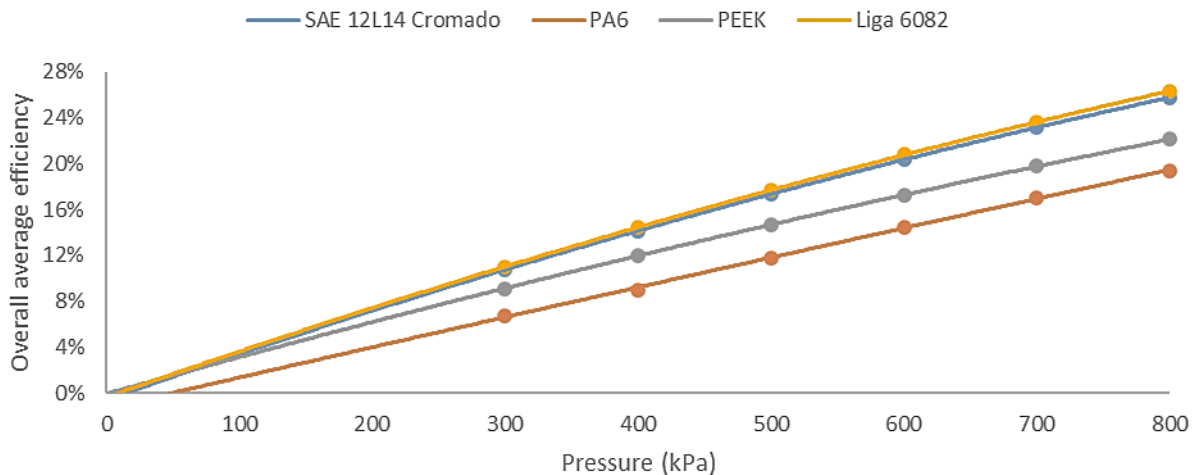


Figure 17. Comparison between average global efficiency of *PCPs*.

At low pressures, progressive cavity pumps with elastomeric stators operate at a suboptimal overall efficiency, which is primarily attributable to interference in the rotor and stator assembly. To induce elastic deformation and friction at the interface of these components, a substantial amount of electrical drive power is required. Consequently, the effort required to pressurize the fluid at low pressures is negligible in comparison to the mechanical effort required to rotate the pump.

As the pressure within the *PCP* increases, it effectively reduces the electrical power required for its mechanical operations. This results in improved overall efficiency and more efficient utilization of the power supply. The results indicate how energy is dissipated mainly due to the inadequate design of the *PCP*, that is, the interference between the stator and the rotor, in the friction generated at the interface, in the mechanical transmission, among other items.

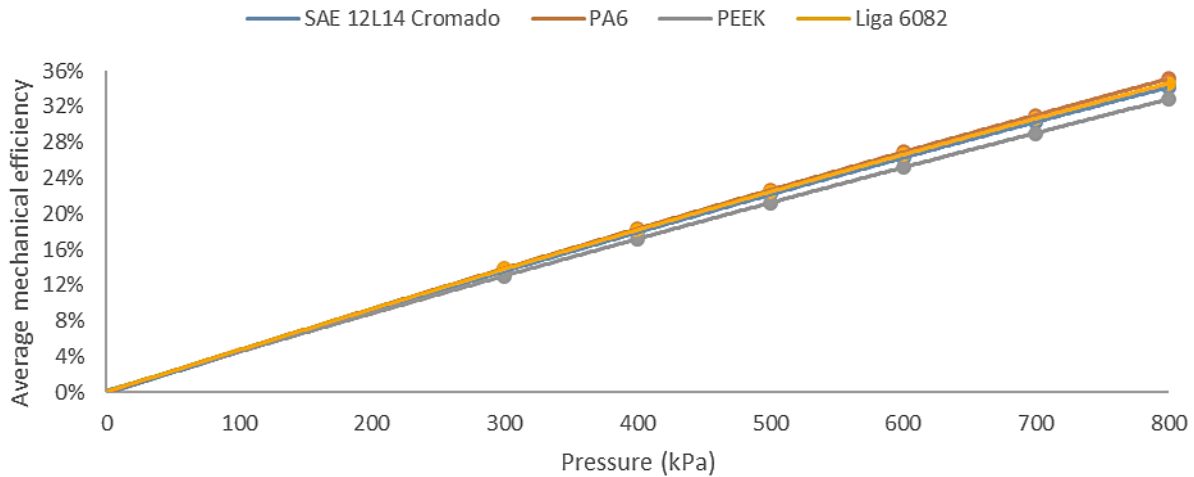


Figure 18. Comparison between average mechanical efficiency of PCPs.

Cleaner production methodology

The flowchart of the rotor manufacturing process is shown in Figure 19, which shows the inputs, operations, and outputs as a basis for evaluating improvement opportunities: source reduction, internal recycling, and external recycling. The results of the improvement potentials are shown in Table 1. It presents the applicability of each material for the CP group, their respective benefits, barriers, and opportunities.

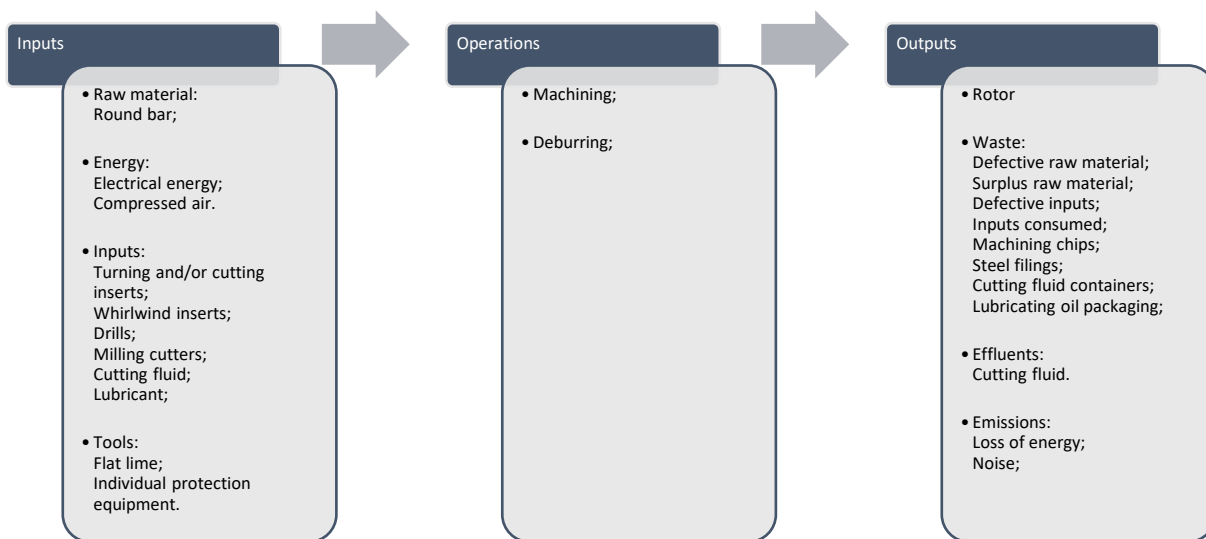


Figure 19. Flowchart of the rotor manufacturing process.

Source reduction

One way to improve the rotor is to optimize the maximum diameter or reduce the eccentricity of the helicoid, which would consequently result in less material being removed. Those would reduce the pump cavities and nominal flow, requiring a detailed assessment of the feasibility of the change. This change would result in less solid waste generation. For the machining process, the most relevant environmental impact comes from the use of cutting fluids. Therefore, when modifying the process, possibilities for improvement focused on these fluids were raised based on the three alternatives suggested by the methodology: housekeeping, replacement of raw materials, and modification of technology.

Preventive measures can be taken to select the fluid, for example, requiring suppliers to guarantee their origin, assistance, and support for their management. When using fluids, there are opportunities such as adjusting flow parameters and direction of the jet on the part, training employees to avoid contamination, and developing hygiene habits. These fluids can be recovered and treated; there are ways to improve the recovery processes, including evaluating their efficiency, controlling concentration and pH according to the manufacturer's recommendations, and observing the quantity and quality of the water used for dilution, among others. It could also be evaluated using the Minimum Quantity Lubrication (MQL) technique, which uses compressed air to spray only the necessary amount of fluid to reduce friction between the part and the cutting tool.

Another technique to be analyzed is dry machining. This method has advantages such as eliminating the cost of cutting fluid, while it presents challenges such as the need for greater rigidity in the lathe and its tools. The material must resist imposed thermal gradients and the use of special machining tools. In the case studied, it was possible to use this technique without modifications to the equipment, only on the rotors.

Internal recycling

For machining, the best option would be to recover and recycle the cutting fluid used to remove oil, dirt, and bacteria and adjust its concentration, providing conditions for it to return to the process (Oliveira and Alves, 2007). The high cost of an implementation like this makes it justifiable to apply only to companies specializing exclusively in machining. Figure 20 illustrates a cutting-edge fluid recovery system.

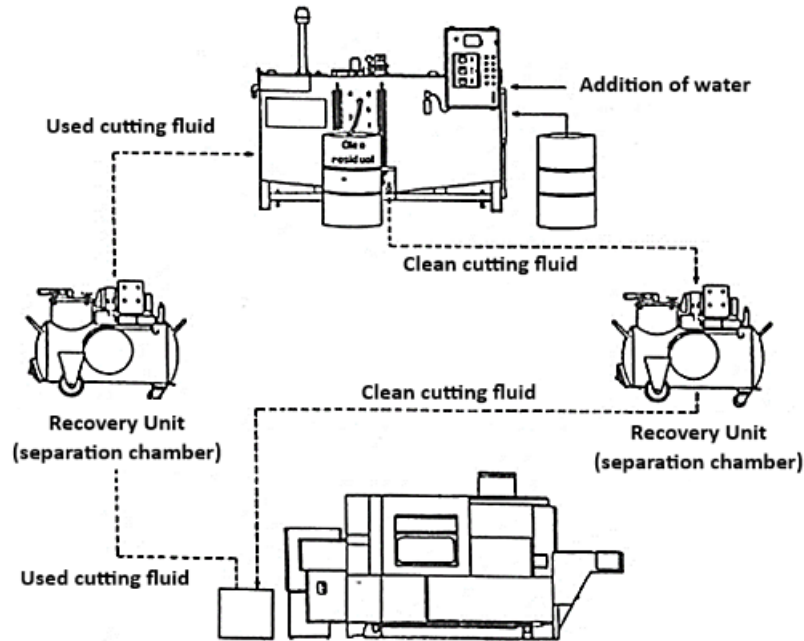


Figure 20. Cutting-edge fluid recovery system (adapted from Oliveira and Alves, 2007).

External recycling

The chips and filings, after filtering the cutting fluid, can be sold externally, for example, in the case of metallic materials, directly with steel companies that reuse steel in electric arc furnaces or indirectly through scrap dealers. The same can be done with leftover raw materials, inserts, and machining tools.

Table 1. Opportunities for improvement using the CP methodology (continues)

CP group	Description	Applicability				Benefits	Barriers	Viability
		SAE 12L14	PA6	PEEK	6082-T6			
Product modification	Reduction of difference between rotor diameters	X	X	X	X	Reduction of chips, solid waste	Modification in design, limitation of rotor application in some cases	Unfeasible, high functional impact of the pump
	Reduction of helicoid eccentricity	X	X	X	X	Reduction of chips, solid waste	Change in design, reduction in nominal pump flow	Unfeasible, high functional impact of the pump
Housekeeping	Preventive selection of cutting fluid	X		X	X	Supplier handling assistance and support	Cost, difficulty in finding a guaranteed supplier	Viable, low investment

Table 1. Opportunities for improvement using the CP methodology (*continuation*)

CP group	Description	Applicability				Benefits	Barriers	Viability
		SAE 12L14	PA6	PEEK	6082-T6			
Housekeeping	Preventive selection of cutting fluid	X		X	X	Supplier handling assistance and support	Cost, difficulty in finding a guaranteed supplier	Viable, low investment
	Adjustment of flow parameters and cutting fluid direction	X		X	X	Cutting fluid reduction, effluent reduction	Employee training	Viable, low investment
	Hygiene habits with cutting fluid	X		X	X	Employee health	Employee training	Viable, low investment
	Avoid contamination of cutting fluid	X		X	X	Effluent reduction	Employee training	Viable, low investment
	Recovery and treatment of cutting fluids	X		X	X	Effluent reduction	Cost, equipment implementation, employee training	Unfeasible, high investment, high cultural impact
Substitution of raw material	Replacement of cutting fluids with those of vegetable composition	X		X	X	Biodegradable, employee health, effluent reduction	Cost, limited applications	Viable, high investment
Technology modification	Application of the MQL method to cutting fluids	X		X	X	Cutting fluid reduction, effluent reduction	Cost, equipment deployment, mist emission	Viable, low investment, low cultural change
	Dry machining		X			Effluent disposal, in accordance with environmental legislation	Rigidity of the equipment, need to change the rotor material	Unfeasible (except PA6), high investment
Internal recycling	Cutting fluid recovery	X		X	X	Effluent reduction	Cost, equipment implementation	Unfeasible, high investment, high cultural impact
External recycling	Sale of chips, raw material scraps, machining inserts	X				Waste reduction, conscious disposal, financial return	Training suppliers for collection, search for partners	Viable, low cultural impact
	Sale of used cutting fluid	X		X	X	Effluent reduction, conscious disposal, financial return	Training suppliers for collection, search for partners	Viable, low cultural impact

Costs

The four materials use round bars as raw materials for subsequent machining. The cost of this material was obtained at the time of purchase for manufacturing the respective test specimens used in this work. SAE 12L14 records the lowest value per kilogram. However, their rotors are not the cheapest, as they have the largest masses due to their greater density. Polymers occupy the

two extremes of final value between materials, with PA being the lowest value and PEEK being the highest. This, in a proportion more than 100 times greater, as it is a high-performance polymer, although it was not efficiently applied to the PCP rotor. And 6082-T6 aluminum positioned itself as third on the rising cost scale.

The costs of the machining process include electrical energy and inputs such as tools, machining inserts and cutting fluid. The cost of tools and inserts, and their respective productivity for machining each material, were obtained according to data from the company's machining process. From this data, the cost of these inputs for each rotor is found, which together with the consumption of electrical energy and cutting fluid makes up the total machining cost. The cost of cutting fluid per rotor was obtained through the value of a 20-liter package of the product, divided by 15,000 rotors, which represents the maximum production capacity allowed for this volume of product. This value was applied equally to the three materials that used the fluid: SAE 12L14, PEEK, and 6082-T6 aluminum.

Figure 21 illustrates the share of each class in the total cost. The SAE 12L14 chrome-plated rotor reached the highest cost, mainly influenced by its coating. Following in descending order, the PEEK rotor, predominantly due to the raw material, the 6082-T6 aluminum rotor experiences drastic cost reduction, with reasonable raw material and machining values, resulting in 93.5% savings. Finally, the PA6 rotor is the cheapest, with a value 97.7% lower than the original rotor, due to the low cost of the raw material and the machining process.

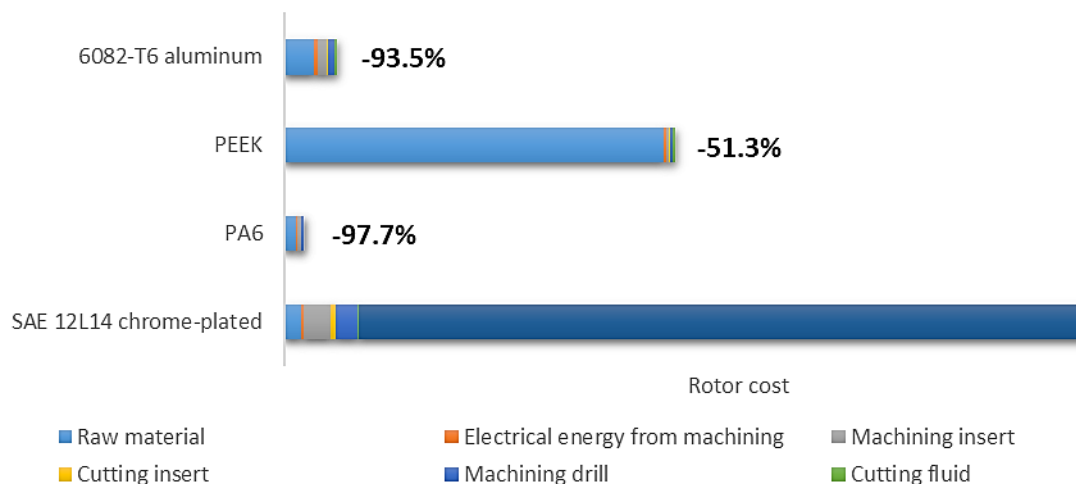


Figure 21. Rotor cost.

Qualitative comparison of results for different materials applied to the rotor

A qualitative summary of the results found is presented in Table 2 to illustrate a general overview of the work carried out and facilitate the comparison of performance and selection of the materials studied.

Table 2. Qualitative comparison of different materials applied to the PCP rotor. Each arrow indicates 25% of weighting

Description	SAE 12L14 chrome- plated	PA6	PEEK	6082-T6 aluminum
Dimensional stability in the currently used machining process	↑	↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑
Resistance to tinting colorant	↑↑↑↑	↑↑	↑↑↑	↑↑↑↑
Rotor wear (better performance)	↑↑↑↑	↑	↑↑	↑↑↑
Stator wear (better performance)	↑	↑↑↑↑	↑↑↑	↑↑
PCP characteristic curve (flow x pressure)	↑↑↑	↑	↑↑	↑↑↑↑
PCP electrical consumption (better performance)	↑↑↑	↑	↑↑	↑↑↑↑
Electrical consumption of the machining process (better performance)	↑	↑↑↑↑	↑↑↑	↑↑
Specific cutting and machining energy (better performance)	↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑
PCP volumetric and global efficiency	↑↑↑	↑	↑↑	↑↑↑↑
Environmental impact (better performance)	↑↑↑	↑↑↑↑	↑↑	↑
Total cost (better performance)	↑	↑↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑
Approximate qualitative average (best solution)	↑↑	↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑

Conclusion

The four materials studied for the rotor, although with very different mechanical properties, were approved from the point of view of durability in the application scenario of the tinting industry without presenting a failure of functional unfeasibility of the equipment at the end of the testing period. Furthermore, no significant wear was identified on the stator-rotor pairs, showing that the minimum lifetime does not challenge the integrity of the components. The machining process presents greater power and energy consumption for SAE 12L14 due to the superior mechanical properties that reproduce greater cutting force. The same behavior occurs for the specific energy of whirling and machining, which registers a higher value for this material and a lower value for PA6. Therefore, the PA6 rotor has lower electrical energy consumption for manufacturing.

For the energy efficiency of *PCPs*, the 6082-T6 aluminum rotor is the best material, translating into electrical energy savings and better flow and pressure performance produced in the pump. While the PA6 rotor is considered less energy efficient for the pump, the use of the cleaner production methodology showed that the best environmental solution among the four materials studied is the PA6 rotor, because it is the only one capable of dry machining, eliminating problems with the cutting-edge fluid.

Rotor costs reach completely different levels. The PEEK rotor records a 51.3% reduction in final value, the 6082-T6 aluminum rotors 93.5%, and the PA6 an impressive 97.7% reduction. In general, it was concluded that the best performance and energy efficiency solution for the pump is the 6082-T6 aluminum rotor. However, for the energy efficiency of the manufacturing process, environmental impact, and cost, it is the PA6 rotor. As Wear was not a limitation to the use of any of the proposed materials, based on the small difference in cost between 6082-T6 aluminum and PA6. It is concluded that the best alternative for the currently used rotor (SAE 12L14 chrome-plated) is a 6082-T6 aluminum rotor. As it represents a flow in the pump equal to or greater than the SAE 12L14 chrome-plated rotor, not having any significant impact on the use of the equipment, the use of PA6 rotors would reduce the productivity of the equipment in approximately 18%.

This work makes an unprecedented contribution because, until now, there were no studies on rotor wear on this type of pump in the tinting industry. Therefore, exploring alternative materials for this application, which are not materials with extremely high hardness and mechanical resistance, for the rotor of a PCP, proved to be possible and viable based on the evaluations. Furthermore, there were no studies on the application of Cleaner Production methodology for PCP rotors.

Acknowledgments

The authors would like to thank CAPES for the Ph.D. student scholarship, and CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) for the Research on Technological Development DT2 grants.

References

- Auria, R., Frere, G., Morales, M., Acuña, M.E. and Revah, S. (2000) Influence of mixing and water addition on the removal rate of toluene vapors in a biofilter, *Biotechnology and Bioengineering*, **68**(4), 448-455.
- AAGE, N., Donaldson, J., Feng, Y., van Gennip, Y., Grann, H., Gravesen, J., Hlod, H., Jensen, T., Larsen, A., Malakpoor, K., Markvorsen, S., Moreno, D., in't panhuis, J., in't panhuis, P., Røgen, P. and Vondenhoff, E. (2006) *Mathematical problems for Moineau pumps*, Technical report, Grundfos.
- Análise Setorial da Indústria de Tintas (1998) Panorama Setorial da Gazeta Mercantil, *Gazeta Mercantil*, São Paulo, jun. 1998.
- Chaparro Fonseca, E. (2008) *Efecto del corte de agua y la viscosidad del fluido de producción en la eficiencia volumétrica de las bombas de cavidades progresivas*, Bachelor in Petroleum Engineering, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 165 pp.
- Chen, J., Liu, H., Wang, F., Shi, G., Cao, G., Wu, H. (2013) Numerical prediction on volumetric efficiency of progressive cavity pump with fluid–solid interaction model, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **109**, 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.019>
- Ferreira, D. (2015) *Máquinas tintométricas: benefícios para o setor e para a sustentabilidade*. Accessed on January 29, 2018. Available at: <http://www.abrafati.com.br/noticias-e-artigos/artigos/maquinas-tintometricas-beneficios-para-o-setor-e-para-a-sustentabilidade>
- GELTINT (2018) Institutional website. Accessed on April 2, 2018. Available at: <http://www.geltint.com>
- Gravesen, J. (2008) The geometry of the Moineau pump, *Computer Aided Geometric Design*, **25**(9), 792-800. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2008.06.012>
- Henn, E. (2019) *Máquinas de Fluido*, 4. ed. Editora UFSM, Santa Maria, 495 pp.
- Linhares, H. *16 melhores sistemas tintométricos do Brasil: Máquinas tintométricas mais vendidas no Brasil*. Accessed on January 29, 2018. Available at: <http://sohelices.com.br/16-melhores-sistemas-tintometricos-do-brasil>
- Medeiros, D. D., Calábria, F. A., Silva, G. C. S. and Silva Filho, J. C. G. (2007). Aplicação da Produção mais Limpa em uma empresa como ferramenta de melhoria contínua. *Production*, **17**(1), 109-128. Available at: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=396742029008>
- Mohan, L.V., Shunmugam, M.S. (2007) Simulation of whirling process and tool profiling for machining of worms, *Journal of Materials Processing Technology*, **185**(1–3), 191-197. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.115>
- Monfardini, L. (2013) Sistemas Tintométricos e Colorantes: Automatização consolidada. *Revista Paint & Pintura*, **179**, 70-71. Available at: <https://www.paintshow.com.br/edicao/paintpintura/179/files/assets/basic-html/page70.html>
- Nguyen, T.C., Tu, H., Al-Safran, E.M., Saasen, A. (2016). Simulation of single-phase liquid flow in Progressing Cavity Pump. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **147**, 617-623. <https://doi.org/10.1016/j.PETROL.2016.09.037>
- Oliveira, J. F. G. and Alves, S. M. (2007) Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental, *Production*, **17**(1), 129-138. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100009>
- Paladino, E. E., Lima, J. A., Almeida, R. F. C. and Assmann, B. W. (2008) Computational Modeling of the Three-Dimensional Flow in a Metallic Stator Progressing Cavity Pump, *SPE Progressing Cavity Pumps Conference*. <https://doi.org/10.2118/114110-MS>

- Pessoa, P. A. S. (2009) Simulação computacional do escoamento em bombas de cavidades progressivas, Master's degree in mechanical engineering - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 86 pp.
- Rigatti, A. M.Y. (2010) Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte, Master's degree in mechanical engineering, Faculdade de Engenharia, UNESP–Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 87 pp.
- Serizawa, M., Matsumura, T. (2016) Control of Helical Blade Machining in Whirling, *Procedia Manufacturing*, **5**, 417-426. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.035>
- Song, S., Zuo, D. (2014) Modelling and simulation of whirling process based on equivalent cutting volume, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **42**, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.12.011>
- Souza, A. J. (2011) Processos de Fabricação por Usinagem. [lecture notes for the course "Manufacturing Processes by Machining"]. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Whittaker, L. V. (2003) Evaluation and analysis of wear in progressive cavity pumps. PhD in Engineering, The University of Hull, Hull, 194 pp.
- Zanger, F., Sellmeier, V., Klose, J., Bartkowiak, M., Schulze, V. (2017) Comparison of Modeling Methods to Determine Cutting Tool Profile for Conventional and Synchronized Whirling, *Procedia CIRP*, **58**, 222-227. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.216>
- Zaparolli, D. (2009) *Sistema tintométrico - preço e despreparo dos lojistas dificultam crescimento das vendas*. Accessed on January 29, 2018. Available at: <https://www.quimica.com.br/sistema-tintometrico-preco-e-despreparo-dos-lojistas-dificultam-crescimento-das-vendas>



REVISTA AIDIS

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

SOCIAL LIFE CYCLE ASSESSMENT IN WASTE PICKERS ASSOCIATIONS USING PRIMARY AND SECONDARY DATA

Flavio Vassallo Mattos¹
João Luiz Calmon¹
*José Carlos Martins Ramalho¹

Recibido el 13 de diciembre de 2023. Aceptado el 26 de agosto de 2024

Abstract

There is a growing interest in measuring and evaluating social aspects, such as the impact of actions, activities or decisions on society and the environment. To measure these impacts, a tool called Social Life Cycle Analysis (SLCA) can be used with different types of data or inventory sources. However, the conducted bibliographic review revealed that the quality of the data was not verified in previous SLCA studies of waste pickers associations. Therefore, this study compares the results of an SLCA using the same assessment method but with primary and secondary data, motivating the analysis of relationships between data types and assessment results. This analysis focused on the social impacts on Waste Pickers Organizations located in Vitória, the capital of Espírito Santo, Brazil. The results show better impact levels in the indicators and subcategories when using secondary data instead of primary data. This shows that using secondary data leads to more uncertainties for a study with a Type I SLCA with performance benchmarks. Regarding data quality, the trend remains the same, with primary data being of better quality than secondary data.

Keywords: Social Life Cycle Assessment, municipal solid waste, Waste Pickers Organizations, indicators, subcategories, primary/secondary data.

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

*Author correspondal: Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil. Avenida Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras, Vitória-ES, 29075-910, Brasil. Email: jc_ramalho@hotmail.com

Introduction

Social Life Cycle Assessment (SLCA) has been gaining momentum in case studies involving municipal solid waste management systems (MSWMS) that make use of recyclable material recovery and the utilization of waste pickers to verify social impacts (Aparcana and Salhofer, 2013a, 2013b; Yıldız-Geyhan *et al.*, 2017, 2019; Ibáñez-Forés *et al.*, 2019; Azimi *et al.*, 2020). This creates the need to collect inventory data to feed the characterization model and generate the results for assessing social impacts.

In developing countries, waste pickers play a prominent role in collecting recyclable and reusable materials and may or may not be part of the MSWMS (Ibáñez-Forés *et al.*, 2019; Wilson *et al.*, 2012). Particularly in Brazil, the Brazilian Classification of Occupations (Brazil, 2022) recognizes these professionals in category No. 5,192-05: *Catador de Material Reciclável* (Recyclable Waste Picker). These people collect, sort and sell reusable or recyclable materials as an income source (Siman *et al.*, 2020). These exhausting tasks have risks from handling and moving heavy loads containing sharp and biohazardous materials. Moreover, the search for materials in the dumps by informal, unassociated pickers is done under strong sunlight and without adequate personal protective equipment (PPE) to mitigate risks (Costa, 2019). In the search for better working conditions and social inclusion, waste pickers may be organized into associations or cooperatives, the Waste Pickers Organizations (WPO). These are supported by the Brazilian Solid Waste Policy (Brazil, 2010) which is in line with the United Nations Sustainable Development Goals (UN, 2015).

According to the United Nations Environment Programme (UNEP, 2020), the inventory of SLCA studies contains data classified as primary (or specific) and secondary (or generic) as to their origin. Primary data are obtained at the organization or company for the process under study. Conversely, secondary data are collected from other sources like articles, publications, audits, and for different studies and purposes (Ibáñez-Forés *et al.*, 2019; UNEP-SETAC, 2009). As for typology, data can be qualitative, semi-quantitative and quantitative. Examples of the quantitative data range from binary answers (1/0, yes/no) to numbers produced in statistical analyses. Regarding the data obtained in MSWMS that include waste pickers, the use of yes/no questions or coding data into performance reference points (PRP) on a scale of Excellent/Very good/Good/Mediocre/Poor can be used to express the opinion of the interviewees, the pickers (Aparcana and Salhofer, 2013a, 2013b).

The bibliographic review revealed that the characterization of previous social impact assessments in MSWMS with waste pickers did not verify the quality of the data (Mattos and Calmon, 2023). This is because primary data brings produces more accurate results than secondary data (Ibáñez-Forés *et al.*, 2019; Rafiaani *et al.*, 2018; Siebert *et al.*, 2018; UNEP-SETAC, 2009). However, collecting primary data in organizations requires plenty of time and resources (Bonilla-Alicea and Fu, 2019; Hosseinijou *et al.*, 2014; Martínez-Blanco *et al.*, 2014;

Pollok *et al.*, 2021), which may be unfeasible, depending on the study. This may make the use of secondary data the only way to perform the study.

There are two main SLCA families, Type I and Type II. The first is based on models that use PRP for their "scoring" or performance indication (UNEP, 2020). These models can use numeric or color scales, where the results are obtained by checking the indicator's value in a certain range or class of the scale used (UNEP-SETAC, 2009; UNEP, 2020). Conversely, Type II is based on social impact paths for midpoint or endpoint, just like in Environmental LCA, in which characterization models are defined to convert inventory data into impact category results (Neugebauer *et al.*, 2014; UNEP, 2020; UNEP-SETAC, 2009). Therefore, this study aims to compare the results of primary and secondary data use in two Type I SLCA applied to survey social impacts in WPO with PRP. This produces more information on the relationship between different SLCA outcomes when using primary and secondary data.

Materials and methods

According to UNEP (2020), the Social Life Cycle Assessment (SLCA) methodology used to measure social impacts in WPO located in Vitória (Espírito Santo, Brazil) has four basic phases, Goal and Scope, Inventory, Impact Assessment, and Interpretation (SM Figure 1), as in Environmental LCA. This study was also based on the Product Social Impact Assessment methodology, or PSIA 2020 (Goedkoop *et al.*, 2020). Notably, adaptations were made to contextualize the updated Guidelines for SLCA of Products and Organizations (UNEP, 2020) to the scenarios proposed for this study.

Since this paper is focused on the inventory, primary data were collected at the WPO and secondary data (including generic data) from different sources. These WPO were grouped into one, overlapping their influence zone in the municipality's community. This is because they all work in practically the same way, they have contracts with the municipality, receive material from source-separated collection from various points in the city and do not allow sensitive data to be exposed.

First phase of the SLCA: Goal and Scope

The main *goal* was to identify negative and positive social impacts for WPO in their activities, using primary and secondary data. Waste pickers perform these activities, which include collecting, sorting, pressing, baling and marketing recyclable materials (Figure 1). According to the classification proposed in PSIA 2020 (Goedkoop *et al.*, 2020) a WPO are considered companies or organizations comprised of small entrepreneurs. They are linked to a service or process, as they divert recyclable waste from final disposal and forward those sorted materials back to the product cycle.

Thus, the *scope* can be seen as grave-to-grave (Wu *et al.*, 2014), as the social impacts are measured from the end-of-use of a product until before the final disposal of the recyclable components of that product. The SLCA focuses exclusively on the operation/use phase of the WPO in this study (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). The pre-use and post-use phases are not linked to WPO, as they relate to construction, donations, government aid, etc. This means that the system's boundaries restrict to the activities within the WPO only.

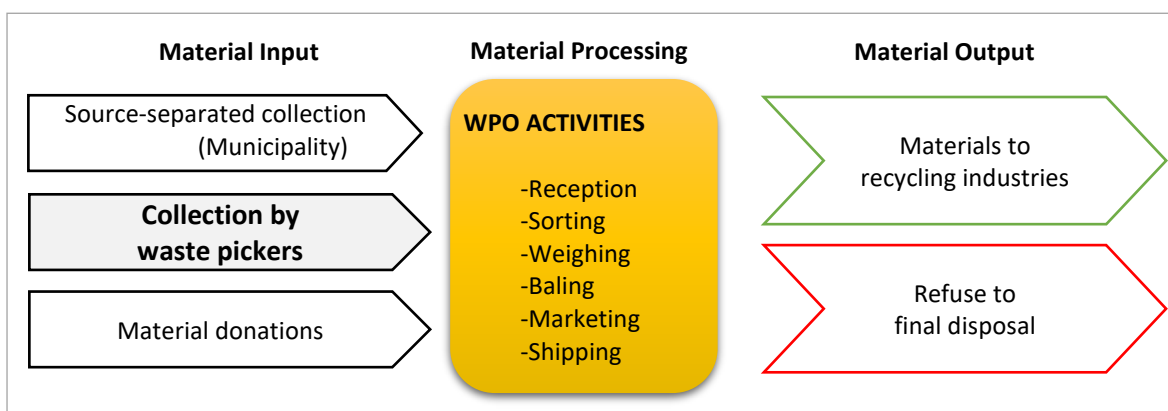


Figure 1. Activities of waste pickers organizations (WPO) considered in the system boundary

Social Hotspots

The social hotspots are social aspects of the stakeholders that are socially impacted by the product created or process performed by the organization and are used to define the stakeholder categories:

- Workers – the waste pickers who are associated with the WPOs;
- Local community – the residents of Vitória, who contact directly with waste pickers and WPOs that operate in that municipality;
- Society - population of ES and Brazil, which receives the indirect influence of WPOs.

These hotspots were based on literature that informs the minimum number of categories and subcategories for an SLCA study in MSWMS that include WPO (Aparcana and Salhofer, 2013b; Azimi *et al.*, 2020; Foolmaun and Ramjeeawon, 2013; Ibáñez-Forés *et al.*, 2019; Harijani *et al.*, 2017; Sousa-Zomer and Miguel, 2018; Umair *et al.*, 2015; Yıldız-Geyhan *et al.*, 2017). As for the primary and secondary data used for both SLCA, its source is indicated in Table 1 for the chosen indicators that comprise the subcategories and categories.

Table 1. Stakeholders, subcategories and indicators selected for evaluating social impacts with Social Life Cycle Assessment

Stakeholder categories	Subcategories	Indicators	Primary data source	Secondary data source	Secondary data year*
Worker	Child labor	Irregular work under 18	Interv., WPO info	IBGE, LL and MTP	2020; (-); 2022
	Collective Bargaining	Presence of collective bargaining	Interv., WPO info	LL, MTP and syndicates	(-); (-); 2022
	Fair Salary	Monthly salary	Interv., WPO info	IBGE, LL, MTP and syndicates	2021; (-); (-); 2022
		Payment regularity	Interv., WPO info	LL, MTP and syndicates	(-); (-); 2022
	Working Hours	Working hours/day	Interv., WPO info	LL and syndicates	(-); 2022
		Night work	Interv., WPO info	LL and syndicates	(-); 2022
	Equal opportunities/ Discrimination	Male/female workers ratio	Interv., WPO info	IBGE	2010, 2019, 2020 and 2021
		Male/female earnings ratio	Interv., WPO info	IBGE and MTP	2021; (-)
		Educational qualifications	Interv.	IBGE	2010, 2019, 2020 and 2021
		Social acceptability	Interv., WPO info	LL and syndicates	(-); 2022
	Health and Safety	Wearing personal protection equipment	Interv., WPO info	LL and MTP	(-); (-)
		Number of work accidents	Interv., WPO info	LL, SNIS and MTP	(-); 2020;(-)
		Has proper equipment for the job	Interv., WPO info	LL, SNIS and MTP	(-); 2020;(-)
		Health & Safety training	Interv., WPO info	LL and MTP	(-); (-)
		Has a suitable place to eat	Interv., WPO info	LL and MTP	(-); (-)
		Has suitable toilets	Interv., WPO info	LL and MTP	(-); (-)
		Job satisfaction	Interv.	IBGE, SEBRAE-DIEESE and syndicates	2021; 2018; 2022
		Social Benefits/ Social Security	Social benefits	Interv., WPO info	LL and MTP
		Paid Time Off (sickness, accidents...)	Interv., WPO info	LL and MTP	(-); (-)
	Local Community	Community engagement	Quantity of recycled material correctly disposed of	WPO info, Municipal data	SNIS
Local employment		Creation of jobs or associations	WPO info	SNIS	2020 and 2021
Access to material resources		Quantity of recycled materials returned to the raw material market	WPO info, Municipal data	SNIS	2020 and 2021
Safe & healthy living conditions		Safe living conditions of the Local Community -Picker	Interv., WPO info	IBGE	2010, 2018 and 2021
Society	Sustainability	Public engagement sustainability issues	WPO info, Municipal data	LL, SNIS and IBGE	(-); 2020 and 2021; 2010, 2018 and 2021
	Contribution to economic development	Contribution to economic development	WPO info, Municipal data	SNIS	2020 and 2021

Note: interv. = interview with associated waste pickers; WPO info – collected information at the waste pickers associations; SNIS – Brazilian Sanitation Information System; IBGE – Brazilian Geography and Statistics Institute; MTP – Brazilian Ministry of Labor and Social Security; LL – Labor Laws; (-): current data or year of publication of the law not considered or does not apply.

Second SLCA phase: Inventory

Two different approaches were made to obtain the data needed to fill the inventory, depending on the data type. For the primary data, structured interviews with waste pickers were used to collect inventory data for the selected indicators, shown in Table 1, via questionnaires with yes/no answers or value scales (Juchen, 2019). As some waste pickers have reading difficulties, the interpretation of the questions may be compromised (Aparcana and Salhofer, 2013a, 2013b), needing an interviewer present to conduct the interview and fill in the questions. In the first visits to the WPO in Vitória (ES, Brazil), it was decided to interview all members who agreed to participate in the research, as the number of waste pickers was slightly less than 20 pickers per association. Conversely, the secondary data were found in bibliographic material related to WPO or similar organizations at a local, regional or national level, easily accessible for research. Examples of sources are surveys from state, national and international institutes, laws, trade unions, and companies similar to the WPO.

To assess the quality of those data, the PSIA 2020 data quality matrix (Goedkoop *et al.*, 2020) was used, with adaptations. These were necessary to understand better the texts based on the Pedigree matrix (Weidema and Wesnæs, 1996), as shown in SM Table 1. This was done by evaluating from 1 (best) to 5 (worst) each datum for the three criteria (Accuracy, completeness and validity; Temporal Correlation; Correlation and Representativeness). The final quality value is the average of those three criteria.

Third SLCA phase: Impact Assessment

The PSIA 2020 (Goedkoop *et al.*, 2020) already has data quality and characterization systems that can be adapted to meet UNEP (2020). Thus, it aligns with the SLCA articles on MSWMS obtained in the bibliography, meeting the SLCA requirements and adding data quality (SM Table 1). The PSIA 2020 uses a PRP system, assigning an importance value to inventory data through levels that indicate positive impacts (+1 and +2), negative impacts (-1 and -2) and an intermediate level (zero), which guarantees the minimum specification for the indicator not to be considered negative (Goedkoop *et al.*, 2020).

The assessment framework from PSIA 2020 evaluates the positive and negative social impacts of products and services, using four stakeholder groups: Workers, Local community, Small-scale entrepreneurs and users (Goedkoop *et al.*, 2018, 2020). Although the 2020 manual reports that this method does not aim to survey the social impacts of a company as a whole, it was used in this study as an evaluation method because the WPO's recyclable material sorting activity equates to a service. Additionally, the PSIA 2020 is equivalent to SLCA Type I and can be adapted to certain points of the SLCA methodology and stakeholders. The adaptations made in implementing the categories, subcategories and indicators of the UNEP (2020) were based on the item *Social*

Hotspots. In line with a Type I approach, reference performance scales based on the UNEP (2020) generic reference model (SM Table 2) were developed for each indicator used.

Regarding the indicators contained in the subcategories presented in Table 1, the reference scale has five performance levels (+2, +1, 0, -1 or -2) with their respective description based on the PSIA 2020 characterization framework (Goedkoop *et al.*, 2020). These descriptions are based on reference points set by national or international standards or government agencies. Thus, the reference scales used in this SLCA were designed for each indicator and can be consulted in Tables 3, 4 and 5 of the Supplementary Material. Then, the impact of the subcategories is calculated through the average value of the indicators that make up that subcategory (WBCSD, 2016), and the same is performed for the categories. Ultimately, the result comprises two values, the impact result and the data quality.

Results and discussion

The fourth phase of the SLCA, Interpretation, is when the results of the SLCA are analyzed and developed based on previous studies. Therefore, the SLCA results of all indicators are presented in SM Tables 6, 7 and 8 for the stakeholder categories *Worker*, *Local Community*, and *Society*, respectively. Since these categories are comprised of subcategories, their average results are presented in Table 2, whereas Figure 2 presents the social performance of each subcategory comprising the stakeholder categories for the SLCA with primary and secondary data.

Table 2. Impact levels of the subcategories with primary and secondary data.

Categories	Subcategories	Primary Data Results		Secondary Data Results	
		Result	Data Quality	Result	Data Quality
Worker	Child labor	1	1	2	2.7
	Collective bargaining	1	1	2	1.7
	Fair salary	0.5	1	1.5	2.0
	Working hours	0.5	1	0	2.7
	Equal opportunities/Discrimination	0.5	1	-0.5	3.2
	Health and Safety	-0.4	1	1.4	3.1
	Social benefits/Social security	2	1	2	2.7
Local community	Community engagement	0	2	0	3.3
	Local employment	0	1	1	3.3
	Access to material resources	-1	2	0	3.3
	Safe & Healthy living conditions (picker)	2	1	0	4.0
Society	Sustainability	1	1	0	3.3
	Contribution to economic development	0	1	1	3.3

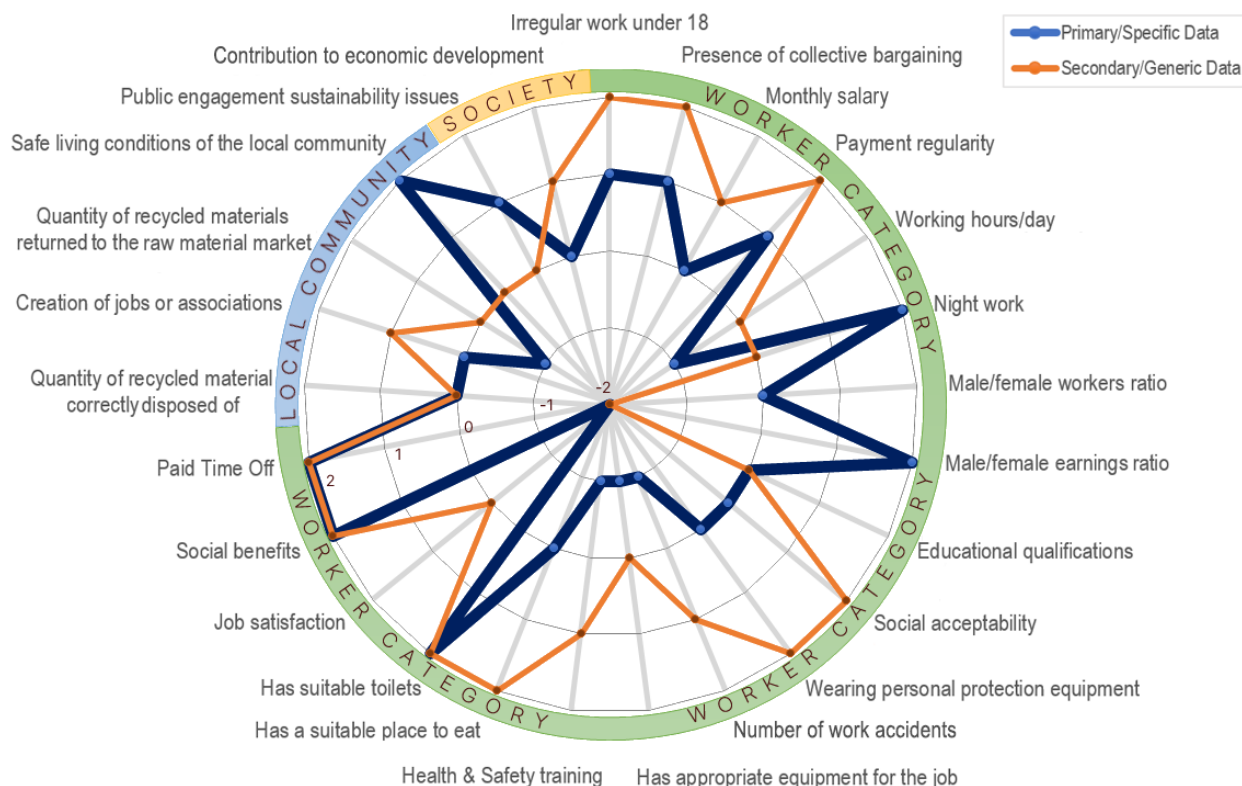


Figure 2. Social impact Levels in waste pickers organizations measured with primary and secondary data. *Source: own source.*

Worker

Starting the discussion by the subcategories, *Fair salary* and *Health and Safety*, the secondary data show better results because it is based on current laws or the companies that must follow such laws, conditioning more favorable results from the perspective of compliance, as well as the great dissatisfaction of the waste pickers of the interviewed WPO. On the other hand, *Working hours* and *Equal opportunities/Discrimination* had more favorable impact levels in the primary data than in the secondary data due to the large participation of women in this industry and equal earnings regardless of gender. The subcategory *Social benefits/Social security* has the same explanation as the equality of impact levels of the indicators that compose it.

As for *Child labor* and *Collective bargaining*, as well as *Local community* and *Society*, the average value is the same as the indicator since these subcategories have one indicator only. Therefore, these indicators will be further analyzed below with the rest of the indicators.

Comparing the 16 indicators of the *Worker* category shown in Figure 2, primary data had a better result than secondary data in three indicators only: *Night work*, *Male/female workers ratio* and *Male/female earnings ratio*. This result shows that this type of organization has particularities that are not captured by secondary data at the national level. This means that although waste pickers are looking for formal, regulated jobs (Aparcana and Salhofer, 2013b; Ibáñez-Forés *et al.*, 2019), this does not guarantee an improvement in the conditions represented by these indicators.

Contrarily, the remaining 12 indicators show more beneficial impact levels for secondary data (SM Table 5). Regarding the positive social impacts, the secondary data overshadowed the primary data in the indicators *Irregular work under 18*, *Presence of collective bargaining*, *Monthly salary*, *Payment regularity*, *Working hours/day* and *Social acceptability* because they are based directly influenced by the current legislation. The study conducted by Aparcana and Salhofer (2013b) proved that the formalization of waste pickers resulted in more favorable social impacts for waste pickers, largely because the pickers' earnings were influenced by the value of recyclable materials or the quantity sorted and sold.

About *Health and Safety*, the indicators *Wearing personal protection equipment*, *Number of work accidents* and *Health & Safety training* had a less favorable level of social impact with the primary data than with the secondary data. This is because the secondary data is based on laws that the company was supposed to obey, and there are discrepancies between the pickers' reports and the managers of the WPO (who are also waste pickers). Additionally, despite the brief explanation of accidents and safety during the interviews recommended by Ibáñez-Forés *et al.* (2019), it was difficult for waste pickers to report facts on this issue accurately. The indicator *Has proper equipment for the job* had a negative impact when primary data was used, particularly because of manual heavy loads handling. These results highlight inconsistencies between what is mandated by the laws and regulations and the reality in these organizations, which point to opportunities for improvement in work conditions.

These improvements are directly connected with *Job satisfaction*, in which the secondary data came from studies of companies that provide job vacancies. Since these data are not necessarily linked to public cleaning companies or equivalent, this explains why the primary data had worse but more accurate results, consistent with the pickers' reported dissatisfaction. This agrees with which analyzed the work conditions of the formal sector, which are better than in the informal sector (Aparcana and Salhofer, 2013b; Yıldız-Geyhan *et al.*, 2017). Conversely, the *Social benefits* and *Paid Time Off* indicators had the same level of social impact outcome because both companies and organizations use the same social security system offered by the Brazilian Federal government despite some differences in forms of contribution and benefits to be received.

Local Community

Regarding the four indicators of the *Local Community* category, only one had a better level with primary data than with secondary data in the *Safe living conditions of the Local Community-Picker*. This is because the actual housing conditions of waste pickers in Vitória, where the WPO are located, is better than the estimated situation of the entire State and country.

The *Quantity of recycled material correctly disposed of*, indicator had the same level of impact on both data types, because the secondary data is from a national report that includes WPO. The other indicators performed better with secondary data, as they represent national-level data that is closer to the performance levels established in the PRP of this study.

Regarding the case of the indicator *Quantity of recycled materials returned to the raw material market*, it was the only one with a negative level only with primary data. This can be explained by the need for improvements in the processes (activities) of the WPO (Dutra *et al.*, 2018) to increase the amount of recyclable material that returns to the raw material market. Another explanation is that the effectiveness of source-separated collection depends on cultural factors, the society's structure, economy, among others (Yıldız-Geyhan *et al.*, 2019), which cannot be accurately represented by the average of secondary data from several sources.

Society

In the *Society* category, the level of impact with primary data was higher than with secondary data in the indicator *Public engagement sustainability issues*. This is because the secondary data adopted the collection of the material by the WPO themselves or with the help of the local community, whereas in reality, the WPO also has contracts with the local government to be included in the MSWMS.

On the other hand, secondary data ranked higher than primary data regarding *Contribution to economic development*. Such a difference in level is explained by the performance reference point of this indicator being based on national data, bringing it closer to the secondary data.

Conclusion

This study was carried out to determine the social impacts of the WPO operating in Vitória (ES – Brazil), using SLCA. Performance Reference Points were used with the indicators' social impact levels (positive, negative or baseline) to determine the impact levels of the subcategories subsequently. Therefore, this enabled the comparison and interpretation of the results.

Regarding the application of primary/specific data, the highest levels of positive impact were verified in the indicators *Night work*, *Male/female earnings ratio*, *Has suitable toilets*, *Social*

benefits, Paid time off and Safe living conditions of the Local Community. Conversely, the *Job satisfaction* indicator achieved the worst level of negative impact. On the other hand, the SLCA with secondary/generic data had better impact levels than its primary data counterpart in 15 out of 25 indicators. Other five indicators had the same impact level value on both data types, and only in five indicators did the SLCA with primary data have better impact levels than the results with secondary data. Of the 25 indicators used in the indicator comparison, the results of 15 indicators with secondary data had better impact levels compared to those with specific data. Five indicators had the same impact level value, and in five indicators, primary data had better levels than the results of indicators using secondary data. This shows that the SLCA results using secondary data tend to outperform the ones measured with primary data.

This conclusion remains subcategory-wise, with the secondary data still achieving better impact levels in seven out of 13 subcategories, while primary data only scored better in four. In the remaining two subcategories impact level was the same. This shows that a study with non-local data does not guarantee an accurate representation of the real social impacts of the WPO operation. Regarding data quality, the trend for the indicators is kept for the subcategories, with primary data having better quality than secondary data. This demonstrates the importance of using primary data to represent the situation more closely. And the need for greater attention in the analysis of SLCA results in WPO when using secondary data.

The strengths of this study are in highlighting the importance of primary data by comparing it with results from the same method using secondary data. Additionally, the quality of the used data was tested while performing a social assessment of a WPO.

The limitations lie in adapting the characterization model for an SLCA with WPO, with the evaluation concentrated in three categories and 13 subcategories. Nevertheless, the adaptation of this model successfully demonstrated the difference between the use of the two types of data and their quality.

Acknowledgements

The authors also acknowledge the financial support given by Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Espírito Santo Research and Innovation Support Foundation – FAPES) project 107/2019.

This research was approved by the Research Ethics Committee of the Federal University of Espírito Santo (UFES), Brazil, on 05/17/2022, Protocol no. 5,413,200.

References

- Aparcana, S., Salhofer, S. (2013a) Application of a methodology for the social life cycle assessment of recycling systems in low income countries: three Peruvian case studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **18**(5), 1116-1128. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0559-3>
- Aparcana, S., Salhofer, S. (2013b) Development of a social impact assessment methodology for recycling systems in low-income countries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **18**(5), 1106-1115. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0546-8>
- Azimi, A. N., Dente, S. M. R., Hashimoto, S. (2020) Social Life-Cycle Assessment of Household Waste Management System in Kabul City. *Sustainability*, **12**(8), 3217. <https://doi.org/10.3390/su12083217>
- Bonilla-Alicea, R. J., Fu, K. (2019) Systematic map of the social impact assessment field. *Sustainability*, **11**(15), 4106. <https://doi.org/10.3390/su11154106>
- Brazil (2002) *Portaria nº 397, de 10.10.2002. Classificação Brasileira de Ocupações*. Disponível em: <https://portalfat.mte.gov.br/programas-e-aco-es-2/classificacao-brasileira-de-ocupacoes/legislacao>
- Brazil (2010) *Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- Brazil (2017) *Consolidação das leis do trabalho – CLT e normas correlatas*. Brasília – Senado Federal, Coordenação de Edições Técnicas, 189 p. Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/535468/clt_e_normas_correlatas_1ed.pdf
- Costa, P. R. B. (2019) *O Papel do Catador de Materiais Recicláveis no Circuito da Coleta Seletiva e da Reciclagem na Região Metropolitana da Grande Vitória (ES)*. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais. 300p Disponível em: https://sappp.ufes.br/tese_drupal//tese_13868_tese%20%20PAPEL%20DO%20CATADOR%20DE%20MATERIAIS%20REICLAVEIS%20NO%20CIRCUITO%20DA%20COLETA%20SELETIVA%20E%20DA%20REICLAGEM%20NA%20RMGV-ES.pdf
- Dutra, R. M. S., Yamane, L. H., Siman, R. R. Influence of the expansion of the selective collection in the sorting infrastructure of waste pickers' organizations: A case study of 16 Brazilian cities (2018) *Waste Management*, **77**, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.009>
- Foolmaun, R. K., Ramjeeawon, T. Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. (2013) *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **18**(1), 155-171. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0447-2>
- Goedkoop, M. J., Indrane, D., De Beer, I. M. (2018) *Product Social Impact Assessment – PSIA: Handbook for product social impact assessment*. Acesso em: novembro de 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329059516HandbookforProduct_Social_Impact_Assessment_2018
- Goedkoop, M.J., et al. (2020) *Product Social Impact Assessment Handbook – PSIA*. Amersfoort. Acesso em: outubro de 2021. Disponível em: <https://product-social-impact-assessment.com>
- Harijani, A. M., Mansour, S., Karimi, B., Lee, C. G. (2017) Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste - A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, **151**, 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.030>
- Hosseinijou, S. A., Mansour, S., Shirazi, M. A. (2014) Social life cycle assessment for material selection: a case study of building materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **19**(3), 620-645. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0658-1>
- Ibáñez-Forés, V. et al. (2019) Assessing the social performance of municipal solid waste management systems in developing countries: Proposal of indicators and a case study. *Ecological Indicators*, **98**, 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.031>
- Juchen, R. T. (2019) *Método de Coleta de Dados Para Inventário de ACV Social*. Tese de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4668>, 116 pp.

- Martínez-Blanco, J., Lehmann, A., Muñoz, P., Antón, A., Traverso, M., Rieradevall, J., Finkbeiner, M. (2014) Application challenges for the social Life Cycle Assessment of fertilizers within life cycle sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, **69**, 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.044>
- Mattos, F., Calmon, J. L. (2023) Social Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management Systems with Contribution of Waste Pickers: Literature Review and Proposals for New Studies. *Sustainability*, **15**(2), 1717. <https://doi.org/10.3390/su15021717>
- Neugebauer, S., Traverso, M., Scheumann, R., Chang, Y. J., Wolf, K., Finkbeiner, M. (2014) Impact pathways to address social well-being and social justice in SLCA — fair wage and level of education. *Sustainability*, **6**(8) 4839-4857. <https://doi.org/10.3390/su6084839>
- Pollok, L., Spierling, S., Endres, H.-J., Grote, U. (2021) Social Life Cycle Assessments: A Review on Past Development, Advances and Methodological Challenges. *Sustainability*, **13**(18), 10286. <https://doi.org/10.3390/su131810286>
- Rafiaani, P., Kuppens, T., Van Dael, M., Azadi, H., Lebaillly, P., Van Passel, S. (2018) Social sustainability assessments in the biobased economy: Towards a systemic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 1839-1853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.118>
- Siebert, A., O'Keeffe, S., Bezama, A., Zeug, W., Thrän, D. (2018) How not to compare apples and oranges: Generate context-specific performance reference points for a social life cycle assessment model. *Journal of Cleaner Production*, **198**, 587-600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.298>
- Siman, R. R., Yamane, L. H., Baldam, R. L., Tackla, J. P., Lessa, S. F. A., Britto, P. M. (2020) Governance tools: Improving UNEP, United Nations Environment Programme (2020) *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020*. Benoît Norris, C., Traverso, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T., Russo-Garrido, S., Berger, M., Valdivia, S., Lehmann, A., Finkbeiner, M., Arcese, G. Acceso em: Setembro de 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/348622046>
- the circular economy through the promotion of the economic sustainability of waste picker organizations. *Waste Management*, **105**, 148-169. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.040>
- Sousa-Zomer, T. T., Miguel, P. A. C. (2018) The main challenges for social life cycle assessment (SLCA) to support the social impacts analysis of product-service systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **23**(3), 607-616. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1010-8>
- Umair, S., Björklund, A., Petersen, E. E. (2015) Social Impact Assessment of Informal Recycling of Electronic ICT Waste in Pakistan Using UNEP SETAC Guidelines. *Resources, Conservation and Recycling*, **95**, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.008>
- UN, United Nations (2015) *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development* (A/RES/70/1).
- UNEP-SETAC, United Nations Environment Programme and Society of Environmental Toxicology and Chemistry (2009) *Guidelines for social life cycle assessment of products*. Belgium, 2009. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products>
- WBCSD, World Business Council for Sustainable Development (2016) *Social Life Cycle Metrics for Chemical Products*. Ginebra, Suíça. Acceso em: 11/2021. Disponível em: <https://www.wbcSD.org/content/wbc/download/1918/24428/1>
- Weidema, B. P., Wesnaes, M. S. (1996) Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, **4**(3-4), 167-174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- Wilson, D. C., Rodic, L., Scheinberg, A., Velis, C. A., Alabaster, G. (2012) Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research*, **30**(3), 237-254. <https://doi.org/10.1177/0734242X12437569>
- Wu, R., Yang, D., Chen, J. (2014) Social life cycle assessment revised. *Sustainability*, **6**, 4200-4226. <https://doi.org/10.3390/su6074200>



- Yildiz-Geyhan, E., Altun-Çiftçioğlu, G. A., Kadirgan, M. A. N. (2017) Social life cycle assessment of different packaging waste collection system. *Resources, Conservation and Recycling*, **124**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.003>
- Yildiz-Geyhan, E., Yilan, G., Altun-Çiftçioğlu, G. A., Kadirgan, M. A. N. (2019) Environmental and social life cycle sustainability assessment of different packaging waste collection systems. *Resources, Conservation and Recycling*, **143**, 119-132. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.028>



REVISTA AIDIS

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

PERCEPÇÃO SOBRE A QUALIDADE DO SERVIÇO DE ÁGUA POTÁVEL NO MUNICÍPIO DE TUCURUÍ – PA, BRASIL: DAS CONDIÇÕES DE OFERTA

* Pedro Henrique Silva de Sousa ¹
Augusto da Game Rego ¹
Allan Jamesson Silva de Jesus ¹

PERCEPTION OF THE QUALITY OF DRINKING WATER SERVICE IN TUCURUÍ – PA, BRAZIL: OFFER CONDITIONS

Recibido el 26 de diciembre de 2023. Aceptado el 6 de mayo de 2024

Abstract

The article aims to analyze the perception of the quality of drinking water supply services in the city of Tucuruí-PA. With a focus on identifying specific phenomena and discussing the relationship between water supply at the SAA km 4 and water consumption and use in the Jaqueira neighborhood, a correlation analysis was carried out only between socioeconomic variables and then between socioeconomic variables and those of water consumption and use. The study was carried out in two stages, the first addressing the capacity of the drinking water supply sector in km4 and the second focusing on the perception of services by the population of the Jaqueira neighborhood. The research indicated that by the year 2028, the km4 system may not have the capacity to meet the water demand of the population living in the area it serves. In addition, the population of the Jaqueira neighbourhood, characterized mainly by small families, low income and low level of education, evaluates the services as poor or very poor. In addition, a negative correlation was identified between the occurrence of intermittent water supply and the assessment of water quality, a positive correlation between economic class and the use of bottled water, as well as a negative correlation between the frequency of household cleaning of reservoirs and the occurrence of symptoms related to contact with poor quality water. Finally, it was not possible to accurately identify the profile of consumers based on perception

Keywords: water supply systems, consumer perception, correlation analysis, cluster analysis.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil.

*Autor correspondente: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil. Av. Brasília, s/n - Vila Permanente, Tucuruí – PA, 68455-766, Brasil. Email: eng.pedrohsousa@gmail.com

Resumo

The article aims to analyze the perception of the quality of drinking water supply services in the city of Tucuruí-PA. With a focus on identifying specific phenomena and discussing the relationship between water supply at the SAA km 4 and water consumption and use in the Jaqueira neighborhood, a correlation analysis was carried out only between socioeconomic variables and then between socioeconomic variables and those of water consumption and use. The study was carried out in two stages, the first addressing the capacity of the drinking water supply sector in km4 and the second focusing on the perception of services by the population of the Jaqueira neighborhood. The research indicated that by the year 2028, the km4 system may not have the capacity to meet the water demand of the population living in the area it serves. In addition, the population of the Jaqueira neighbourhood, characterized mainly by small families, low income and low level of education, evaluates the services as poor or very poor. In addition, a negative correlation was identified between the occurrence of intermittent water supply and the assessment of water quality, a positive correlation between economic class and the use of bottled water, as well as a negative correlation between the frequency of household cleaning of reservoirs and the occurrence of symptoms related to contact with poor quality water. Finally, it was not possible to accurately identify the profile of consumers based on perception

Palavras-chave: sistemas de abastecimento de água, percepção do consumidor, análise de correlação, análise de clusters.

Introdução

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são imprescindíveis para atender a demanda das cidades com o fornecimento de água em quantidade e qualidade suficiente para as necessidades do consumo e, nesse contexto, no Brasil houve avanços na oferta de água potável, porém ainda há significativa parcela, mais de 30 milhões de brasileiros, que não é atendida nas suas residências (Araujo *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2019, Brasil, 2022).

A falta de acesso a água tem como consequência, por exemplo, a ocorrência de doenças relacionadas à falta de saneamento por conta do consumo de água muitas das vezes fora dos padrões de potabilidade, refletindo negativamente no desenvolvimento humano, atingindo, além da manutenção da saúde coletiva, aspectos financeiros e sociais (Penteado e Branchi, 2021; Figueiredo, 2021, Garcez, 1976).

De acordo com Bueno (2011), os estados que compõem Amazônia Legal, como Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Roraima, Rondônia e Tocantins e, parcialmente, o Estado do Maranhão, apesar de ricos em recursos hídricos, sem dúvidas são os mais afetados pelo serviço precário, onde sua população sofre com água em quantidade e qualidade inadequadas. Nesse contexto amazônico, a cidade de Tucuruí no estado do Pará apesar de ter registrado o atendimento com água potável superior a 90% da sua população no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a realidade ainda é de busca por fontes alternativas de água pelas famílias locais em função das falhas no atendimento dos serviços, seja pela oferta de quantidade insuficiente de água, pela qualidade duvidosa da água ou pela intermitência do fornecimento (Brasil, 2022).

Logo, o presente artigo tem como objetivo analisar a percepção dos moradores relativa à qualidade dos serviços de água potável no bairro da Jaqueira em Tucuruí – Pará. O entendimento da percepção dos serviços de água por parte dos consumidores é essencial visando a qualidade de vida da população, visto que o acesso a água potável é indispensável para manutenção da saúde coletiva, sendo necessária para bem-estar social e o desenvolvimento econômico local.

Área de estudo

A cidade de Tucuruí-PA (Figura 1) possui área de 33,22 km² e população de 91,306 habitantes (IBGE, 2022) e seu abastecimento de água é gerenciado pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Tucuruí. Na cidade, o SAA km 4 é um dos sistemas responsáveis por abastecer a população com água potável. O SAA realiza captação de água bruta no manancial superficial “Igarapé Santos” para produção de água potável estimada em 25,000 m³/dia na Estação de Tratamento de Água do km 4 (ETA km 4) que é encaminhada para reservação (capacidade de 250 m³) e, em seguida, distribuída para 25 bairros da cidade.

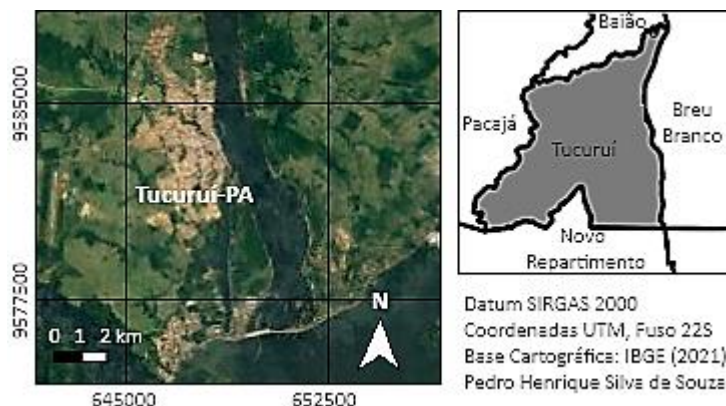


Figura 1. Cidade de Tucuruí – PA. Fonte: Autor, 2022.

Metodologia

Na primeira etapa da pesquisa, foi realizada pesquisa documental sobre a demografia de Tucuruí e em seguida, selecionadas as populações urbanas (P_{urb} em hab.) dos anos de 2000, 2010 e 2022. Em seguida, no QGIS, foram identificados os limites da cidade de Tucuruí para a determinação da sua área (A_{urb} em km²) também para os anos de 2000, 2010 e 2022. Por fim, foram calculados os valores de densidade demográfica absoluta (Dd_{ab} em hab./km²) para 2000, 2010 e 2022 conforme Equação 1. Sem seguida, também com QGIS, foi definida a área de atendimento do SAA km 4 (A_{ae} , em km²) para os anos mencionados e de posse das densidades demográficas absolutas, foram

estimadas as populações para 2000, 2010 e 2022 da área de estudo (P_{ae} em habitantes) conforme Equação 2. Finalmente, os valores de população da área de estudo foram utilizados para a projeção populacional para o período de 2023 a 2043 (via método da curva logística) e para estimativa da demanda de água na área atendida pelo SAA km 4 visando comparação com a capacidade de produção de água potável do SAA.

$$Dd_{ab} = \frac{P_{urb}}{A_{urb}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$P_{ae} = Dd_{ab} \times A_{ae} \quad \text{Equação (2)}$$

Na segunda Etapa, foi realizada elaboração e aplicação de questionário para análise da percepção dos consumidores sobre o serviço de água potável do município de Tucuruí – PA, esse questionário foi aplicado no bairro da Jaqueira. O motivo da escolha deste bairro foi devido a sua localização e também por questões de segurança do pesquisador. Visto que nas outras regiões existe um alto índice de criminalidade, com isso, optou-se pelo o bairro que houvesse uma quantidade considerável de residências. Desta forma, as perguntas foram organizadas em três grupos, no caso, “dados socioeconômicos”, “conhecimento básico sobre o SAA” e “especificidades sobre uso e consumo de água”. A aplicação do questionário ocorreu em no bairro da Jaqueira, visto que era o bairro que possui um número expressivo de residências e também é necessário frisar a questão da sua localização, no qual acaba ajudando na segurança física do pesquisador. Com isso, amostra calculada pelo método da amostragem aleatória simples sobre estimativa realizada do número de residências. Os resultados das foram sistematizados e analisados com uso do software R Studio. Inicialmente, foram calculadas as estatísticas descritivas para identificação e composição das características socioeconômicas e ambientais da população do bairro da Jaqueira.

Em seguida, com objetivo de identificação de fenômenos específicos e discussão sobre a relação oferta de água no SAA km 4 *versus* consumo e uso da água no bairro da Jaqueira foi realizada análise de correlação somente entre as variáveis socioeconômicas e em seguida entre as variáveis socioeconômicas e as de consumo e de uso de água. Por fim, foi realizada análise de agrupamento para verificação de perfis socioeconômicos e de consumo e uso de água visando políticas públicas de SAA diferenciadas para estratos específicos da população dentro do mesmo bairro.

Resultados e discussão

Conforme metodologia apresentada, as áreas habitadas da cidade de Tucuruí nos anos de 2000, 2010 e 2022 identificadas foram utilizadas para o cálculo das densidades demográficas absolutas (D_{dab}) para os referidos anos e os resultados foram, respectivamente, 4108 hab./km²,

4383 hab./km² e 4599 hab./km². Considerando as áreas atendidas pelo SAA km 4 identificadas para 2000, para 2010 e para 2022 (Figura 2), chegou-se nas populações atendidas estimadas, respectivamente, de 25857, de 36471 e de 35058 habitantes.

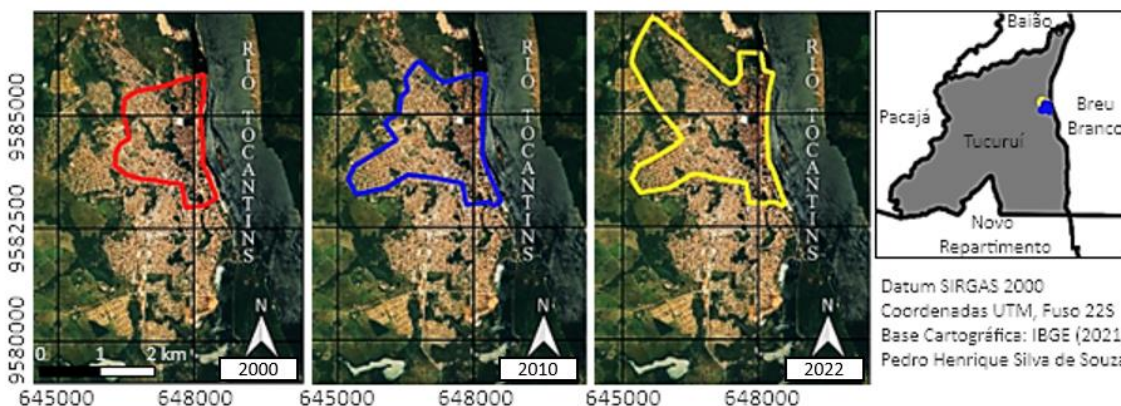


Figura 2. Áreas atendidas pelo SAA km 4 nos anos de 2000, de 2010 e de 2022. Fonte: Autor, 2022.

Com base na estimativa da população para o período de 2023 a 2043 e considerando a demanda *per capita* de 250 l/hab., foi possível projetar a demanda de água potável e comparar com a capacidade de produção do SAA km 4 (Tabela 1) e, nesse sentido, é notório o cenário de déficit na relação oferta *versus* demanda de água potável na área atendida. Assim, é possível estimar que a partir de 2029 o SAA Km 4 não será suficiente para atender a demanda pela qual é responsável, sendo necessário outros meios para poder sanar essa problemática ou até mesmo ampliação do sistema para poder suprir as necessidades existentes.

Tabela 1. Limite da capacidade de oferta de água potável no SAA km 4

Ano	Demanda estimada (L/s)	Capacidade de produção (L/s)
2022	256.56	289.35
2029	290.03	289.35
2043	338.72	289.35

Avaliando a população da área e a relação de 3.7 habitantes por domicílio (Brasil, 2022), estima-se que o bairro da Jaqueira possui cerca de 314 domicílios. Dessa forma, considerando o grau de confiabilidade de 95% e margem de erro de 5%, o tamanho da amostra calculada foi de 174 domicílios, nas quais foram aplicados os questionários e sobre os resultados das estatísticas descritivas percebe-se a ausência de simetria nos gráficos de blocos (Figura 3). Chama a atenção

a taxa de residentes por domicílio ser inferior 3.7 hab./domicílio e a quantidade de famílias recentes no bairro (metade mora a menos de 10 anos). Além disso, metade das famílias moram em imóveis próprios (fato que pode ser explicado pela ocupação dos chefes de família que em sua maioria, aproximadamente 75%, ou trabalha ou é aposentado), no entanto, as famílias se concentram quase na totalidade na classe C2 (renda entre R\$ 1965 e R\$ 3276 dentro do Critério Brasil) e três quartos dela possui escolaridade igual ou inferior ao ensino médio. A baixa renda com poder de compra enfraquecido torna a população mais suscetível a todas as dificuldades causadas pela falta de saneamento, impactando de maneira significativa os grupos mais vulneráveis e os de regiões mais periféricas (Carvalho, 2020).

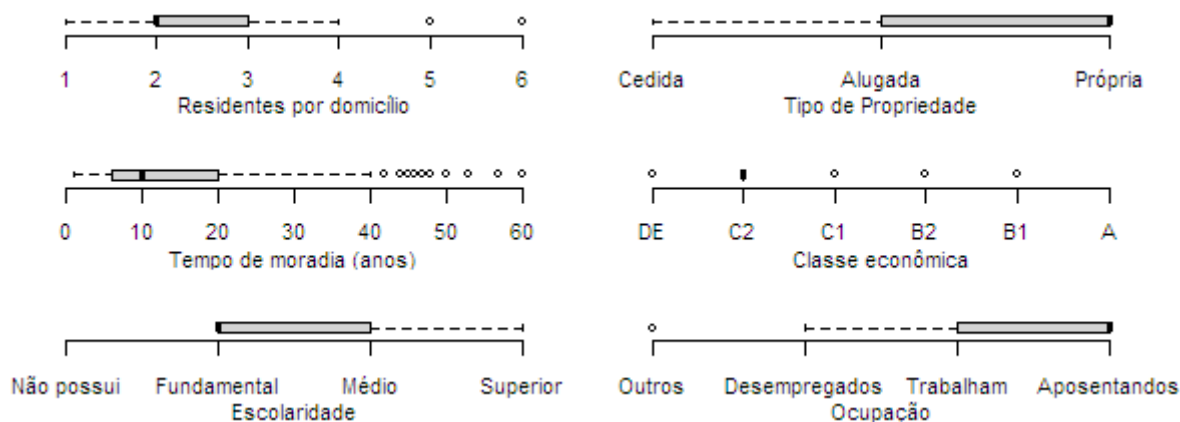


Figura 3. Dados socioeconômicos dos residentes da Jaqueira. Fonte: Autor, 2022.

Sobre as fontes de água para consumo foi constatado que 297 residências utilizam a água do SAA como fonte principal, significativa parcela dos domicílios (Figura 4), porém, quando se trata de água para ingestão a população ainda opta por soluções alternativas, o que demonstra a desconfiança da população na qualidade da água do SAA km 4. Situação que pode estar causando problemas de saúde na população, visto os relatos de sintomas relacionados à ingestão e ao contato com água de má qualidade e por ser de baixa renda, teoricamente possui menor condição financeira para tratamentos de saúde. Nesse contexto, ao serem questionados sobre ocorrências nos últimos seis meses de sintomas próprios de doenças relacionadas à água de má qualidade tanto pela ingestão (diarreia aquosa, vômito, dor abdominal e fezes com sangue etc.) quanto pelo contato (coceira na pele, irritação, vermelhidão nos olhos, manchas vermelhas na pele etc.), os resultados apontam para um quadro preocupante, pois 50.29% da população indicou sintomas que podem estar relacionados a ingestão e cerca de 29.24% admitiu sintomas que podem estar relacionados ao contato, é constatado essa afirmação devido aos resultados encontrados na (Figura 5). Esse cenário apenas reforça uma problemática que é

histórica nas regiões Norte e Nordeste do território brasileiro, onde em 2016 apenas 6% das internações em unidades hospitalares eram relacionadas a doenças de veiculação hídrica, valor relativamente elevado se comparado à média nacional que foi de 3.20% no mesmo período, porém o cenário paraense é mais preocupante ainda, pois cerca de 8.68% das internações são por doenças de veiculação hídrica (Paiva e Souza, 2016).

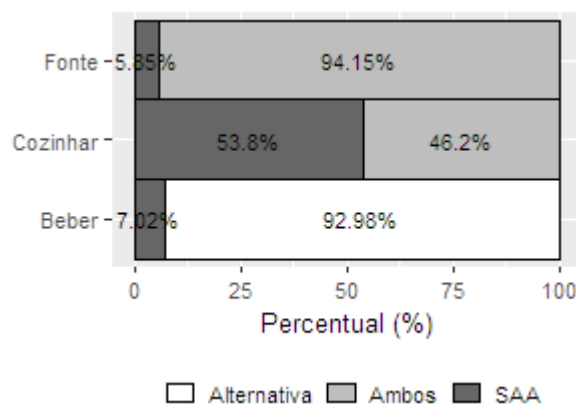


Figura 4. Fonte de água para consumo e sintomas relacionados a má qualidade da água.

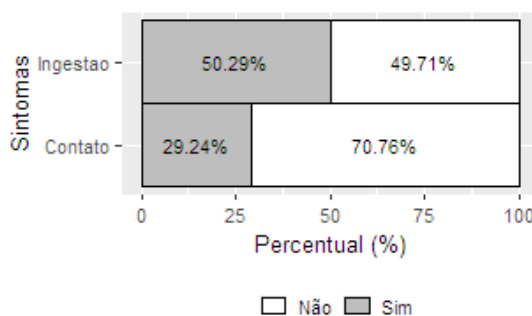


Figura 5. sintomas relacionados à ingestão e ao contato com água de má qualidade. Fonte: Autor, 2022.

Em relação a avaliação do serviço prestado pelo SAA km 4, foi possível constatar que 50.29% dos residentes do bairro da Jaqueira avalia o serviço como “muito ruim” e apenas uma parcela mínima de 15.20% considera o serviço como bom. Os resultados apresentados na (Figura 6) já eram esperados visto que a problemática vivida pelas pessoas na cidade de Tucuruí-PA é histórica. Quando os residentes do bairro avaliam a qualidade da água a situação continua desfavorável, pois a grande maioria da população decreta o SAA como ineficiente, visto a quantidade expressiva de avaliações ruins. É necessário citar que o único parâmetro relativamente satisfatório, foi a

pressão da água no qual obteve números positivos, porém esse resultado pode estar relacionado à existência de reservatórios domiciliares no bairro da Jaqueira.

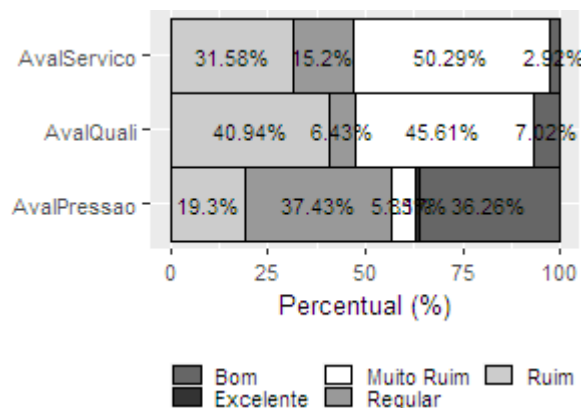


Figura 6. Dados sobre a avaliação do SAA do km04. Fonte: Autor, 2022.

Considerando as suposições levantadas ao longo da análise descritiva dos dados obtidos na pesquisa, foi feito estudo de correlação entre as variáveis. Devido a constatação de hipótese nula via teste de normalidade de Shapiro-Wilk para o conjunto de dados, foi necessário realizar teste não paramétrico para investigação e, nesse caso, foi utilizado o coeficiente S de correlação de Spearman. Dentre os resultados das correlações, algumas devem ser citadas e, nesse caso, foram consideradas as correlações moderadas (valores de S superiores a 0.6 ou inferiores a -0.6) onde há evidências estatisticamente significativas para rejeitar a hipótese nula (grau de significância inferior a 0.01).

Nesse sentido, primeiramente chama-se atenção para a correlação entre os dados de existência de reservatórios e avaliação dos serviços de SAA ($S=0.62$ com grau de significância inferior a 0.01), pois existe uma correlação moderada entre essas duas variáveis, no qual é possível afirmar que possuem o mesmo comportamento, ou seja, uma pessoa que possui reservatórios em sua residência tende a avaliar os serviços positivamente. visto que o próprio reservatório acaba servindo como uma forma de tratamento. Para efeito de comparação, de acordo com Rego (2021), foi constatado que residências que possuíam reservatórios internos acabaram funcionando como uma forma de tratamento, devido aos sólidos em suspensão sedimentarem, tornando o aspecto da água mais agradável para o consumidor.

Os resultados de Rego (2020) e Brito *et al.* (2021), podem também explicar a correlação entre a existência de reservatórios na residência e a utilização da água do SAA para cozinhar ($S=0.71$ com grau de significância inferior a 0.001) e a correlação existente entre a Fonte de água e Água para cozinhar ($S=0.66$ com grau de significância inferior a 0.01), uma vez que as pessoas acabam utilizando uma água de melhor qualidade para beber e cozinhar, como forma de preservar a saúde dos usuários, mas se for constatado que a água for de péssima qualidade, ela será destinada para outros usos, como por exemplo serviços domésticos.

É válido citar a correlação entre o grau de intermitência no fornecimento de água no SAA e a avaliação da qualidade da água ($S=0.72$ com grau de significância inferior a 0.001). Nesse caso, quanto melhor a avaliação quanto à intermitência mais positiva é a avaliação da qualidade da água. Esse fato pode ser explicado pela piora da qualidade da água fornecida possivelmente em função de manutenções mal planejadas e/ou intervenções clandestinas nas redes, ocasionando entrada de material estranho com pedras e areias na rede de distribuição. Hipótese reforçada pelos resultados do estudo de Totsuka (2004) e de Sousa (2019), onde a intermitência acaba gerando pontos da rede com pressões baixas, implicando assim risco de contaminação, ocasionando perigos a saúde coletiva.

A falta de água tanto em quantidade quanto em qualidade faz com que a população procure por outras fontes para consumo e, nesse caso, a utilização de água envazada é alternativa nesse cenário para água de beber, porém apenas a população de maior renda consegue contornar esses problemas, conforme correlação entre a classe econômica e o uso água envazada, ($S=0.60$ com grau de significância inferior a 0.01). Essa situação só reforça o problema social que é a falta de acesso adequado à água e potencializa os riscos inerentes a ele para a população do bairro da Jaqueira, essa hipótese acaba sendo reforçada de acordo com o Brito *et al.* (2021), de acordo com o estudo realizado pelo autor, foi perceptível que as famílias com um maior poder aquisitivo consumiam água envazada, devido à falta de confiança no SAA da cidade. Já em contrapartida, isso não ocorria na população com um menor poder aquisitivo, onde consumiam água do sistema de abastecimento devido à falta de verba. Outro fator que reforça essa hipótese é a preferência pela aquisição de água mineral envasada seja em relação a deterioração do sistema de abastecimento de água, com isso, levando a população a desacreditar na eficiência do SAA, fazendo com que a população tivesse uma predileção maior na água mineral envasada. (Brasil, 2019; Moura *et al.* 2011).

Os resultados de Freire (2012), apontaram que devido os reservatórios não passarem por uma limpeza periódica, tendo em vista a falta de informação em relação a importância sanitária que a limpeza desses reservatórios possui, acabava ocorrendo uma negligência em relação a isso. Com isso, ocorrendo a proliferação de diversos microrganismos. Isso se faz presente no estudo, quando a existência de correlação moderada entre a frequência de limpeza dos

reservatórios domiciliares e a ocorrência de sintomas relacionados ao contato com água de má qualidade ($S = -0.62$ com grau de significância inferior a 0.01) enfatiza que a boa frequência da limpeza do reservatório domiciliar acaba impactando em menor ocorrência de coceiras na pele, irritação, de vermelhidão nos olhos, de manchas vermelhas na pele etc. De acordo com Heller (2009), as doenças de veiculação hídrica são doenças típicas de ambientes precários, devido ao péssimo serviço prestado a população acaba utilizando desse recurso para sanar as suas necessidades. Com isso, ocorrendo assim a transmissão dessas doenças.

Por fim, a limpeza do reservatório domiciliar se comporta de forma semelhante a avaliação do serviço do SAA (0.61 com grau de significância inferior a 0.01) e, nesse caso, a lógica é: quanto mais negativa a opinião sobre os serviços de água, maior a frequência na limpeza dos reservatórios domiciliares na tentativa de atenuar os problemas com qualidade da água. É importante frisar que segundo um estudo realizado em Recife-PE, houve a percepção que os microrganismos, se encontrava no reservatório da residência. Visto que na saída da estação de tratamento e na entrada da residência não constavam indícios de doenças de veiculação hídrica, mas após análises microbiológicas das amostras coletadas no reservatório do domicílio, foi constatado a incidência de *E. coli*, com isso enfatizando a importância da limpeza dos reservatórios periodicamente (Freire, 2012).

Todas as análises de correlação desenvolvidas e discutidas são base do correlograma da (Figura 7), lembrando que foram consideradas apenas os resultados das correlações com S superiores a 0.6 ou inferiores a -0.6 e com grau de significância inferior a 0.01.

Finalmente, foi realizada análise de clusters com todas as variáveis do banco de dados na tentativa de identificação de perfis de consumidores no bairro da Jaqueira e para isso os dados foram normalizados, transformando-os para escala de 0 a 1, para evitar problemas de viés de escala na análise de dados. Foram realizadas várias rodadas de agrupamento considerando de 2 a 9 grupos e a que apresentou melhores resultados identificou 4 clusters, no caso, nomeados como A, B, C e D onde essa sequência obedeceu a ordem das médias das notas dadas para a avaliação dos serviços de água do SAA km 4. Os grupos A, B, C e D contêm, respectivamente, 11, 30, 121 e 9 domicílios, conforme apresentado na Figura 8.

Porém, quando analisadas as médias entre os valores das variáveis dentro de cada grupo, não foram observados resultados satisfatórios para a formação dos perfis com precisão, uma vez que todos os grupos possuem valores médios das variáveis muito semelhantes e que não obedeceram a uma ordem bem definida quando comparados entre as variáveis, conforme observado na Figura 9.

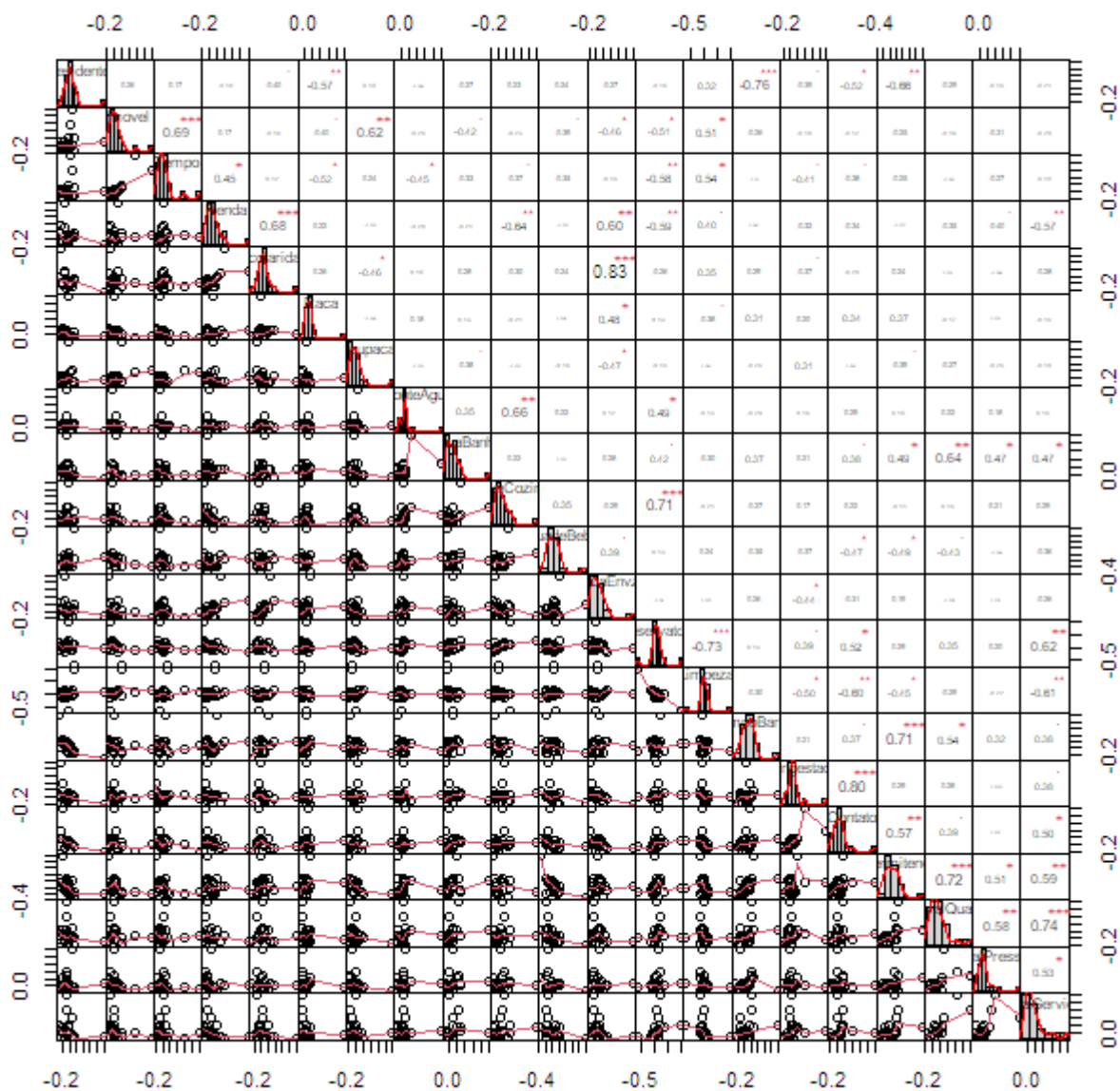


Figura 7. Correlações entre dados socioeconômicos, de consumo de água e de avaliação dos serviços de água no bairro da Jaqueira, Tucuruí-PA. Fonte: Autor, 2022.

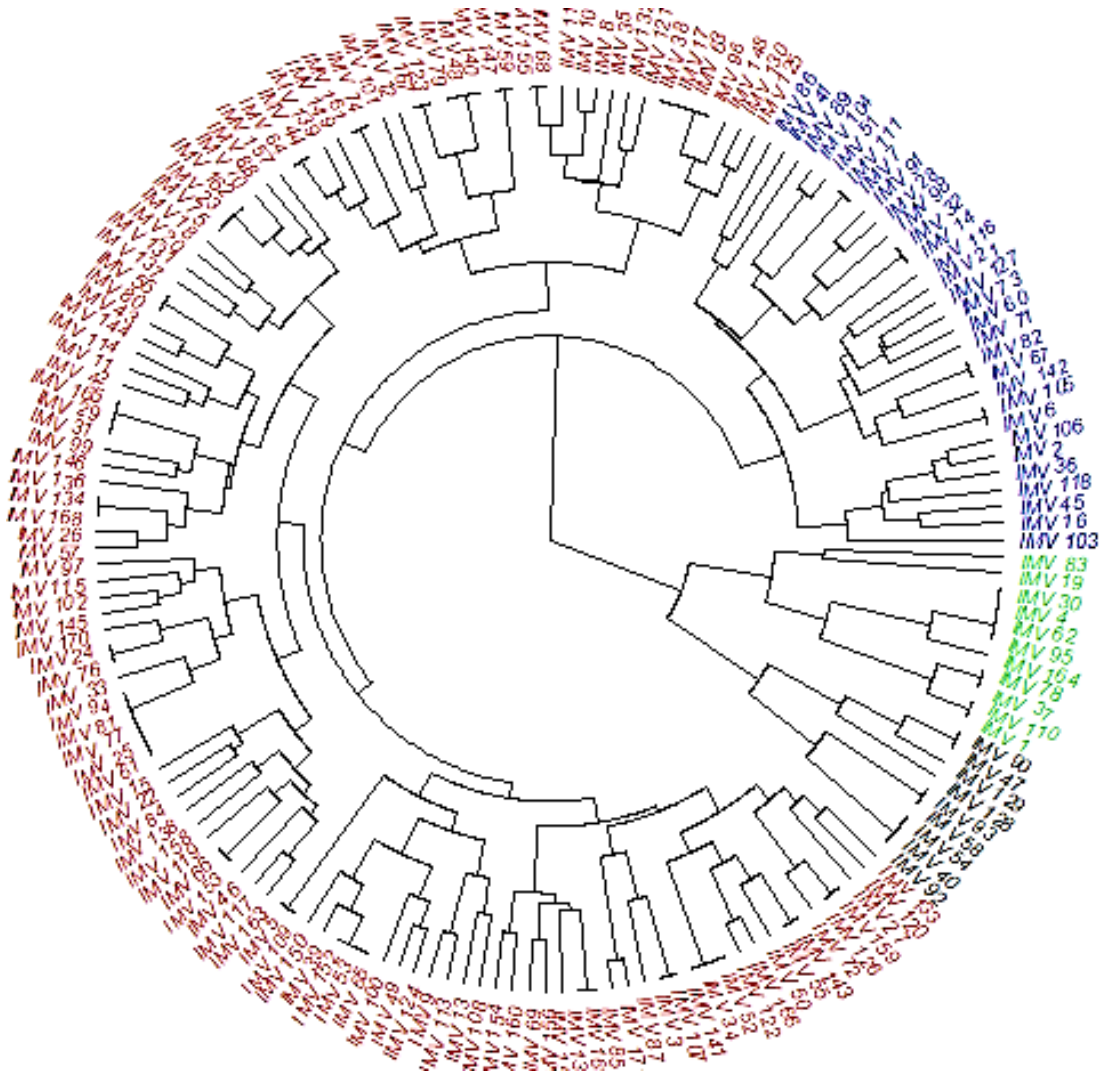


Figura 8. Perfiles de consumidores do SAA km 4. Fonte: Autor, 2022.

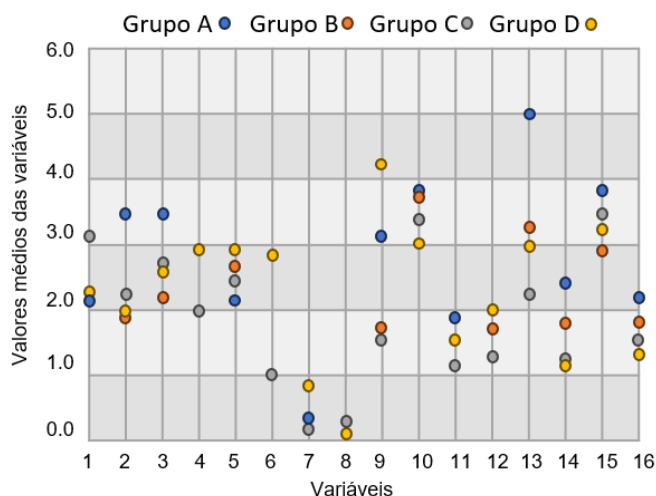


Figura 9. Valores médios das variáveis para cada Cluster. *Fonte: Autor, 2022.*

Conclusões

A realidade do saneamento básico no Brasil está distante do ideal quando analisada a qualidade dos serviços prestados. Os dados do Sistema Nacional de Informações Sobre o Saneamento (SNIS) apontam muitas das vezes realidades positivas para o abastecimento de água nas cidades brasileiras, porém a situação *in loco* pode ser bem distinta, onde a cobertura desses serviços se aproxima relativamente de uma cobertura total das demandas urbanas e, no entanto, as populações urbanas ainda sofrem com insuficiência de quantidade e qualidade de água potável em suas torneiras em função de problemas operacionais.

Foi possível constatar a expansão ao longo dos anos de 2000 a 2022 na área urbana ocupada na cidade de Tucuruí e a partir da pesquisa realizada no SAA do km 4 conclui-se que o sistema não conseguirá atender essa expansão e é previsto para o ano de 2028 o colapso do atendimento se nenhuma medida for tomada, pois a demanda por água potável atingirá patamar superior ao da capacidade de produção do sistema.

A cidade de Tucuruí, que possui índices de atendimento historicamente superiores a 90%, está distante de ser atendida de forma satisfatória pelo serviço de água potável. Problemas como pressões baixas na rede de distribuição, má qualidade da água e intermitência no sistema fazem com que a população avalie negativamente o serviço e procure fontes alternativas para abastecimento de água.

A busca por fontes alternativas de água traz riscos à saúde devido sua ingestão e contato e, nesse caso, a população atendida pelo SAA do km 4 revela cenário preocupante, pois a água ingerida pode ser causa de sintomas que variam de diarreias aquosas a vômito, dor abdominal e fezes com sangue. Todavia, a ocorrência, mesmo que relatados com menor frequência, de sintomas como coceira na pele, irritação, vermelhidão nos olhos, manchas vermelhas na pele etc. também trazem prejuízos à população.

Uma das contradições identificadas na pesquisa é a utilização de água envazada pela população que é em sua maioria é de baixa renda. A falta de acesso a um serviço de qualidade e o não uso de fontes alternativas de qualidade duvidosa fazem com que a população faça arranjos financeiros para ter água de qualidade e não estar susceptível aos riscos inerentes à ingestão de água de má qualidade.

Vale ressaltar a importância da utilização dos softwares livres nas atividades da pesquisa, os quais foram fundamentais para o desenvolvimento da metodologia proposta para analisar a percepção da população sobre qualidade dos serviços de água em Tucuruí. As etapas empregadas atenderam às expectativas do objetivo da pesquisa e recomenda-se a aplicação dela em outras cidades de configurações socioeconômicas semelhantes ou distintas para comparação dos resultados e avanço no entendimento de que atendimento com água potável vai muito mais além que ter redes de distribuição cortando o espaço urbano. Nesse caso, coloca-se em dúvida a universalização dos serviços de água potável tendo em vista a realidade dos problemas operacionais enfrentados pelas companhias de saneamento no Brasil.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) *NBR 12211: Informação e documentação: Referências*. Rio de Janeiro: ABNT. p. 14. 1992. Acesso em: 16 de outubro de 2022. Disponível em: <https://www.ufpe.br/documents/40070/848544/abntnbr6023.pdf/092b145a-7dce-4b97-8514-364793d8877e>
- Araujo, L. F., Camargo, F. P., Netto, A.T., Vernin, N. S., Andrade, R. C. (2022) Análise da cobertura de abastecimento e de qualidade da água distribuída em diferentes regiões do Brasil ano de 2019. *Ciência & Saúde Coletiva*, **27**(7), 2935-2947. Acesso em: 30 de outubro de 2022 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/df4BcYHkpmXbth4pjyppfmSp/#>
- Bezerra, S. T. M., Cheung, P. B. (2013) *Perdas de água: tecnologia de controle*. João Pessoa: Editora da UFPB.
- Brasil (2006) *Inspeção Sanitária em Abastecimento de Água*. Brasília, Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde, 84 pp. Acesso em: 20 de janeiro de 2023. Disponível em: https://bvsm.sau.gov.br/bvs/publicacoes/inspecao_sanitaria_abastecimento_agua.pdf
- Brasil (2007) *Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007*. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília: Diário Oficial da União. Acesso em: 23 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2007/lei-11445-5-janeiro-2007-549031-publicacaooriginal-64311-pl.html>

- Brasil (2014) *Diagnóstico dos serviços sobre água e esgoto – 2012*. Brasília: Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Acesso em: 25 de setembro de 2022. Disponível em: www.snis.gov.br
- Brito, J.M.S., Narezi, G., Menezes, P. D. R., Sussmann, R. A. C., Novais, J. S., Farias, M. S., Quinelato, R. V., Silva, A. G. (2021) Percepção ambiental quanto a qualidade da água utilizada na vila histórica de Caraíva, Porto Seguro – BA. *Revista Brasileira De Geografia Física*, **14**(2), 847–868. Acesso em: 05 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/249340>
- Carvalho A. C. L., Rocha, G. M. (2020) Análise dos Riscos e da Vulnerabilidade Socioambiental Urbana, face ao Desenvolvimento Desordenado e a Pressão aos Recursos Hídricos em Belém-PA. *Brazilian Journal of Development*, **6**(4), 18127-18142. Acesso em: 10 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/8559>
- Figueiredo, E. A. (2022) *Nota da Presidência n. 15: Saneamento básico, acesso à água potável e desenvolvimento humano*. Brasília: Ipea. Acesso em: 05 de novembro de 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11516>
- Freire, R. C. (2012) Qualidade da água nos reservatórios domiciliares na região metropolitana da cidade do Recife, Pernambuco. *Journal of Management & Primary Health Care*, **3**(2), 102-105. Acesso em: 20 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://jmphc.emnuvens.com.br/jmphc/article/view/146/148>
- Garcez, L. N. (1976) *Elementos da engenharia hidráulica e sanitária*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- Gomes, H. P. (2009) *Sistemas de abastecimento de água: Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias*. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB.
- Gomes, H. P. (2012) *Sistema de Bombeamento: Eficiência Energética*. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB.
- Gonçalves, R. F. (2009) *Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de água*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária.
- Heller, L. Pádua, V. L. (2006) *Abastecimento de água para consumo humano*. Brasília: Editora UFMG. Acesso em: 04 de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ddNXKQtVKQOrp865DmHKyFQ/?lang=pt>
- Heller, L., Pádua, V. L. (2006) *Abastecimento de Água para o Consumo Humano*. Rio de Janeiro: Engenharia Sanitária e Ambiental.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) *Censo Brasileiro de 2022*. Rio de Janeiro: IBGE. Acesso em: 18 de dezembro de 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html?=&t=conceitos-e-metodos>
- Kuroda, E. K. (2002) *Avaliação da filtração direta ascendente em pedregulho como pré-tratamento em sistemas de dupla filtração*. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Hidráulica) – Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 242f. Acesso em: 17 de março de 2023. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-07012016-121656/publico/Dissert_Kuroda_Emilia.pdf
- Martha Júnior, G. B., Contini, E., Navarro, Z. (2011) *Caracterização da Amazônia Legal e macrotendências do ambiente externo*. Brasília – DF: Embrapa Estudos e Capacitação, p. 50. Acesso em: 24 de março de 2024 Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/907075/1/GBMJEstudoAMZDA1vISSN.pdf>
- Moura, L. R. C., Porto, G. D., Cunha, N. R. S., Moura, L. E. L., Veiga, R. T. (2011) O comportamento de compra e a percepção dos atributos da água mineral pelos consumidores. *Perspectiva Erechim*, **35** (130), 97-112. Acesso em: 25 de setembro de 2022. Disponível: https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/130_175.pdf
- Oliveira, J. L. M., Cohen, S. C., Kligerman, D. C., Cardoso, T. A. O., Assumpção, R. S. F. V., Barrocas, P. R. G. (2019) Os desafios do saneamento como promoção da saúde da população brasileira. *Saúde debate*, **43**(especial 3), 4-7. Acesso em: 30 de novembro de 2022. Disponível em: <https://saudeemdebate.emnuvens.com.br/sed/article/view/7942>
- Paiva, R.F.P.S, Souza, M.F.P.S. (2016) Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. *CSP – Caderno de Saúde Pública*, **34**(1), 1-11. Acesso em: 12 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/c3DgtD4MPBmxLdpmW8NxBHK/?format=pdf&lang=pt>

- Penteado, T. B., Branchi, B. A. (2021) O acesso à água e saneamento na promoção do desenvolvimento humano. *Revista Científica ANAP Brasil*, **14**(35), 1-15. Acesso em: 10 outubro 2022. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/article/view/2918/2744
- Pimentel, D., Pimentel, M. (2006) Global environmental resources versus world population growth. *Ecological Economics*, **59**(2), 195-198. Acesso em: 02 agosto de 2022 Disponível: <http://www.aseanenvironment.info/abstract/4156465.pdf>
- Quasim, S. R. (1998) *Wastewater treatment plants: planning, design, and operation*. Estados Unidos: CRP Press.
- Rego, A. G. (2016) *Desenvolvimento e aplicação de metodologia para avaliação de desempenho hidroenergético de Sistemas de Abastecimento de Água*. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia em Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém. 2016. Acesso em: 19 dezembro 2022 Disponível em: <https://www.proderna.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/2016/Tese%20-%20Augusto%20Rego%20-%20Final.pdf>
- Rego, A. G., Almeida, A. R., Miranda, D. M. C., Silva, E. M. F., Lima, H. S. S. (2020) Correlação entre especificidades de sistemas de abastecimento de água e suas perdas de água: o caso das companhias regionais do norte do Brasil. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, **12**(2), 193-205. Acesso em: 02 de março de 2023. Disponível em: https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/15002/2092092_13422
- Rego, A. G., Castro, N. C. O., Castro, T. C., Silveira, B. S., Carvalho, V. G (2020) Análise das condições de consumo de água e das suas especificidades em um setor de distribuição de água potável. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, **12**(1), 62-73. Acesso em: 05 de janeiro de 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350734761_Analise_das_condicoes_de_consumo_de_agua_e_das_suas_especificidades_em_um_setor_de_distribuicao_de_agua_potavel
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio M. D. P. B. (2013) *Metodologia de pesquisa*. 5 ed. Porto Alegre: Penso.
- Sousa, B. G. (2019) *Intermitência no abastecimento de água nos processos de adaptação: uma análise documental na cidade de São João do Rio do Peixe-PB*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal da Paraíba, Campus VIII, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, Araruna-PB, 65f. Acesso em: 04 fevereiro de 2023. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br/xmlui/handle/123456789/22687>
- Totsuka, N., Trifunovic, N., Vairavamoorthy, K. (2004) Intermittent urban water supply under water starving situations. In: *30th WEDC International Conference, Vientiane, Lao PDR. Article*, 505-512.
- Tsutiya, M.T. (2006) *Abastecimento de água*. 3ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Tsutiya, M.T. (2014) *Abastecimento de água*. 4ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

REVISTA AIDIS

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

RESÍDUOS SÓLIDOS EM UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA AMAZÔNIA ORIENTAL: COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA E PERCEPÇÃO DOS DISCENTES

Leidiane Gonçalves Tavares ¹
* Thaisa Pegoraro Comassetto ¹

SOLID WASTE ON A UNIVERSITY CAMPUS IN THE EASTERN AMAZON: GRAVIMETRIC COMPOSITION AND STUDENTS' PERCEPTION

Recibido el 10 de enero de 2024. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

We aimed to carry out a diagnosis of the solid waste (SW) produced at a small campus of the Rural Federal University of Amazon, located in Capitão Poço, Pará State, Eastern Amazon region. We also evaluated the environmental perception of graduation students to support the practice of environmental education tools and encourage the appropriate destination of SW. We collected biweekly and analysed the SW composition of all the residues produced at the institution at the end of one day. We also assessed the environmental perception of 198 students through a questionnaire application. The results showed that the campus produced, on average, 431.8 kg month⁻¹ and 21.59 kg day⁻¹ of SW. The largest portion has recyclable potential (73.7%), such as organic waste (29%), paper (24%) and plastic (17%). The questionnaires analysis showed that 58% of the students are unaware of the 5Rs policy and only 4% do separate waste at source at homes. However, more than 70% would support environmental actions at the university. Biological Sciences students had a more engaged perception, due to the influence of the curricular components and projects developed during graduation. The institution has the potential to appropriately manage its waste in addition to implementing efficient SW management policies. The solution can come through the implementation of a Solid Waste Management Program, including educational actions.

Keywords: perception, questionnaire, selective collect, waste management.

¹ Universidade Federal Rural da Amazônia, campus Capitão Poço, Pará, Brasil.

*Autor correspondente: Universidade Federal Rural da Amazônia, campus Capitão Poço. Rua Pau Amarelo, Vila Nova, Capitão Poço, PA. 68650-000. Brasil. Email: thaisa.pegoraro@ufra.edu.br

Resumo

Nuestro objetivo fue realizar un diagnóstico de los residuos sólidos (RS) producidos en un pequeño *campus* de la Universidad Federal Rural de la Amazonia, ubicado en Capitão Poço, Estado de Pará, región de la Amazonia Oriental. También evaluamos la percepción ambiental de los estudiantes de graduación para apoyar la práctica de herramientas de educación ambiental y fomentar el destino adecuado de los RS. Recolectamos quincenalmente y analizamos la composición de RS de todos los residuos producidos en la institución al final de un día. También evaluamos la percepción ambiental de 198 estudiantes a través de la aplicación de un cuestionario. Los resultados mostraron que el *campus* produjo un promedio de 431.8 kg mes⁻¹ y 21.59 kg día⁻¹ de RS. La mayor parte tiene potencial reciclable (73.7%), como residuos orgánicos (29%), papel (24%) y plástico (17%). El análisis de los cuestionarios mostró que el 58% de los estudiantes desconocen la política de las 5R y solo el 4% separa los residuos en la fuente en los hogares. Sin embargo, más del 70% apoyaría acciones ambientales en la universidad. Los estudiantes de Ciencias Biológicas tuvieron una percepción más comprometida, debido a la influencia de los componentes curriculares y proyectos desarrollados durante la graduación. La institución tiene potencial para gestionar adecuadamente sus residuos, además de implementar políticas eficientes de gestión de residuos sólidos. La solución puede venir a través de la implementación de un Programa de Gestión de Residuos Sólidos, que incluya acciones educativas.

Palavras-chave: percepción, cuestionario, coleta seletiva, gestión de residuos.

Introdução

Estima-se que são gerados mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no mundo todo anualmente (UNEP, 2024). No Brasil, foram 77.1 milhões de toneladas no ano de 2022, dos quais 93% foram coletados. O quantitativo geral nacional corresponde a mais de 211 mil toneladas por dia ou 380 kg/habitante/ano (ABREMA, 2023). A técnica mais utilizada para disposição final dos resíduos sólidos (RS), no Brasil, é o aterro sanitário (61%), porém, 39% ainda são destinados para áreas de disposição inadequada, como lixões à céu aberto ou aterros controlados (ABREMA, 2023). Na região Norte do país, 63.4% dos RS são destinados a lixões, um problema ambiental de alta relevância, pois, aliados a fatores como alta taxa pluviométrica e alta temperatura, causam transtorno e consequências negativas à sociedade e ao meio ambiente (ABREMA, 2023; Duraes, 2016; Silva, 2018; Tavares *et al.*, 2023). Em relação à coleta seletiva porta a porta dos RSU, 14.7% dos habitantes são atendidos no Brasil, de modo que na região Norte esse percentual atinge apenas 2% (ABREMA, 2023).

Por meio da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), foram definidas diretrizes de gestão no gerenciamento de RS, a responsabilidade dos geradores e do poder público, o fechamento dos lixões, a importância da coleta seletiva e da educação ambiental como ferramentas de gerenciamento, além do estabelecimento de mecanismos econômicos para o incentivo à adequada gestão dos RS (Brasil, 2010). O gerenciamento de RS é um conjunto de procedimentos de planejamento, implementação e gestão para reduzir a geração, prover a coleta, armazenamento e tratamento adequado dos

resíduos gerados (Brasil, 2010). Uma importante etapa que contribui para o planejamento das atividades de gerenciamento e gestão de RS é realizar a caracterização dos resíduos, o que pode ser realizado por meio da análise gravimétrica (Assis e Santos, 2020). Essa medida deve ser adotada como pontapé inicial nas políticas de gestão de RS, a fim de avaliar o potencial de aproveitamento daquilo que é gerado, além de permitir inferir, por exemplo, sobre as instalações de estruturas adequadas para o armazenamento e ferramentas apropriadas para o tratamento e destino adequado dos RS (Lima e Firkowski, 2019).

Por meio da caracterização dos RS, diversos trabalhos (Vega *et al.*, 2008; Duraes, 2016; Assis e Santos, 2020) indicam que uma parcela expressiva do que é gerado nas instituições de ensino superior (IES) são recicláveis, por se tratar de resíduos provenientes de atividades voltadas para o ensino e a administração, como o papel (Assis e Santos, 2020). Em instituições ligadas ao Governo Federal, o Decreto nº 10.936 de 2022, exige a separação dos RS recicláveis e a destinação prioritária para associações ou cooperativas (Brasil, 2022) o quê, além de fortalecer o setor, promove melhorias na qualidade de vida dos catadores. O trabalho de Lima e Firkowski (2019) indicou que, de um universo de 64 universidades públicas brasileiras, 71% realizam a coleta seletiva e, portanto, estão em conformidade com o decreto.

Por possuírem grandes áreas, atividades diversas e um número elevado de pessoas, as IES são comparadas a pequenos centros urbanos (Lima e Firkowski, 2019; Tauchen e Brandli, 2006; Vega *et al.*, 2008), além de possuírem significativa diversidade sociocultural, ambiental e econômica, que influenciam diretamente nos RS gerados (Eustáquio *et al.*, 2017). Segundo Gomes (2009), as universidades são pólos de ensino que formam indivíduos atuantes nas decisões da comunidade e, atribui-se também a essas instituições o desenvolvimento de ações de cunho sustentável, com o objetivo de engajar o indivíduo nas questões que envolvem o meio ambiente (Gonçalves *et al.*, 2010; Mesquita *et al.*, 2011). Devem ser discutidas, portanto, de forma transversais, políticas sobre os RS, considerando que a produção de resíduo é constante e o debate do tema no ambiente acadêmico desperta atitudes e responsabilidades na formação dos indivíduos (Souza *et al.*, 2012).

A Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) é uma IES situada na região da Amazônia Oriental, que possui cinco *campi* no interior do estado do Pará, dentre os quais um é localizado no município de Capitão Poço. Esse *campus* foi institucionalizado em 2006, oferece cinco cursos superiores e, até o momento, não houve registro no repositório institucional sobre estudos envolvendo a caracterização dos RS gerados pela comunidade acadêmica.

O objetivo desse estudo foi realizar a análise gravimétrica dos RS gerados na UFRA de Capitão Poço, localizada na região da Amazônia Oriental, além de compreender a percepção dos discentes sobre a temática, a fim de dar suporte à implantação de planos e ações voltados à gestão de resíduos no *campus*.

Metodologia

Área de Estudo

O estudo foi realizado na Universidade Federal Rural da Amazônia, *campus* Capitão Poço, situado a nordeste do estado do Pará, região denominada como Amazônia Oriental. De acordo com informações atuais da secretaria da IES, o *campus* é formado por 54 docentes, 22 técnicos administrativos, 28 funcionários terceirizados e 655 discentes. Possui cinco principais blocos (Figura 1), 16 banheiros, 13 salas de aula, 10 laboratórios, duas lanchonetes, três salas administrativas, 22 salas de servidores, centros acadêmicos, quadra de esportes, estufas de vegetação, um auditório, uma biblioteca, um xerox, totalizando uma área de 23.5 ha (Figura 1).

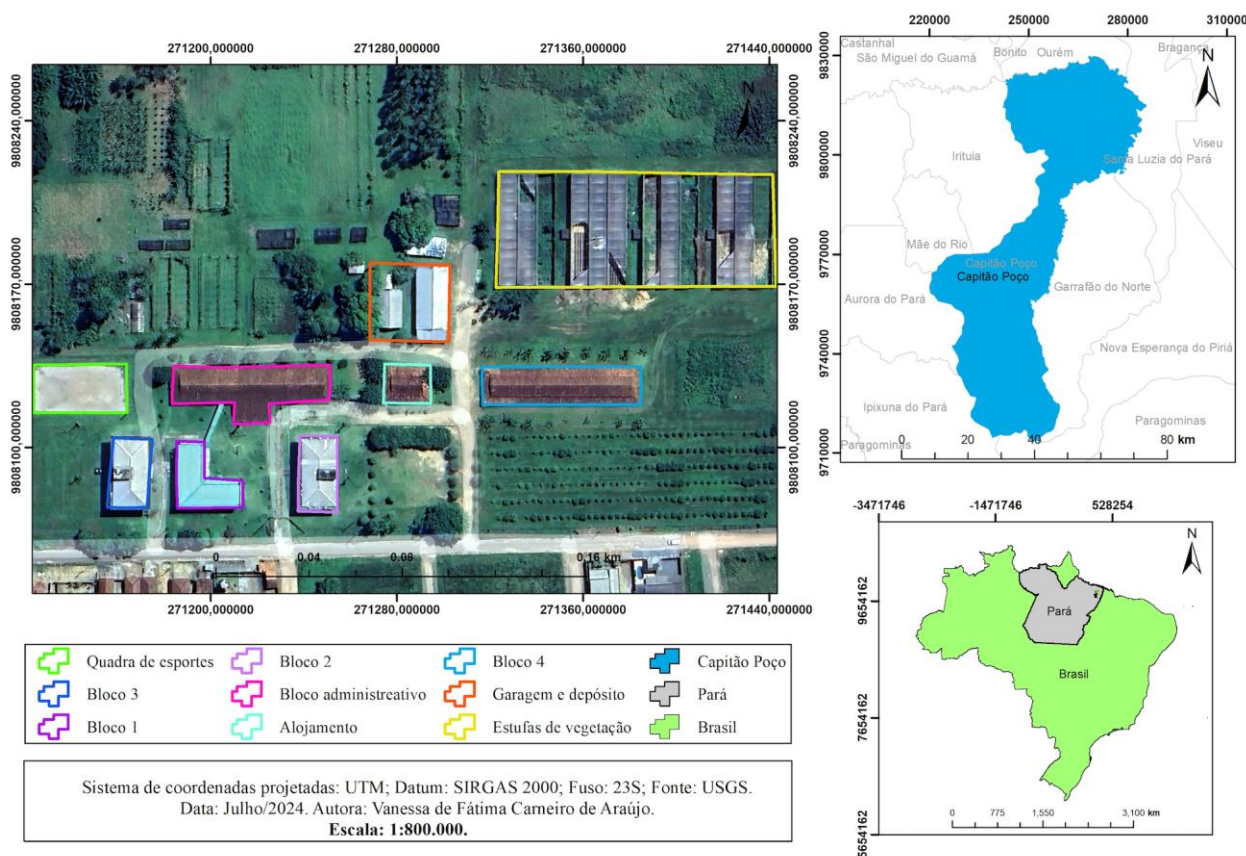


Figura 1. Mapa da localização e identificação das estruturas físicas da Universidade Federal Rural da Amazônia, *campus* Capitão Poço, instituição onde o estudo foi realizado. Fonte: Elaboração própria.

Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos

O estudo foi desenvolvido entre os meses de janeiro e agosto de 2019, exceto em março devido ao recesso da instituição. Foram realizadas duas coletas, uma no início e outra na metade do mês, em dias da semana alternados (de segunda a sexta) ao longo de sete meses, totalizando 14 coletas. Não foram realizadas coletas após eventos, para não interferir no quantitativo habitual de resíduos produzidos. Para a amostragem, os RS gerados nos principais blocos da IES (Bloco 1, Bloco 2, Bloco 3 e Bloco Administrativo) foram coletados com auxílio da equipe de limpeza da IES. Ao término do dia, os RS foram identificados, pesados e separados nas categorias de papel, plástico, metal, vidro, orgânico, laboratório, rejeito e outros (Tabela 1).

Tabela 1. Categorias de RS analisados durante o período da pesquisa na IES. Fonte: Elaboração própria

Categorias	Tipos de resíduos encontrados
Papel	Papel, papelão, jornal, revista
Plástico	Palitos de pirulito, embalagem de pipoca, sacola plástica, caixa de arquivo, embalagem de absorvente, embalagem de bombom, tela de plástico, garrafa PET, embalagem de soro e embalagem de bolo
Metal	Lata de ervilha, sombrinha, lata de refrigerante, embalagem de aerossol
Vidro	Copo de vidro
Orgânico	Folhas, restos de frutas, filtro de café, guardanapo sujo, óleo de cozinha, restos de legumes
Laboratório	Luvas usadas, material perfurocortante e carcaça de animais
Rejeito	Papel higiênico, absorvente, papel molhado
Outros	Isopor, solo, palito de picolé, tecido, lápis, embalagem longa vida, gases, marmitex, madeira, balão de aniversário, fita adesivas, lajota, embalagem de inseticida, embalagem laminada, cigarro, fertilizante, lâmpadas, pilha, disjuntor

Dessa forma, 100% dos resíduos gerados ao término de um dia na IES foram analisados e a média foi calculada baseando-se nas 14 coletas realizadas. Os valores produzidos no mês foram calculados a partir da média diária multiplicada por 20 dias, considerados a média de dias úteis do mês em que a instituição está em pleno funcionamento. Os valores produzidos ao ano foram calculados a partir da média mensal multiplicada por 12 meses.

Na categoria "outros" foram incluídos RS gerados esporadicamente e em baixa quantidade, não sendo passíveis de pesagem e quantificação na balança. Foram também considerados nessa categoria os materiais que não são coletados e/ou reciclados na região, como isopor, pilha e lâmpadas.

Para a aferição da massa de resíduos, foi utilizada balança analítica, modelo IDR 7,500 ABS – DP30, marca Ramuza, uma lona preta de 4x4 metros, sacos de lixos de 50 a 200 L, papel A4, cartolinas, câmera fotográfica, luvas e máscaras. Vale ressaltar que não há na IES a presença de um restaurante universitário (RU) e um programa de coleta seletiva.

Aplicação do questionário para os discentes da IES

Para avaliar e comparar a percepção ambiental sobre RS dos acadêmicos da IES, foram aplicados 198 questionários semiestruturados (com perguntas fechadas), no formato impresso, composto por nove perguntas acerca de temas como conhecimento sobre a política dos 5Rs, a disposição dos RS nas residências e na IES, a definição de coleta seletiva, se os estudantes consideram haver lixeiras suficientes no *campus* e se se apoiariam iniciativas voltadas para a gestão de RS no ambiente acadêmico.

Os questionários foram aplicados para discentes de seis turmas dos cursos de Agronomia (A1 e A2), Ciências Biológicas (B1 e B2) e Engenharia Florestal (E1 e E2), matriculados no primeiro (1º) e no último (8º) semestres (Tabela 2), designados como turmas ingressantes e concluintes, respectivamente. Esses cursos foram escolhidos pelo fato de serem ofertados durante o dia (matutino e vespertino) e as turmas ingressantes e concluintes foram escolhidas com o objetivo de se realizar uma análise da interferência do curso na percepção dos discentes.

Tabela 2. População e amostra de discentes de graduação envolvidos na pesquisa, identificados por curso e ano de ingresso. Fonte: Elaboração própria

Curso/Semestre	Identificação	População total (a)	Amostra entrevistada absoluta (b)	Amostra entrevistada (b/a) (%)	Amostra entrevistada relativa (%)
Agronomia/8º	A1	32	23	71.9	12.5
Agronomia/1º	A2	54	40	74.1	21.1
Ciências Biológicas/8º	B1	35	29	82.9	13.7
Ciências Biológicas/1º	B2	52	45	86.5	20.3
Engenharia Florestal/8º	F1	30	24	80.0	11.7
Engenharia Florestal/1º	F2	53	37	69.8	20.7
Total/Média		256	198	77.5	100

Tipo da Pesquisa e Análise dos Dados

O estudo envolveu análise qualitativa e quantitativa. A primeira é realizada em dados que não são determinantes, mas são passíveis de interpretação. A análise quantitativa é a identificação, ordenação, classificação, análise e correlação dos resultados, resultando em números, traduzidos em estatística, gráficos e/ou tabelas (Richardson *et al.*, 2008; Dias *et al.*, 2017). Os dados foram tabulados e analisados por meio de estatística descritiva: os dados de composição gravimétrica foram apresentados por meio de média e desvio padrão; as respostas dos questionários foram agrupadas por categorias/respostas semelhantes e os dados foram apresentados por meio de média. Os gráficos e tabelas foram realizados no programa Microsoft Office Excel.

Resultados e discussão

Quantidade de Resíduos e Composição Gravimétrica

A quantidade total de RS produzidos na IES foi, em média, 431.8 kg mês⁻¹ ou 21.59 kg dia⁻¹. Houve maior quantidade de resíduos produzidos pela IES nos meses de junho e julho (Figura 2A), o que pode estar relacionado à época de verão ou aos meses menos chuvosos na região da Amazônia e que há, portanto, maior circulação de pessoas. A pluviosidade média mensal dos meses de janeiro a maio, no município de Capitão Poço, é de 339.8 mm e a média nos meses de junho e julho chega a 145.35 mm (Pacheco; Bastos, 2002). A maior incidência pluviométrica pode reduzir a quantidade de discentes que estão presentes no *campus* e até mesmo o deslocamento até as cantinas impactando, conseqüentemente, o consumo de alimentos e a geração de resíduos.

A quantidade de RS produzidos na IES separados em reciclável, orgânico e rejeito é indicado na Tabela 3.

A produção de RS inorgânico e orgânico, foi, praticamente, três vezes superior (74.2%) à produção de rejeito (25.8%). A maior parte da massa dos resíduos produzidos na IES, portanto, corresponde a materiais que podem ser reciclados e/ou reutilizados, de modo que o descarte e a disposição final sem tratamento não são métodos adequados para esses materiais (Assis e Santos, 2020). O resultado do presente estudo é comparável ao encontrado em outras IES. Duraes (2016), no *campus* da faculdade UNB de Planaltina, que possui 30 hectares e uma população acadêmica de 1,602 indivíduos, verificou que os resíduos recicláveis tiveram um total de 85.96%. Thode *et al.* (2014) revelaram que o resíduo orgânico representou 28.36% do total gerado por outra IES.

Assis e Santos (2020) também observaram o papel como o segundo material mais abundante em uma escola pública em Santarém, PA, correspondendo a 29.4% do peso total, cuja produção é justificada pelo desenvolvimento de atividades técnico-pedagógico-administrativas. O papel representou, nos estudos de Duraes (2016), um total de 33.44% dos resíduos gerados. No estudo realizado por Vega *et al.* 2(008), verificou-se que a classe do papel foi a mais produzida na instituição, chegando a 33%. Incentivar o uso da comunicação via e-mail é uma alternativa que

poupa geração de papeis e resíduos (Lima e Firkowski, 2019). Porém, segundo informações da direção, o uso do e-mail nos procedimentos e comunicações oficiais foi adotado desde 2019 e, mesmo assim, o papel ainda é o resíduo mais produzido principalmente pelos setores administrativos e secretaria acadêmica.

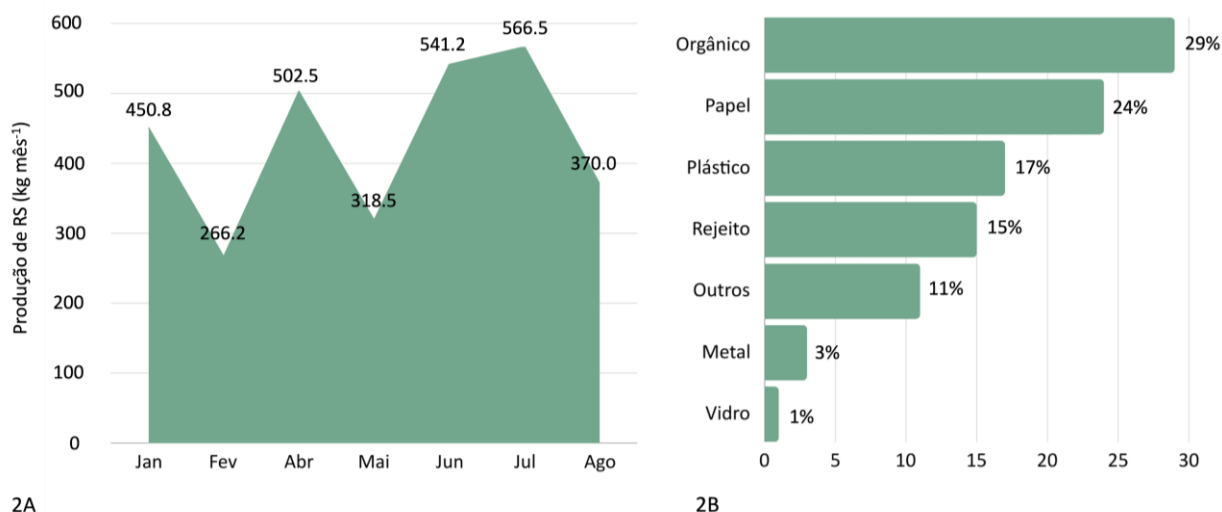


Figura 2. Produção mensal de RS produzidos durante a realização da pesquisa (kg mês^{-1}) (2A) e percentual de RS gerados na IES separados por tipo de material (2B). Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3. Média diária, mensal e anual \pm desvio padrão (kg) de RS gerados na IES divididos entre reciclável, não reciclável e rejeito e outros. Fonte: Elaboração própria

Categoria	Diária (kg)	Mensal (kg)	Anual (kg)	Percentual (%)
Inorgânico Seco (reciclável)	9.71 \pm 1,21	194.2 \pm 24,3	2,330 \pm 291.5	45.1
Orgânico	6.27 \pm 3,35	125.3 \pm 67,0	1,504 \pm 804.0	29.1
Rejeito e Outros	5.62 \pm 2,00	112.4 \pm 39,9	1,348 \pm 479.3	25.8
Total	21.59	431.8	5,182	100.0

A classe do plástico representou 17% dos RS totais produzidos na IES, sendo as sacolas plásticas e embalagens de alimentos os tipos mais gerados. A quantidade de plástico produzida no *campus* pode ser explicada pelo consumo considerável de água e refrigerantes em garrafas plásticas, além de copos descartáveis por discentes e funcionários.

Na categoria "outros" foram considerados os resíduos que não se enquadravam nas demais categorias e, portanto, o volume total foi considerável, chegando a 11%. Esses resíduos poderiam ser equiparados a classe "rejeitos" (15%), considerando que fazem parte dessa categoria aqueles materiais que não apresentam outra possibilidade senão a disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). Diferente do que ocorre em outras localidades, não há, na região de estudo, destino e reciclagem para materiais como lâmpadas, isopor, pilhas, baterias, embalagens longa vida, gerando um grande desafio, que é encontrar entidades para comprar os materiais recolhidos, considerando que é possível reciclar apenas itens que há mercado (Moreira *et al.*, 2019).

No estudo de Bresolin *et al.* (2014), verificou-se que no *campus* de Medianeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), a categoria dos rejeitos apresentou 6.40% do total, um percentual relativamente baixo se comparado ao total encontrado no presente estudo. Apesar do *campus* da UTFPR apresentar, na época do estudo, um quantitativo de discentes três vezes superior ao da IES em estudo, essa divergência pode ser explicada pela existência de coleta seletiva da UTFPR, já que parte do que é descartado se transforma em rejeito devido à mistura com outros materiais sujos ou molhados, o que inviabiliza parcialmente a reciclagem. Nesse sentido, é possível inferir que a implantação de um sistema de coleta seletiva na IES em estudo aumentaria o quantitativo de resíduos recicláveis e diminuiria o percentual de rejeitos, por melhorar a qualidade do material arrecadado (Tavares *et al.*, 2023).

O total de RS produzidos na IES de estudo foi separado entre os cinco blocos da instituição, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Média \pm desvio padrão dos RS gerados na IES separados por tipo e analisados por diferentes prédios em kg mês⁻¹. Fonte: Elaboração própria

Tipos de resíduos	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco Adm	Total
	kg mês ⁻¹				
Orgânico	24.59 \pm 31.89	12.05 \pm 12.64	34.32 \pm 52.12	54.36 \pm 27.66	125.32 \pm 66.98
Papel	27.24 \pm 27.35	10.38 \pm 9.69	18.03 \pm 8.02	46.93 \pm 28.23	102.58 \pm 25.02
Plástico	12.29 \pm 6.18	10.00 \pm 6.29	15.40 \pm 7.28	38.06 \pm 12.28	75.75 \pm 23.59
Rejeito	18.69 \pm 10.21	21.03 \pm 14.03	25.51 \pm 14.58	11.65 \pm 8.97	76.88 \pm 32.53
Outros	18.76 \pm 19.70	4.96 \pm 4.98	3.94 \pm 3.04	6.91 \pm 4.82	34.57 \pm 23.53
Metal	3.76 \pm 3.13	0.83 \pm 1.12	0.62 \pm 0.67	7.52 \pm 3.73	12.73 \pm 6.15
Vidro	-	-	-	3.07 \pm 4.69	3.07 \pm 4.69
Laboratório	0.90 \pm 2.25	-	-	-	0.90 \pm 2.25
TOTAL (kg mês ⁻¹)	106.23 \pm 74.63	59.25 \pm 20.93	97.82 \pm 61.70	168.50 \pm 53.34	431.80
TOTAL (%)	24.60	13.72	22.65	39.02	100.00

O bloco da IES que mais gerou resíduo foi o Bloco Administrativo (39.4%), que contém sala de professores, sala da gestão do *campus* (direção e gerência administrativa), laboratórios e cantina. É o principal bloco da instituição pois recebe maior circulação de pessoas, além de dar acesso aos demais ambientes. Esses fatores podem explicar a maior geração de RS em relação aos demais blocos e pode justificar a implantação de mais lixeiras de coletas seletivas neste ambiente. Os resíduos orgânicos foram gerados em maior quantidade nos Blocos 3 e o Administrativo, provavelmente por haver maior quantidade de salas de aula (seis) e duas cantinas, respectivamente. Destaca-se, no Bloco Administrativo, a maior produção de metal, se comparado aos outros blocos, caracterizado principalmente por latas de refrigerante e de comidas industrializadas.

No que diz respeito aos resíduos de laboratório, observou-se uma média de produção de 0.9 kg mês⁻¹ ou 10.8 kg ano⁻¹. Foi observado que as lixeiras dos laboratórios apresentaram essencialmente resíduos equiparáveis aos domésticos, como papéis e rejeitos. Isso se deve pelo fato de alguns laboratórios do *campus* terem vocação sobretudo para a área das ciências agrárias e produzirem essencialmente resíduos como solo, substrato e material vegetal, que acabam sendo armazenados nos ambientes por um longo período. Além disso, conforme relato da técnica de laboratório da área da química do *campus*, observou-se que as sobras de reagentes são manejados diretamente nos ambientes em que são gerados, por meio de reações químicas, acarretando na não geração de resíduos químicos perigosos. Por outro lado, não foi relatada pela gerência do *campus* qualquer destino para os resíduos de laboratório encontrados, como luvas, material perfurocortante e carcaça de animais.

Foi possível observar também que os conjuntos de lixeiras coloridas de materiais recicláveis não são utilizados de forma adequada pela comunidade acadêmica, considerando que em 86% das triagens realizadas, mais de uma categoria de resíduo foi encontrada em uma mesma lixeira. Em 16% das triagens, o RS descartado na lixeira de coleta seletiva foi condizendo com a respectiva categoria/cor.

A partir desse estudo realizado, salienta-se que é válido incluir no Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) da IES em estudo a informação de que a maioria dos RS que é produzida no *campus* tem potencial reciclável. Como metas táticas a serem estabelecidas no PGRS, sugere-se que os resíduos orgânicos (29%) sejam encaminhados para uma estrutura de compostagem na própria instituição e reaproveitados na forma de substrato e/ou adubo, podendo ser objeto de projetos de pesquisa e/ou extensão dos cursos das Ciências Agrárias e/ou Ciências Biológicas. Sugere-se que o papel, o plástico e o metal sejam destinados aos catadores de materiais recicláveis, sendo a IES um ponto de coleta e separação, como é realizado em outras universidades (Moreira *et al.*, 2019; Melo *et al.*, 2023). No município de estudo, não há empresas que realizam a reciclagem desses materiais, porém, segundo informações de catadores, eles são

vendidos para atravessadores que os destinam a municípios vizinhos. Ainda, a implantação gradativa e planejada de um programa de coleta seletiva é primordial e torna a IES ponto de referência para o município, além de estar alinhada com a legislação. Para os resíduos de laboratório, é urgente que uma empresa seja contratada pelo *campus* sede para prover o tratamento adequado, mesmo que sejam produzidos em menor escala. Sugere-se, dessa forma, que sejam criados planos e programas, metas e ações para adequação à PNRS e ao Decreto 10.936 de 2022 (Brasil, 2010; Brasil, 2022), de modo a reduzir o transbordo na área de disposição dos RS do município.

Percepção dos discentes da IES sobre Resíduos Sólidos

Dentre os discentes entrevistados, 58% eram do sexo feminino e 42% do sexo masculino. A faixa etária variou, principalmente, entre 19 e 25 anos (67%). Quando questionados se já ouviram falar sobre a política dos 5Rs, a maioria dos discentes (58%) respondeu de forma negativa. Medeiros *et al.* (2011) entendem que a não compreensão sobre a política dos 5Rs pode estar relacionada à falta de convivência com a temática e por falta de políticas ambientais locais. Em relação aos que ouviram falar sobre os 5Rs, o percentual de discentes dos cursos de Ciência Biológicas (45.6%) e de Engenharia Florestal (51.4%) foi superior aos de Agronomia (26.2%), o que pode ser explicado à oferta de disciplinas letivas e eletivas na grade curricular dos dois primeiros cursos, como Educação Ambiental, Ecologia Básica, Poluição e Legislação ambiental, Avaliação de Impacto ambiental, Gestão Ambiental, Manejo de Recursos Naturais, etc., além da participação em projetos envolvendo a temática. Segundo Alkmim (2015), é importante que haja debate sobre a política dos 5Rs nas IES, pois são locais que formam indivíduos para as mais diversas áreas de conhecimento. Cabe destacar que, atualmente, na prática, a gama de conceitos dos Rs aumentou para 7, 10 ou até 12 Rs, porém, muito antes de inserir novos Rs à lista, é importante alinhar a prática à teoria (Mendes e Chagas, 2023). Sobre a separação dos RS em reciclável e não reciclável, o percentual de discentes que não fazem a separação nas residências está entre 40 a 60%, dependendo da turma (Figura 3).

O estudo de Ostrovski e Ostrovski (2015) verificou que 57% dos estudantes do *campus* de Medianeira da Universidade Tecnologia Federal do Paraná (UTFPR) não realiza a separação dos RS. Para os autores, as justificativas variam entre a falta de hábito, tempo e incentivos públicos. O estudo de Oliveira *et al.* (2015) observou que 50% dos entrevistados nunca separaram os resíduos, 29% separam e 21% separam às vezes. Os autores relatam a mudança de moradia, falta de coleta seletiva no município, resistência dos outros membros da família e pontos de coleta distantes das residências como justificativa para a falta do hábito. A não separação dos RS nas residências pelos discentes no presente estudo pode estar relacionado aos motivos apresentados pelos autores supracitados, especialmente, a ausência de educação ambiental e uma coleta seletiva local, pois o município é carente de políticas de gestão de resíduos e apresenta um lixão à céu aberto como área de destinação dos RS.

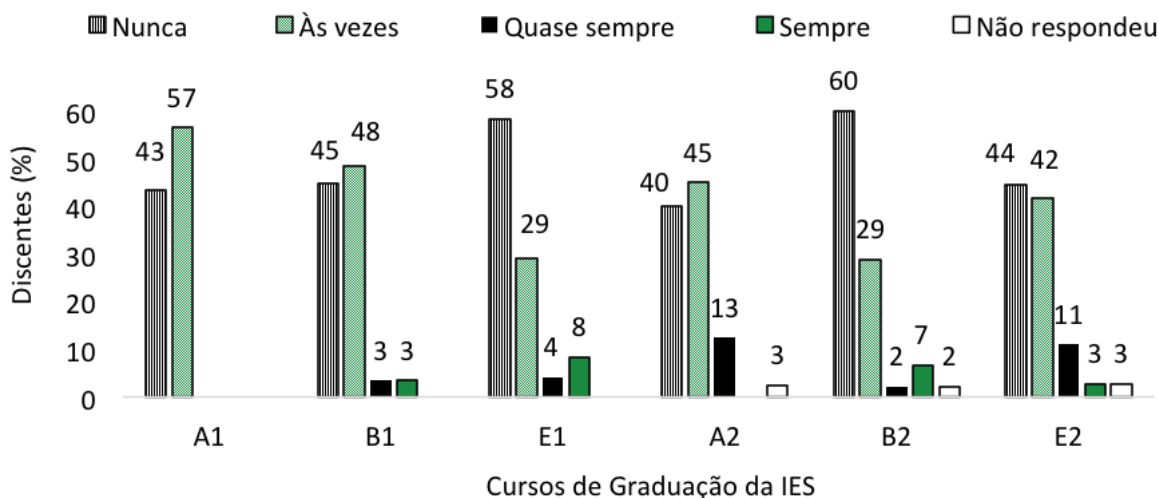


Figura 3. Discentes da IES que fazem a separação de resíduo em casa em reciclável e não reciclável. Fonte: Elaboração própria. A1: Agronomia concluintes (8^o); A2: Agronomia ingressantes (1^o); B1: Ciências Biológicas concluintes (8^o); B2: Ciências Biológicas ingressantes (1^o); E1: Engenharia Florestal concluintes (8^o); E2: Engenharia Florestal ingressantes (1^o).

O percentual de discentes que às vezes e/ou sempre separa os resíduos em casa são superiores nas turmas concluintes, o que pode estar relacionado, mais uma vez, à trajetória acadêmica por meio de disciplinas e projetos, corroborando com Ostrovski e Ostrovski (2015) que afirmam que a relação de ensino e aprendizagem tem impacto direto nas ações dos indivíduos em relação aos resíduos, o que indica a necessidade de um contínuo debate sobre esse assunto nas diferentes turmas e cursos da instituição. A Tabela 5 indica a destinação dos RS gerados nas residências dos discentes entrevistados.

Tabela 5. Respostas dos discentes da IES (%) sobre a destinação dos RS gerados nas próprias residências. Fonte: Elaboração própria

Respostas (%)	A1	A2	B1	B2	E1	E2	Total
Prefeitura	82.61	80.00	82.76	76.19	58.33	65.71	82.44
Prefeitura e compostagem	4.35	-	13.79	7.14	-	2.86	4.54
Prefeitura e queimado	-	-	-	-	-	14.29	2.89
Coleta seletiva	4.35	-	-	4.76	8.33	5.71	4.08
Apenas compostagem	-	-	-	-	4.76	2.86	1.16
Disponho em terreno baldio	-	-	-	2.38	20.83	-	3.32
Não sei	4.35	-	-	-	8.33	-	1.59

A1: Agronomia concluintes (8^o); A2: Agronomia ingressantes (1^o); B1: Ciências Biológicas concluintes (8^o); B2: Ciências Biológicas ingressantes (1^o); E1: Engenharia Florestal concluintes (8^o); E2: Engenharia Florestal ingressantes (1^o).

Há uma parcela de discentes, especificamente dos cursos de Ciências Biológicas e Engenharia Florestal, que responderam encaminhar os resíduos para compostagem, corroborando com a parcela daqueles que citaram às vezes fazer a separação dos resíduos domésticos. Parte dos discentes, porém, ainda destina os RS para a queima (2.89%) e em terrenos baldios (3.32%). A queima de resíduos domésticos contribui fortemente para a liberação de gases e partículas sólidas poluidoras, como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), além de dibenzo-P-dioxinas policloradas (PCDDs) e dibenzo-furanos policlorados (PCDFs) conhecidos, respectivamente, como dioxinas e furanos (Brandão Júnior *et al.*, 2018). A parcela da comunidade acadêmica que realiza a queima pode ser moradora da área rural, onde os serviços de limpeza não são satisfatórios e/ou estar arraigada à uma cultura em que a queima ainda é habitual. Entendemos que alternativas devem ser apresentadas e debatidas por meio de ações de sensibilização.

Quando questionados sobre a disposição final dos RS gerados no *campus*, 59% dos entrevistados responderam ser destinado a aterro (controlado ou sanitário) e 23% não respondeu ou não sabe, totalizando 82% que desconhecem a realidade do *campus* e do município. Apenas 15% demonstraram conhecimento quanto ao destino de RS a um lixão à céu aberto (Tavares *et al.*, 2023). Para Oliveira *et al.* (2015), mesmo que avanços tenham sido alcançados ao longo dos anos em relação à destinação final dos RS, a ocorrência dos lixões ainda é uma prática comum em muitos municípios brasileiros. Uma parcela representativa dos discentes concluintes de Ciências Biológicas (86.2%) citaram o lixão como destino aos resíduos do município, o que pode ser explicado pelo fato de terem realizado visita técnica e/ou participado de ações na área de disposição, indicando que a vivência acadêmica fortalece a percepção e a sensibilização para os problemas ambientais locais (Medeiros *et al.*, 2011).

A maior parte dos discentes (72.1%) escolheu a alternativa que mais se aproxima da definição de “coleta seletiva”, dentre as quatro diferentes opções fornecidas no questionário (Tabela 6). Apesar das turmas terem apresentado um percentual elevado de acerto no que tange o conceito de coleta seletiva, chegando a 90% entre os concluintes de Ciências Biológicas, a parcela de 16.7% optou pela opção “a”, que se refere ao serviço de coleta convencional prestado pela prefeitura. Dias *et al.* (2017) verificaram que de 10% a 20% dos discentes entrevistados da UFRA Belém não souberam responder ao conceito de coleta seletiva, o que pode ser explicado devido ao distanciamento dos discentes frente às temáticas ambientais. Uma das soluções para resolver essa questão é estimular atividades de educação ambiental (Silva *et al.*, 2015).

Tabela 6. Resposta dos discentes da IES (%) sobre o conceito de coleta seletiva. Fonte: Elaboração própria

Resposta	A1	A2	B1	B2	E1	E2	Total
	%						
Sistema de recolhimento de resíduos produzidos em residência, comércio e estabelecimentos públicos realizado pela prefeitura	13.0	15.0	3.4	17.8	25.0	25.0	16.7
Sistema de recolhimento de resíduos de acordo com sua constituição, separados na fonte geradora e encaminhado para reaproveitamento	82.6	77.5	90.0	73.3	66.6	50.0	72.1
Processo de transformação de um material em outro produto por meio da reciclagem	4.3	5.0	6.9	2.2	4.9	13.8	6.2
Não tenho certeza ou não respondeu	-	5.0	-	6.6	-	13.8	5.1

A1: Agronomia concluintes (8^o); A2: Agronomia ingressantes (1^o); B1: Ciências Biológicas concluintes (8^o); B2: Ciências Biológicas ingressantes (1^o); E1: Engenharia Florestal concluintes (8^o); E2: Engenharia Florestal ingressantes (1^o).

A falta de conhecimento sobre o assunto reflete na falta de separação dos RS nas residências e nas lixeiras coletoras próprias para coleta seletiva da instituição, considerando que durante a análise da composição gravimétrica foi comum encontrar os resíduos secos misturados com molhados comprometendo a reutilização ou a reciclagem de materiais. A porcentagem de alunos que não tiveram certeza e não responderam corretamente o conceito de coleta seletiva, estão, em sua maioria, nas turmas ingressantes.

Em relação à pergunta se havia lixeiras comuns suficientes no *campus*, isto é, para coleta convencional dos resíduos pela prefeitura (Tabela 7), foi possível observar que o questionamento dividiu opiniões, pois 42.6% da amostra respondeu "não", 30.01% responderam "sim" e 24.82% respondeu "nem sempre". O *campus* possui, em cada bloco, lixeiras de tamanho aproximado de 60 L, distribuídas nos corredores, além de lixeiras menores em salas de aula, gabinetes e laboratórios. Além dessas, há dois conjuntos de lixeiras de coleta seletiva, cada conjunto contendo quatro recipientes com cerca de 40 L cada, distribuídos no Bloco Administrativo e no Bloco 1 (Figura 4). Quando questionados acerca das lixeiras para coleta seletiva serem suficientes para atender à demanda dos RS da IES, os discentes de todas as turmas responderam que não há disponibilidade suficiente (Tabela 7). Salienta-se que as lixeiras de coleta seletiva não cumprem com o seu papel na IES, uma vez que os RS são descartados independentemente da classe e da cor da lixeira e, ao término do dia, são coletados pelo setor de limpeza e unidos aos demais resíduos produzidos no *campus* para encaminhamento ao lixão (Tavares *et al.*, 2023).

Tabela 7. Resposta dos discentes da IES (%) sobre a disponibilidade de lixeiras convencionais e lixeiras de coleta seletiva no *campus*. Fonte: Elaboração própria

Cursos	A1	A2	B1	B2	F1	F2	Total
Há lixeiras de RS suficiente no <i>campus</i>? (%)							
Sim	39.1	40.0	51.7	42.2	50.0	36.1	42.60
Não	39.1	30.0	24.1	31.1	17.0	36.1	30.01
Nem sempre	21.7	25.0	20.7	26.7	33.0	22.2	24.82
Não sei	-	2.5	-	-	-	8.3	2.06
Não respondeu	-	2.5	-	-	-	-	0.51
Há lixeiras de coleta seletiva suficiente no <i>campus</i>? (%)							
Sim	34.8	32.5	13.8	22.2	20.8	16.7	23.32
Não	30.4	45.0	65.5	44.4	37.5	38.9	44.13
Nem sempre	30.4	20.0	10.3	22.2	37.5	30.6	24.39
Não sei	-	2.5	-	11.1	4.2	13.9	6.14
Não respondeu	4.3	-	10.3	-	-	-	2.01

A1: Agronomia concluintes (8^o); A2: Agronomia ingressantes (1^o); B1: Ciências Biológicas concluintes (8^o); B2: Ciências Biológicas ingressantes (1^o); E1: Engenharia Florestal concluintes (8^o); E2: Engenharia Florestal ingressantes (1^o).



Figura 4. Lixeiras de coleta seletiva localizada na IES em estudo, UFRA Capitão Poço, PA. Fonte: Elaboração própria.

A falta de lixeiras ou a má qualidade delas podem levar os indivíduos a não separar os RS na fonte, pois, desestimula o recolhimento seletivo eficiente (Cunha, 2017). Desse modo, a quantidade de lixeiras no *campus* pode acarretar o insucesso da separação dos resíduos na IES. Outros estudos realizados indicam que há insuficiência na distribuição de lixeiras de coleta seletivas. No estudo

de Dias *et al.* (2017), a maioria dos discentes (62%) alegaram que não há disponibilidade suficiente de lixeiras no *campus* da UFRA Belém. No estudo de Cunha (2017), 85% classificaram a condição das lixeiras de coleta seletiva como péssima. Nessas IES, assim como na do presente estudo, devem ser priorizadas ações de gerenciamento de RS mais efetivas, utilizando a educação ambiental com enfoque na coleta seletiva como ferramenta de sensibilização da comunidade acadêmica. Essas intervenções irão contribuir na disseminação de um comportamento pró-ambiental, além de proporcionar maior discernimento em relação à conduta correta de fazer o descarte dos resíduos (Cunha, 2017).

Quando questionados se apoiariam as iniciativas voltadas para a gestão de RS produzidos no *campus*, 71% dos discentes respondeu positivamente, chegando ao percentual de 97.75 e 70% dentre os discentes dos cursos de Ciências Biológicas, Engenharia Florestal e Agronomia, respectivamente. Uma parcela expressiva apresentou-se duvidosa, respondendo "às vezes" (9.12%) ou "não sei" (17.6%), provavelmente devido à falta de tempo, de interesse e de proatividade com o tema. O apoio a políticas de gestão de RS está em maior porcentagem nas turmas de Ciências Biológicas, isso se deve, mais uma vez, ao enfoque do curso, que apresenta uma vertente ecológica e ambiental. O percentual dos discentes que não sabe se apoiaria as ações de gestão de RS é superior nas turmas ingressantes, o que pode ser justificado pelo menor tempo de vivência acadêmica, já que o processo de construção da gestão de RS em IES é complexo e exige esforço e tempo da comunidade acadêmica (Almeida, 2018). Para Dias *et al.* (2017), o apoio da comunidade pode ser superior se a instituição implantar políticas de gestão associadas à educação ambiental.

Os dados sobre a percepção dos discentes foram importantes para corroborar com a discussão sobre o papel das universidades na disseminação de conhecimentos sobre o assunto, considerando que a natureza do curso de graduação repercutiu no entendimento sobre a problemática dos RS pelos discentes. Entendemos, portanto, que a gestão dos RS nas IES não deve se limitar aos aspectos legislativos e tecnológicos, mas também a processos educativos que irão provocar reflexões críticas e formar indivíduos conscientes e responsáveis em relação à geração de seus RS (Alkmim, 2015; Jacobucci e Jacobucci, 2007) e, conseqüentemente, auxiliarão na consolidação e no sucesso das ferramentas e ações de gestão dos RS adotadas pela IES.

Conclusão

Esse estudo revelou que em um *campus* universitário localizado no nordeste paraense, houve produção de RS recicláveis em maior quantidade em relação aos não recicláveis, indicando a possibilidade da implantação de coleta seletiva. Os RS mais produzidos foram os orgânicos, seguido de rejeito, papel e plástico. Vale destacar que à classe rejeito foram incluídos resíduos que não são passíveis de coleta e reciclagem na região. Os blocos que mais produzem RS estão

relacionados aos locais em que há maior circulação de pessoas e mais salas de aulas. São nesses pontos que sugerimos, principalmente, a implantação de lixeiras para separação dos RS na fonte. A fim de obter sucesso em programas de coleta seletiva, é necessário, porém, trabalhar em campanhas de sensibilização e educação ambiental no *campus*, dada a percepção restrita apresentada por parte dos entrevistados. As turmas de concluintes e os discentes do curso de Ciências Biológicas apresentaram uma percepção mais condizente com a realidade apresentada, no que tange o gerenciamento de RS do município, além de um melhor domínio de conceitos e atitudes relacionados à temática dos RS, como prover um destino adequado aos resíduos em maiores percentuais.

As informações apresentadas neste estudo são importantes para dar suporte à implementação de um programa de coleta seletiva, de um PGRS e de projetos de educação ambiental no *campus*. Entendemos que é urgente a adoção de políticas de gestão de RS em universidades e que, para que essas se tornem exitosas, é essencial que o município também se adeque às políticas estaduais e federais, considerando que a simples destinação de resíduos como lâmpadas, pilhas, baterias, vidro e isopor é inadequada na região. Além disso, a educação ambiental deve se revelar constante no processo educativo, como um fator imprescindível na melhoria da percepção ambiental e no gerenciamento adequado e sustentável dos RS das universidades.

Referências bibliográficas

- ABREMA, Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. Abrema, 2023. Acesso em 23 nov. 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama>
- Alkmim, E.B. (2015) *Conscientização ambiental e a percepção da comunidade sobre a coleta seletiva na cidade universitária da UFRJ*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- UNEP, United Nations Environment Programme (2024) *Global Waste Management Outlook: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource*. Nairobi, 2024. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- Assis, E.C. de S., Santos, J.N. (2020) Estudo da composição gravimétrica dos resíduos sólidos de uma escola pública do município de Santarém-PA. *Revista Monografias Ambientais*, **19**(19), 1-21. <https://doi.org/10.5902/236130845256>
- Almeida, J.A. (2018) Gestão de resíduos sólidos em instituições de ensino: experiências internacionais, nacionais e no município de Belo Jardim/PE. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **7**(1), p. 467-485. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e12018467-485>
- Brandão Júnior, E.L., Bernardo, G.P., Bernardo, L.P., Nascimento, S.I.B., Lima, B.F.R., Silva, K.V.C.C., Cavalcante, G.M.E., Rulim, A.L.L., Duarte, J.O. (2018) Queima inadequada de resíduos sólidos domésticos, principais gases tóxicos e manifestações clínicas: uma revisão de literatura. *Revista Multidisciplinar e de Psicologia*, **12**(42), 602-612. <https://doi.org/10.14295/idonline.v12i42.1356>
- Brasil (2010) *Lei 12.035, de 2 de agosto de 2010*, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- Brasil (2022) *Decreto 10.936 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.

- Bresolin, A.C., Durks, A.F., Pietrobon, J. (2014) *Caracterização dos Resíduos Gerados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira*. Trabalho de Conclusão do Curso, Tecnologia em Gestão Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Cunha, M.A.T. (2017) *Análise da coleta seletiva dos resíduos sólidos do IFRN campus Natal, zona norte*. Trabalho de Conclusão de Curso, Técnico em Comércio, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia.
- Dias, G.F.M., Oliveira, T.T.G.T., Ferreira, G.R.B., Pantoja, M.A.L., Campos, P.S.S. (2017) Percepção ambiental: estudo de caso sobre coleta seletiva na comunidade acadêmica da Universidade Federal Rural da Amazônia. *Revista Enciclopédia Biosfera*, **14**(26); 1269. Acesso em 04 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/795>.
- Duraes, P.H.V. (2016) *Diagnóstico dos resíduos sólidos gerados no campus da UNB de Planaltina/DF*. Trabalho de Conclusão de Curso, Gestão Ambiental, Faculdade de Planaltina, Universidade de Brasília.
- Eustáquio, L.A., Souza, V.F., Frias, D.F.R. (2017) *Universidade Sustentável: Coleta Seletiva*. Guia de coleta seletiva para universidades. Universidade Brasil, Universidade Federal de Uberlândia, Fernandópolis, 19pp.
- Gomes, P.C.G. (2009) *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da PUC/Rio*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica.
- Gonçalves, M.S., Kummer, L., Sejas, M.I., Rauen, T.G., Bravo, C.E.C. (2010) Gerenciamento de resíduos sólidos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus Francisco Beltrão*. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, **3**(15), 26-40. Acesso em 03 de janeiro de 2024. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/396
- Jacobucci, D.F.C. e Jacobuci, G.B. (2007) Coleta seletiva de resíduos sólidos em *campi* universitário: uma mistura de cestos, sacos coloridos, sucesso e fracasso. *Educação Ambiental em Ação*, **21**(85), s/p. Acesso em 04 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=537>
- Lima, J.R., Firkowski, O.L.C.F. (2019) Universidades brasileiras e seus planos de coleta seletiva. *Acta Brasiliensis*, **3**(1), 8-13. <https://doi.org/10.22571/2526-4338165>
- Medeiros, A.B., Mendonça, M.J.S.L., Sousa, G.L., Oliveira, T.P. (2011) A Importância da educação ambiental na escola nas séries iniciais. *Revista Faculdade Montes Belos*, **4**(1), 12-14. Acesso em 03 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/a-importancia-da-educacao-ambiental-na-escola-nas-series-iniciais.pdf>
- Mendes, V.M.M., Chagas, K.K.N. (2023) Pedagogia dos R's nas escolas: da teoria à prática. *Revbea*, **18**(3), p. 32-42. <https://doi.org/10.34024/revbea.2023.v18.13952>
- Melo, J. C. A., Araujo, M. L., Gomes, E. P., Holanda, P. da S. (2023) Práticas Sustentáveis de Saneamento como ferramentas para implementação da Agenda Ambiental. *Revista Brasileira de Meio Ambiente e Sustentabilidade*, **3**(5), 140-171. Acesso em 04 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/371>
- Mesquita, E.G., Sartori, H. J. F., Fiuza, M. S. S. (2011) Gerenciamento de Resíduos Sólidos: Estudo de Caso em *Campus* Universitário. *Revista Construindo*, **3**(1), 37-45. Acesso em 04 de janeiro de 2024. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/1765>
- Moreira, R.M., Malheiros, T.F., Alfaro, J.F., Webster, N., Marans, R. (2019) Iniciativas de gestão de resíduos da Universidade de São Paulo e Universidade de Michigan. In Malheiros, *et al. Universidades rumo à sustentabilidade*. SGA/USP, São Paulo.
- 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. *Revista Pesquisa em Educação Ambiental*, **10**(1), 130-143. <https://doi.org/10.18675/2177-580X.vol10.n1.p130-143>
- Ostrowski, D. e Ostrowski, C.S. (2015) A percepção e Educação Ambiental de Estudantes Universitários, em *EDUCERE. XII Congresso Nacional de Educação*, 26 a 29 de outubro, Curitiba, 9318-9329.

- Pacheco, N. A.; Bastos, T. X. *Análise Freqüencial da Chuva em Capitão Poço, PA*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. 16p. Documentos 133.
- Richardson, R.J., Peres, J.A.S., Wanderley, J.C.V. (2008) *Pesquisa social: métodos e técnicas*. 3. ed. Atlas, São Paulo.
- Silva, F.M. (2018) Análise da implantação da política nacional de resíduos sólidos no município de Marituba/PA. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **7**(4), 45-65. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e4201845-65>
- Silva, G.N., Santos, C.K.S., Santos, M.J.B.A., Santos, T.A. (2015) A educação ambiental formal como ferramenta de sensibilização para a coleta seletiva na EMEF Olga Benário, em Aracaju/SE. *Revista Sergipana de Educação Ambiental*, **1**(2), p. 55-77. <https://doi.org/10.47401/revisea.v2i1.4444>
- Souza, M.T.S., Paula, M.B., Pinto, H.S. (2012) O papel das cooperativas de reciclagem nos canais reversos pós-consumo. *Revista de Administração de Empresas*, **52**(2), p. 246-262. Acesso em 12 de dezembro de 2023. Disponível em: <http://www.spell.org.br/documentos/ver/7073/o-papel-das-cooperativas-de-reciclagem-nos-canais-reversos-pos-consumo>
- Tauchen, J., Brandli, L. (2006) A gestão ambiental em Instituições de Ensino Superior: Modelo para implantação em campus universitário. *Gestão e Produção*, **13**(3), 503-515. <https://doi.org/10.1590/S0104530X2006000300012>
- Tavares, L.G., Souza, L.R., Sales, A.C.S., Souza, F.P.N., Carvalho, L.S., Araújo, V.F.C., Comassetto, T.P. (2023) Avaliação socioambiental dos catadores de material reciclável de um lixão na Amazônia Oriental. In Andrade, J. K. B. (Org.). *Temas Atuais em Ciências Ambientais*, Licuri, Campina Grande, 54-71. <https://doi.org/10.58203/Licuri.83535>
- Thode Filho, S., Marques, A.J., Santos, J., Ribeiro, K.F., Medeiros, M.R.A.M., Santos, P.G., FRANÇA, S.S. (2014) Um estudo sobre a composição gravimétrica dos resíduos sólidos do IFRJ campus Duque de Caxias. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, **18**(3), 30-35. <https://doi.org/10.5902/2236117013806>
- Vega, C.A., Benítez, S.O., Barreto, M.E.R. (2008) Solid waste characterization and recycling potential for a university campus. *Waste Management*, **28**(1), 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.022>

REVISTA AIDIS

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

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS URBANOS UTILIZADOS NO COPROCESSAMENTO EM FORNOS DE CIMENTO

* Flávio Leôncio Guedes¹
José Fernando Thomé Jucá¹
Soraya Giovanetti El-Deir²

ASSESSMENT OF THE LIFE CYCLE OF PRODUCTION OF REFUSE DERIVED FUEL URBAN WASTE USED IN CO-PROCESSING IN CEMENT FURNACES

Recibido el 15 de enero de 2024. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

The increase in urban solid waste generation in Brazil requires efficient solutions. Thermal treatment stands out for significantly reducing the volume of waste, and this study analyzed the environmental impact of Waste-Derived Fuel when replacing fossil fuels in the cement industry. The results show that the use of this alternative fuel can reduce greenhouse gas emissions by up to 85.98% throughout the supply chain, avoiding 1.781,46 tCO_{2-eq}.year⁻¹. This contributes to the mitigation of climate change, being an important benefit in the context of the transition to a more sustainable economy. Regarding calorific value, the variations observed between scenarios do not compromise energy efficiency, which presents an average value of 4.932 kcal.kg⁻¹, which makes it competitive in relation to conventional fuels. The greatest environmental benefits are the reduction in oil exploration and carbon emissions into the atmosphere, while the negative impacts are related to the use of fuels in transportation and the consumption of electricity during manufacturing, in addition to the ecotoxicity generated by burning in cement kilns. This study reinforces the technical and environmental feasibility of thermal waste treatment, highlighting it as an effective alternative in waste management and in replacing fossil fuels.

Keywords: thermal energy, life cycle, solid waste, fuel.

¹ Centro de Tecnologia e Geociencias, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

² Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

* *Autor correspondente:* Centro de Tecnologia e Geociencias, Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, CEP 50670-901, Brasil. Email: f_l_guedes@hotmail.com

Resumo

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil exige soluções eficientes. O tratamento térmico destaca-se por reduzir significativamente o volume de resíduos, e este estudo analisou o impacto ambiental do Combustível Derivado de Resíduos ao substituir combustíveis fósseis na indústria cimenteira. Os resultados mostram que o uso desse combustível alternativo pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 85,98% em toda cadeia de suprimento, evitando 1.781,46 tCO_{2-eq}.ano⁻¹. Isso contribui para a mitigação das mudanças climáticas, sendo um benefício importante no contexto da transição para uma economia mais sustentável. Em relação ao poder calorífico, as variações observadas entre cenários não comprometem a eficiência energética, que apresenta um valor médio de 4.932 kcal.kg⁻¹, o que o torna competitivo em relação aos combustíveis convencionais. Os maiores benefícios ambientais são a redução na exploração de petróleo e nas emissões de carbono na atmosfera, enquanto os impactos negativos estão relacionados ao uso de combustíveis no transporte e ao consumo de energia elétrica durante a fabricação, além da ecotoxicidade gerada pela queima nos fornos das cimenteiras. Este estudo reforça a viabilidade técnica e ambiental do tratamento térmico de resíduos, destacando-o como uma alternativa eficaz na gestão de resíduos e na substituição de combustíveis fósseis.

Palavras-chave: energia térmica, ciclo de vida, resíduos sólidos, combustível.

Introdução

A problemática do aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está presente em todos os municípios brasileiros. A eficiente gestão de RSU permite ao município reduzir a emissão Gases de Efeito Estufa (GEE) à atmosfera, especialmente no que diz respeito às rotas tecnológicas a serem adotadas antes da disposição final (Luiz e Suski 2021; Juca, 2014). Os resíduos dispostos sem tratamento em aterros sanitários contribuem significativamente para a intensificação da emissão de GEE, da poluição do ar, da poluição das águas, bem como o aumento problemas de saúde pública (Thakur; Ganguly; Dhulia 2018).

O tratamento térmico de resíduos, dentre os tratamentos existentes, possui o maior índice de redução de volume dos resíduos, podendo variar entre 80 e 90% (Lombardi; Carnevale; Corti 2015). O processo se dá pela queima controlada e devidamente preparada dos resíduos para diminuir o seu volume e gerar energia. Em relação às emissões de GEE, o CO₂ é o principal GEE emitido pelos incineradores de RSU. Já o CH₄ não é gerado durante as operações normais da incineração (Johnke, 2002).

Dessa forma, a recuperação energética aplicado aos RSU utilizam tecnologias que neutralizam as características negativas, e agrega valor, através de matéria-prima secundária produzida. Para Machado *et al.* (2021), diversos métodos vêm sendo aplicados para promover o reaproveitamento de resíduos e minimizar os riscos ambientais causados pela disposição inadequada.

O combustível derivado de resíduos (CDR), é um termo aplicado a materiais que possuem valor calorífico elevado, normalmente por volta de 18 MJ.kg^{-1} , recuperado da coleta de resíduos. Segundo Sampaio (2014), este procedimento é utilizado para um melhor rendimento do resíduo, no qual torna o combustível com um tamanho mais uniforme.

Na indústria de cimento, o CDR é aplicado como permuta aos combustíveis fósseis não renováveis, como o coque de petróleo, representando a segunda principal alternativa do setor (Visedo e Pecchio, 2019). Segundo Araújo (2020), a indústria cimenteira é fundamental para a economia mundial, porém o processo produtivo consome grandes quantidades de combustíveis e de eletricidade, sendo responsável por até 7% das emissões de CO_2 .

A utilização do CDR diminui a área ocupada por aterros sanitários, através da transformação dos RSU em combustível, evitando a disposição em extensas áreas de terra, as quais necessitariam de cuidados adicionais após o encerramento da vida útil, tornando vantajosa a alternativa desta recuperação energética (Piaia, 2021).

Todo produto possui um ciclo de vida, com possíveis impactos associados, tanto na fabricação quanto no consumo. Para uma análise mais completa através de fluxos de matéria e energia, é empregada a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Segundo Firmo (2019), a ACV apresenta uma visão integrada, onde são consideradas todas as emissões de GEE decorrentes do gerenciamento dos resíduos, independentemente do local ou momento temporal em que estas ocorreram. Para Luiz e Suski (2021), através da ACV é possível quantificar não apenas os impactos gerados pela decomposição de resíduos, como também realizar um balanço de toda cadeia produtiva.

O efeito direto ou indireto da emissão de GEE oriundos de processo ou produto pode ser representado através da análise da Pegada de Carbono (Bongiovanni e Tuninetti 2021). Esta pode ser considerada uma aplicação especial da ACV, no qual foca em específico nas emissões de GEE, cuja principal vantagem em comparação a uma ACV completa é a facilidade de sua comunicação (Araújo *et al.*, 2018).

Para auxiliar na seleção da melhor alternativa para o tratamento dos RSU e para compreender os possíveis impactos gerados na utilização de combustíveis alternativos como o CDR, a análise de emissão de GEE pode-se ser utilizada através da ACV. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi verificar o impacto da emissão de carbono para atmosfera do ciclo processual do CDR e realizar uma análise comparativa dos impactos ambientais nos ciclos de vida do CDR e do Coque de Petróleo.

Materiais e métodos

Avaliação do Ciclo de Vida do CDR

Para que se obter uma visão sistêmica dos impactos ambientais provocados por métodos produtivos, é recomendável à realização de uma ACV. Esta análise foi realizada de acordo com as normas ISO NBR 14040 (ABNT, 2014a), ISO NBR 14044 (ABNT, 2014b), seguindo as recomendações da norma ISO NBR 14067 (ABNT, 2018), que padroniza os estudos de Pegada de Carbono (PC) para a utilização da categoria de impacto de Mudanças Climáticas. Assim, para o cálculo da PC foi utilizada a Equação para conversão das emissões de GEE em toneladas de CO₂ equivalente. Estudos sobre ACV são indicados para quantificar a Pegada de Carbono associada processos de produção (Melquíades *et al.*, 2019). A técnica da ACV possui quatro fases: objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados.

Âmbito da Análise

O escopo do estudo perfaz um sistema de tratamento RSU para a produção de CDR, que inclui as etapas de transporte, triagem e tratamento e utilização. A unidade funcional utilizada foi de 1 t.mês⁻¹ do processo de produção de a partir de RSU coletados em Paulista-PE, considerando ano base 2019 e análise gravimétrica realizada em 2018 (Tavares, 2018).

Os processos de transporte de Município de Paulista-PE à Central de Tratamento de Resíduos, de triagem (manual e automática) e de produção de CDR, configuram-se na fronteira da primeira fase do estudo (Figura 1), na qual se analisa o impacto processual. Dessa forma, nesta fase se avaliou a Pegada de Carbono do gerenciamento de RSU para produzir CDR, onde foi realizado um Inventário de Ciclo de Vida (ICV), definição de objetivo e escopo e análise do inventário. Quando a realização do ICV é restrita ao processo dentro das companhias, é realizado um estudo “do berço ao portão da indústria” (Verschoor e Reijnders 1999). Assim, este estudo considerou a ACV do berço ao portão, quantificando a carga ambiental do CDR desde o transporte do RSU que entra no sistema de produção (berço) ao produto produzido pronto para comercialização (portão).

A segunda fase do estudo constitui-se de uma análise da cadeia de produção e consumo, desde a extração de recursos até a disposição final, tendo como destino final a queima em fornos das fábricas de produção de cimento. Além disso, para fins de comparação, também teve lugar um ICV do coque de petróleo, combustível fóssil mais utilizado para queima na indústria cimenteira. Nessa fase, considerou a ACV do berço ao túmulo, no qual foi utilizado o procedimento proposto por D'agosto e Ribeiro (2002), para analisar as entradas e os aspectos ambientais do Ciclo de Vida de um produto para o caso da cadeia de suprimentos de combustíveis de transporte, através da: fase 1 - definição da abrangência e das dimensões, fase 2 - coleta de dados para a análise do inventário, fase 3 - avaliação da qualidade dos dados e por fim, fase 4 - comparação dos resultados obtidos (Figura 2).

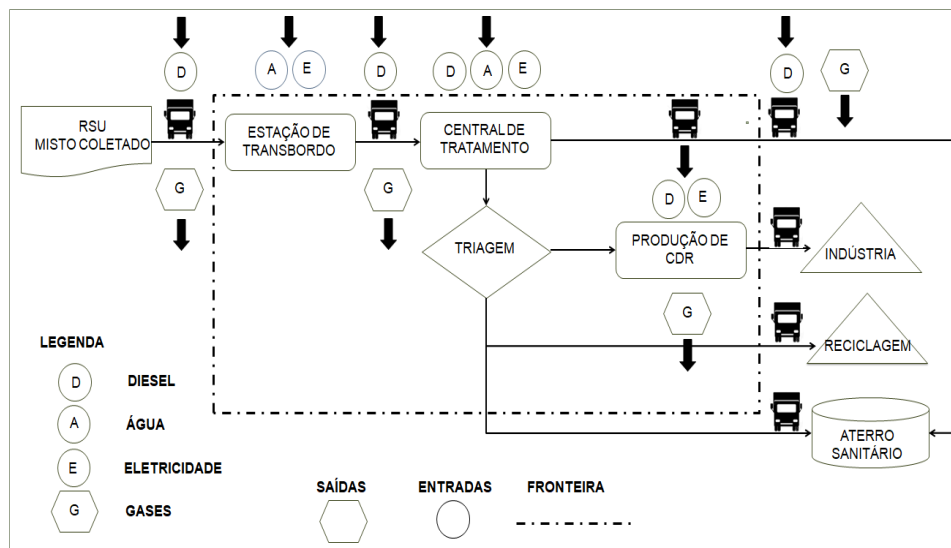


Figura 1. Fronteira do sistema produto (primeira fase). Fonte: elaboração própria (2021).

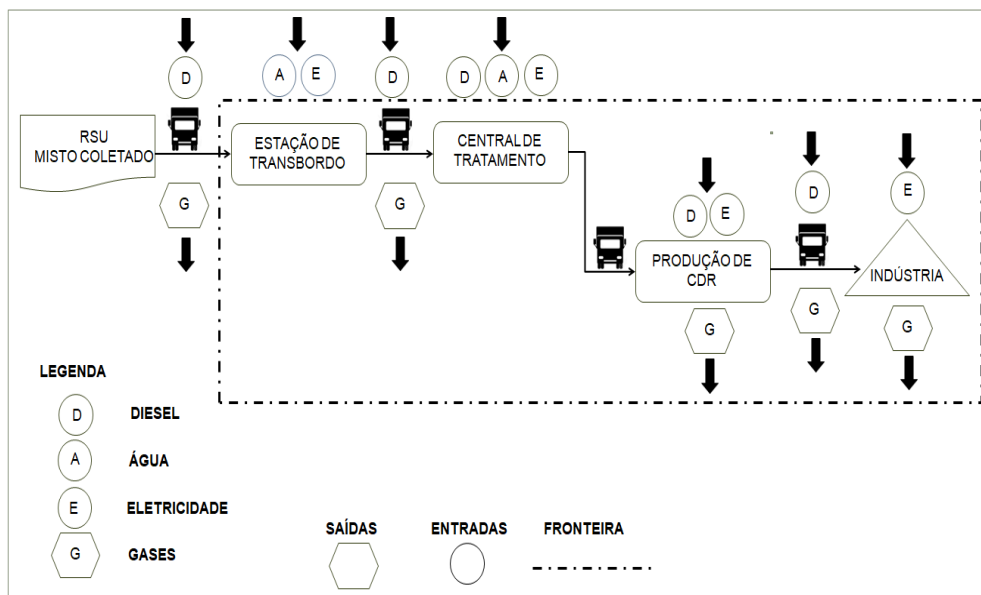


Figura 2. Fronteira do sistema produto (segunda fase). Fonte: elaboração própria (2021).

Foram considerados três níveis de detalhamento para o comprimento do estudo: macro, meso e micro estágios (Figura 3). Por meio desta abordagem, pode se realizar refinamentos sucessivos à medida que se disponha de um maior detalhamento dos estágios e dos processos (D'agosto, e Ribeiro, 2002). Assim, as comparações entre os ciclos de vida do CDR e do Coque com os níveis de detalhamento foram realizadas por meso-estágio, uma vez que os processos da fase de micro-estágio são específicos para cada ciclo de vida (Rocha, 2014). A análise comparativa foi realizada seguindo os passos de Rocha (2014), através dos valores obtidos da ACV do Coque de Petróleo, com adaptação na estimativa de emissões de tCO₂ na etapa de transporte da fonte de energia para a área de estudo.

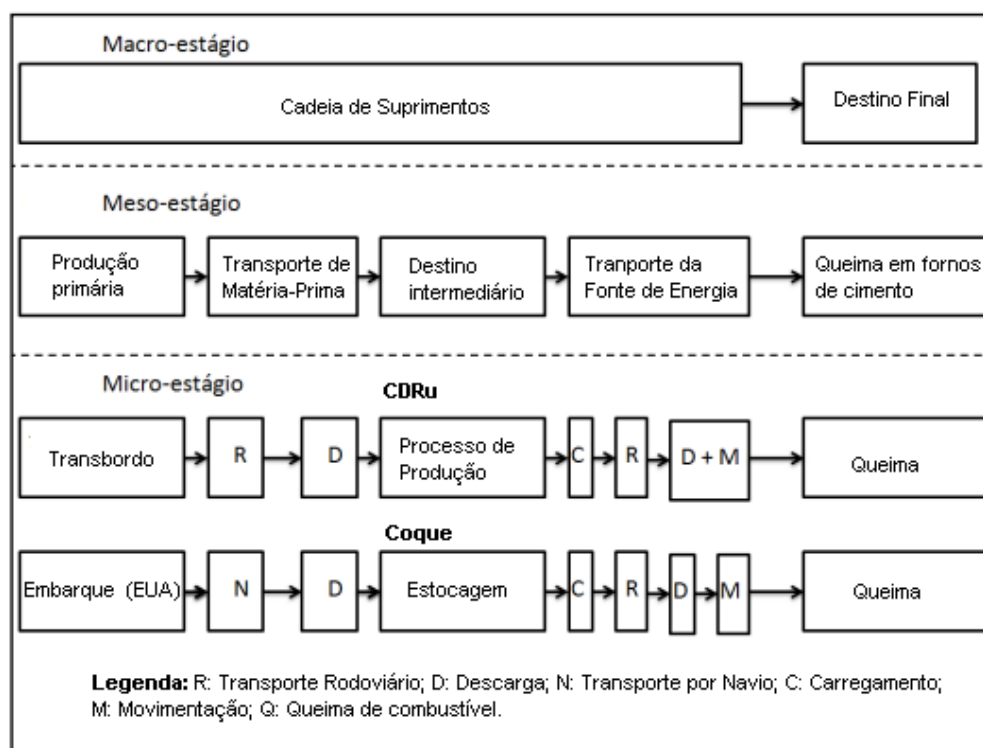


Figura 3. Níveis de detalhamento do modelo de ciclo de vida. Fonte: Adaptado a partir de (Rocha, 2014).

De acordo com estimativas do PCI dos principais componentes do CDR de três rotas analisadas e do PCI do coque, foi possível calcular a quantidade de combustível fóssil substituída, permitindo estimar a diminuição nas emissões atmosféricas no ano (Equação 1). A variação do PCI nos componentes principais do CDR (plástico, papel e resíduos têxteis), em função da composição gravimétrica e a Equação apresenta a expressão utilizada para calcular as emissões evitadas com a substituição do coque (Soares, 2011; Tavares, 2018; Silva, 2021).

$$[Es = r * QCDR * (PCI cdr / PCI coque)]$$

Equação (1)

Onde:

Es: São as emissões evitadas pela substituição do coque por CDR (kg CO₂.ano⁻¹)

r: é o fator de redução específico de emissões (kg CO₂ kg.CDR⁻¹)

QCDR: é a quantidade de CDR utilizada nos fornos (kg.ano⁻¹)

PCI CDR: é o poder calorífico inferior do CDR (kcal.kg⁻¹)

PCI Coque: é o poder calorífico inferior do coque

Análise de Inventário do processo produtivo de CDR

Os processos utilizados no inventário incluem desde o transporte, triagem e produção, bem como o consumo de energia e combustível nessas etapas (Rocha 2014). Os dados de entrada referentes ao sistema produtivo foram obtidos de literatura, manuais técnicos e dados públicos. Já as informações relacionadas à produção dos insumos e transporte foram obtidas na base de dados do Ecoinvent 3 (Frischknecht *et al.*, 2007).

A ACV do berço ao túmulo do CDR e do Coque de petróleo foi quantificada para a análise comparativa, através dos fatores de emissão obtidos na última etapa do ciclo e vida referente à disposição final, a qual é atribuída à queima dos combustíveis nos fornos das cimenteiras. Como as tecnologias de processamento, transporte e produção, tanto do CDR como do Coque, não sofreram alterações significativas recentemente, foram considerados dados dos últimos 10 anos.

O CDR foi gerenciado como um resíduo, sendo disposto corretamente, e reaproveitado como combustível em destino adequado. Por isso, não foram quantificadas as emissões provenientes do processo produtivo e logístico do RSU em sua vida útil.

Avaliação dos Impactos

Essa fase tem a finalidade de compreender e analisar o impacto ambiental causado pelo consumo de matéria-prima e a emissão dos rejeitos identificados no momento do inventário. O mais importante nessa fase é a redução da poluição originada por um determinado processo em que um dos fatores responsáveis para tal é a utilização indiscriminada de elementos ecológicos, implicando em um alto grau de degradação ambiental (Giannetti e Almeida, 2006).

O processamento dos dados coletados através dos cálculos e modelagem foram realizados com auxílio do software Simapro, na versão 9.2.0.2 (Goedkoop *et al.*, 2016). O Simapro oferece diversos métodos para o cálculo de impactos ambientais, dentre os quais foi selecionado o método para a quantificação das contribuições de emissões atmosféricas para o problema das mudanças climáticas, proporcionando a Pegada de Carbono.

A determinação do impacto ambiental potencial do processo de produção do CDR foi realizada pelo do método Single Issue na categoria IPCC 2013 GWP 100a. Este é utilizado para impactos com abrangência de aplicação global de mudanças climáticas (GWP), sendo um dos mais usados para tal fim, expressado em kg CO₂-eq. Este método utiliza os fatores de conversão atualizados do IPCC para a quantificação das contribuições de emissões atmosféricas e caracteriza as diferentes emissões de GEE, de acordo com o potencial de aquecimento global em 100 anos. Além da metodologia do IPCC 100a, para o impacto ambiental referente à queima dos componentes do CDR na indústria do cimento, foi utilizado o método USEtox2, que avalia as categorias de ecotoxicidade e seus efeitos desestabilizadores no ambiente e suas consequências para a saúde humana e segurança alimentar.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite verificar os resultados considerando uma variável, de acordo com a modificação de suas quantidades, o que facilita as tomadas de decisões (Blank e Tarquin, 2008). Esta foi realizada para examinar diferentes cenários de composição gravimétrica do RSU. Para tanto, foram analisadas as variações dos componentes principais do CDR em três rotas distintas, no município estudado. Dessa maneira, foram estudados os percentuais da composição gravimétrica, a fim de verificar a influência dessas variantes no poder calorífico e nas emissões de Carbono emitida por esses materiais no processo de queima nos fornos das cimenteiras.

Resultados e discussão

Estudo de Caso

O estudo teve como objeto principal a quantificação das emissões de GEE a partir da produção de CDR, considerando para a quantidade CO₂-eq por produção mensal de CDR. Para tanto, a área de estudo da pesquisa foi o CTR – PE, localizado em Igarassu – PE, sob as coordenadas -07 43' 14,6"E e -34 56' 34,5"W, que dispões de Aterro Sanitário para resíduos classes I, II-A e II-B. Possui uma área de 106 hectares e estimativa de uma vida útil de 22 anos, o empreendimento recebe aproximadamente 1.500 t.dia⁻¹ de RSU gerados em dez municípios de Pernambuco, no qual, para este estudo, foi escolhido os RSU coletados em Paulista-PE. Assim, metade dos RSU que o CTR-PE recebe diariamente são destinadas para a usina de triagem de RSU. Dessas 750 t, aproximadamente 30%, sendo um volume superior a 220 t, são comercializados como materiais recicláveis e CDR, de acordo com dados da Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP, 2019).

Durante o processo de produção de CDR no CTR-PE (Figura 4), foram analisados os fluxos de matéria e energia nos processos de transporte, triagem manual e processos automáticos da planta que inclui trituração primária, peneiramento, remoção magnética de materiais ferrosos e

não ferrosos, classificação com uso de sensores óticos, trituração secundária e armazenamento. Esse processo resulta numa fração de combustível com maior poder calorífico e composição livre de contaminação ou substâncias orgânicas críticas, tornando um composto de boa qualidade (Jucá *et al.*, 2014).



Figura 4. Planta de triagem e produção de CDR em Igarassu-PE. Fonte: autoria própria (2021).

Foram consideradas as estimativas de consumo de combustíveis fósseis aplicadas à rota do produto, desde o transporte da matéria-prima (RSU) até o produto final (CDR). Dessa forma, o percurso perfaz 17.1 km na etapa de transporte de RSU da Estação de Transbordo ao CTR-PE e 45.1 km na segunda etapa de comercialização do CTR à indústria (Figura 5).

Os dados utilizados sobre a tipologia de resíduos selecionados para o processo de produção do CDR foram estimados através de dados quantitativos dos RSU coletados no município e inventariados por frações de resíduos valorizados para produção de CDR. Dessa forma, de acordo com a análise gravimétrica dos RSU, foi considerado o percentual responsável pela composição principal do CDR, sendo formado pelo composto da mistura de resíduos de papéis, plásticos e resíduos têxteis (Figura 6). Foi observado que o percentual de materiais usados na preparação de CDR é composto, principalmente, por plásticos não valorizados na reciclagem, com cerca de 70% da amostra.

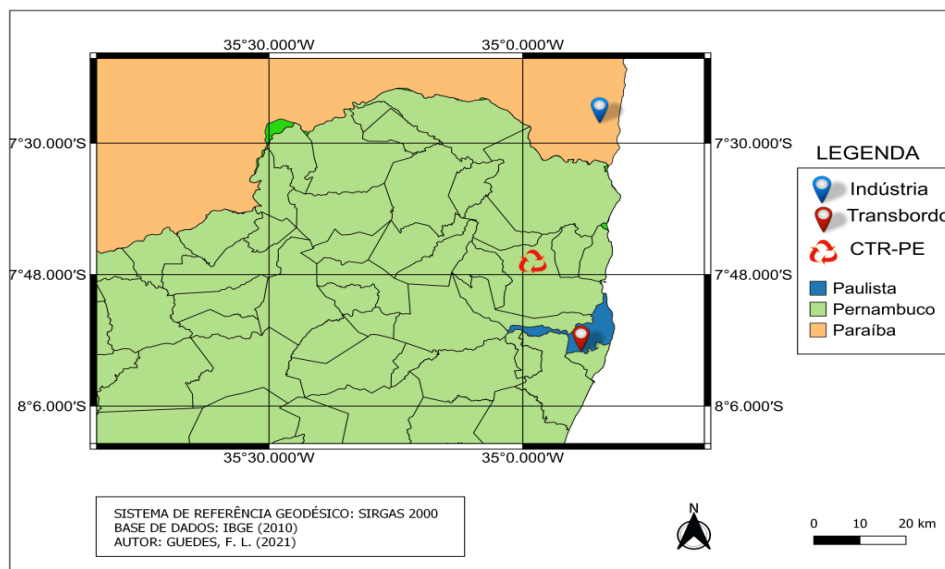


Figura 5. Rota do CDR Produzido em Paulista-PE. Fonte: elaboração própria (2021).

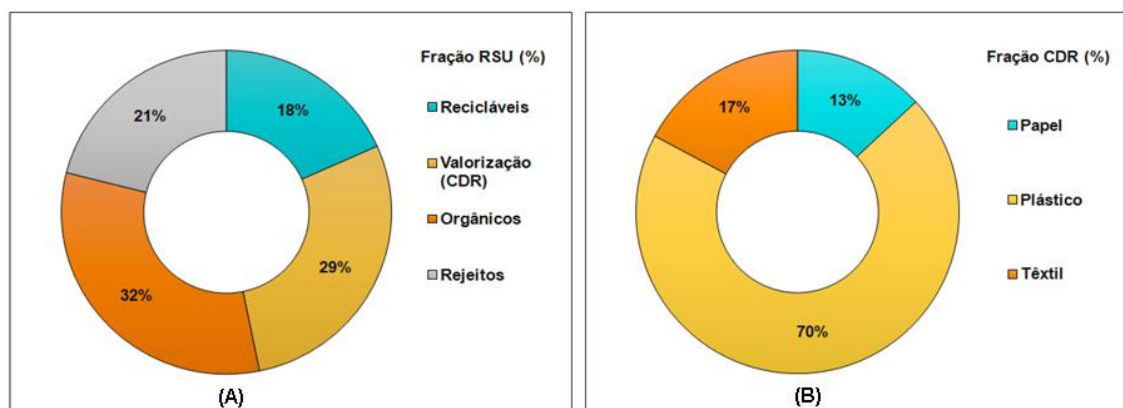


Figura 6. Proporção por tipologia dos RSU do Município de Paulista-PE. Figura 6a. Percentual de RSU por gerenciamento. Figura 6b. Percentual de Resíduos valorizados para produção de CDR. Fonte: elaboração própria (2021).

Inventário e Análise dos Impactos

Para fins de ACV, foi considerado o percentual de RSU, de acordo com a caracterização gravimétrica, referente ao material não aproveitado na reciclagem e valorizado na produção de CDR. Assim, para uma tonelada de RSU produzido no município, 290 kg de resíduos tem potencialidades para a transformação em CDR. O balanço de entradas e saídas do ciclo produtivo

do CDR foi realizado através da confecção do ICV, sendo a proporção do fluxo do sistema de materiais e energia analisado e estimado de acordo com a unidade funcional adotada do gerenciamento de 1 t de CDR.mês⁻¹ (Tabela 1).

Tabela 1. ICV do processo do ciclo de vida do CDR

Processo	Fluxo	Unidade Funcional	Quantidade	Unidade
Transbordo - CTR	Entradas	RSU	8100	t
		Diesel	17928	L
		Eletricidade	4617	kWh
	Saídas	RSU	8100	t
		GEE	0.00135	kg CO ₂ -eq
Triagem Manual e Automática	Entradas	RSU	8100	t
		Diesel	4536	L
		Eletricidade	9091	kWh
	Saídas	CDR	2349	t
		Recicláveis	1458	t
		Rejeitos	1701	t
		Orgânicos	2592	t
		GEE	0.00287	kg CO ₂ -eq
		CDR	2349	t
Produção/Refino CDR	Entradas	Eletricidade	340	kWh
	Saídas	CDR	2349	t
		GEE	7.64E-05	kg CO ₂ -eq
CTR – Indústria Cimenteira	Entradas	CDR	2349	t
		Diesel	20369	L
	Saídas	GEE	0.00412	kg CO ₂ -eq
Queima	Entradas	Plástico	1644.30	t
		Papel	305.37	t
		Têxtil	399.33	t
		Eletricidade	7222.22	kWh
	Saídas	GEE	1644.30	CO ₂ -eq
		Cinzas	0	t

O início do ciclo de vida do CDR foi definido como sendo o carregamento dos caminhões na Estação de Transbordo que fazem o transporte para o CTR-PE, onde o RSU é processado e transformado em CDR. O destino do CDR é a indústria de cimento, onde é utilizado em fornos como combustível, gerando energia térmica. Dessa forma, o inventário refere-se à produção de mensal do produto, considerando um mês com 30 dias.

O transporte da matéria-prima do berço ao portão representa a distância percorrida de 62.2 km em cada ciclo berço-túmulo e um consumo de diesel de 42833 L.mês⁻¹. Essa segregação na etapa de transporte deve ser realizada devido às diferenças nas características dos caminhões utilizados em cada trecho, que implicam em fatores de consumo diferentes (Merrild; Larsen; Christensen, 2012). Foi contabilizado as emissões referentes ao uso de Diesel de caminhões carretas de capacidade entre 29 e 35 m³ e escavadeiras hidráulicas utilizadas no processo.

O consumo de energia elétrica na Sede da Estação de transbordo e no CTR-PE foram inventariados no processo, bem como a energia utilizada na Planta de triagem e produção de CDR, o que contabilizou 21270.22 kwh.mês⁻¹.

Na análise do impacto processual berço ao portão, foi verificado que nas etapas referentes ao processo de fabricação de CDR, o maior impacto na categoria de mudanças climáticas refere-se ao consumo de combustível, com uma contribuição de 14.3 tCO_{2-eq.} mês⁻¹. Este é seguido pelo uso de energia elétrica com 5.46 tCO_{2-eq.}, que somando toda cadeia produtiva do processo é responsável por um total de 19.77 tCO_{2-eq.} emitidos ao ano (Figura 7).

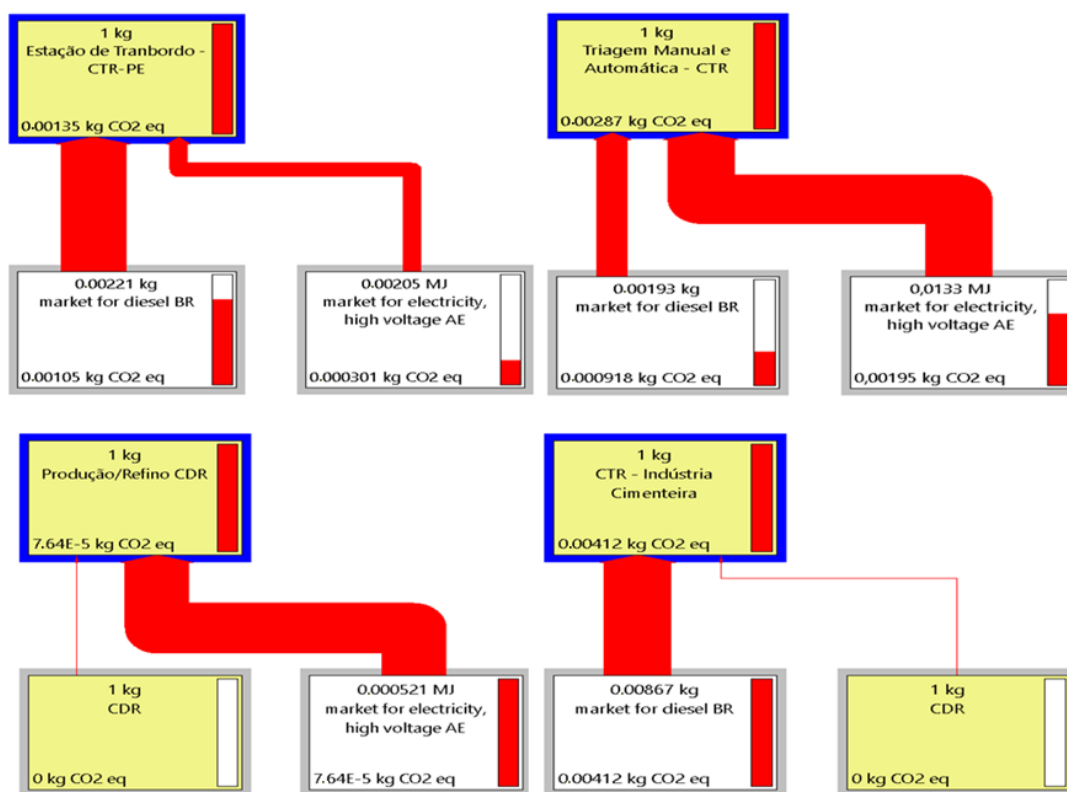


Figura 7. Etapas ICV do impacto processual. Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021).

No processo de queima do CDR nos fornos de cimento, foi observado uma contribuição maior de CO₂-eq emitido com a queima de resíduos têxteis, com 20150 tCO₂-eq.ano⁻¹, e resíduos de plásticos, com 7360 tCO₂-eq.ano⁻¹. Tais quantitativos somam ao processo uma emissão de 27990 tCO₂-eq, perfazendo um total anual de 28160 tCO₂-eq.ano⁻¹ emitidos durante a queima (Figura 8).

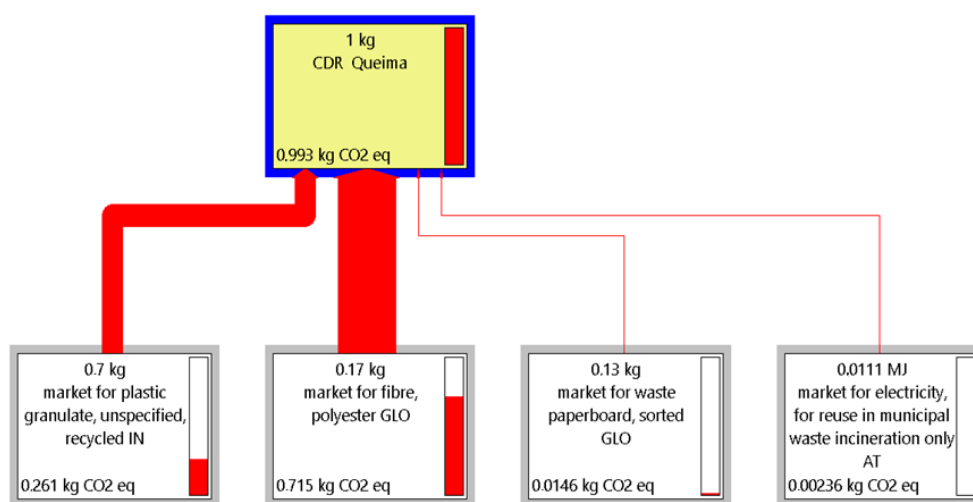


Figura 8. Processo de queima do CDR. Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021).

Análise Comparativa

A análise indicou uma emissão total de 30102.56 tCO₂-eq.ano⁻¹ no ciclo de vida do coque de petróleo e uma emissão de 28321.1 tCO₂-eq.ano⁻¹, indicando que os resíduos quando utilizados como substituto dos combustíveis fósseis na indústria de cimento evita a emissão de Carbono para a atmosfera. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), a indústria do cimento consumiu 3163218.39 m³ de Coque de Petróleo, o que equivale a 70.6% das fontes de combustível para o Setor (EPE, 2020).

Dada à diferença na ordem de grandeza das emissões no processo de queima no forno de clínquer, última etapa do ciclo de vidas dos combustíveis analisados, julgou-se adequado analisar a cadeia de o processo isoladamente, pelo método *Usetox2*, devido à contribuição de emissões de CO₂-eq mais significativa em toda cadeia produtiva.

Assim, para o impacto ambiental referente à queima dos componentes do CDR na indústria analisada através do método *USEtox2*, que avalia as categorias de ecotoxicidade e ecotoxicidade humana câncer e não câncer, foi observado que à queima dos componentes têxteis, seguido dos plásticos, contribuem mais para a emissão de CO₂-eq na atmosfera (Figura 9).

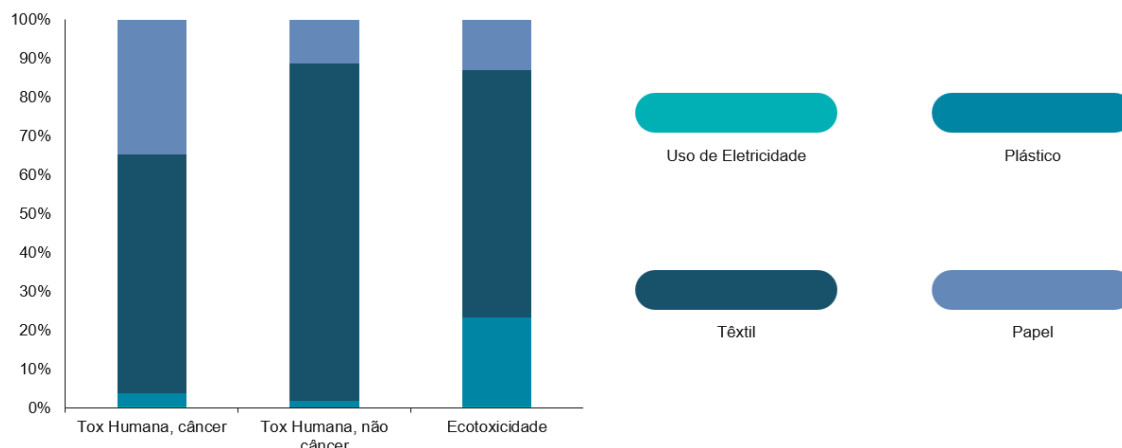


Figura 9. Análise de impacto utilizando a categoria Usetox 2. Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021)

Na análise comparativa nos meso-estágios, observou-se emissão de $161.1 \text{ tCO}_2\text{.ano}^{-1}$ na cadeia de suprimentos do CDR e de $1148.96 \text{ tCO}_2\text{.ano}^{-1}$ na do Coque (Figura 10), percebe-se que os principais processos que contribuem diferença significativa são o transporte da matéria-prima, devido à longa distância percorrida via transporte marítimo para importação do coque, bem como o transporte até a fonte de Energia, levando em consideração que o CDR é oriundo do município próximo à fonte de energia. Cabe ressaltar a diferença nas emissões de CO_2 destino Intermediário, que ocorre porque o coque é apenas armazenado neste estágio, enquanto o CDR é processado, passando pela unidade planta de produção. Já na etapa de produção de matéria prima, devido o CDR ser oriundo do resíduo, a emissão foi considerada zero.

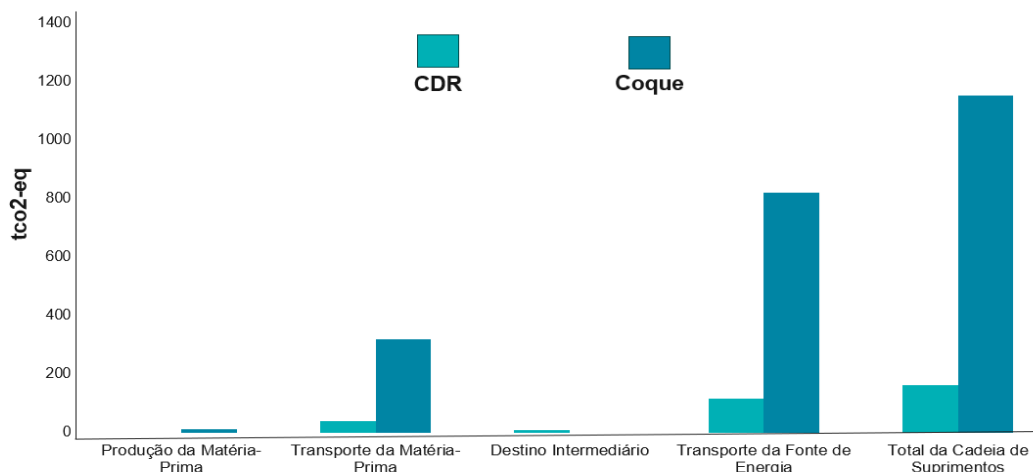


Figura 10. Comparação das emissões de $\text{CO}_2\text{-eq}$ entre as cadeias de suprimento do CDR e Coque de Petróleo. Fonte: Elaboração Própria a partir do Simapro (2021)

Análise de Incerteza

A partir da atribuição de valores em termos de energia aos materiais contidos na composição gravimétrica do CDR foi estimado PCI dos resíduos dos principais componentes (Ivig, 2005; Barros, 2012; REDEACV, 2017; Guedes *et al.*, 2021). Na análise, o plástico possui maior contribuição na composição gravimétrica em relação aos componentes das mostras das 3 rotas analisadas, com média de 17,86% (Figura 11), e foi levada em consideração que o PCI do plástico é maior que os outros materiais cerca de 7830 Kcal.kg⁻¹. Já os resíduos têxteis e de papéis possuem em média PCI de 4170 e 3780 Kcal.kg⁻¹, respectivamente.

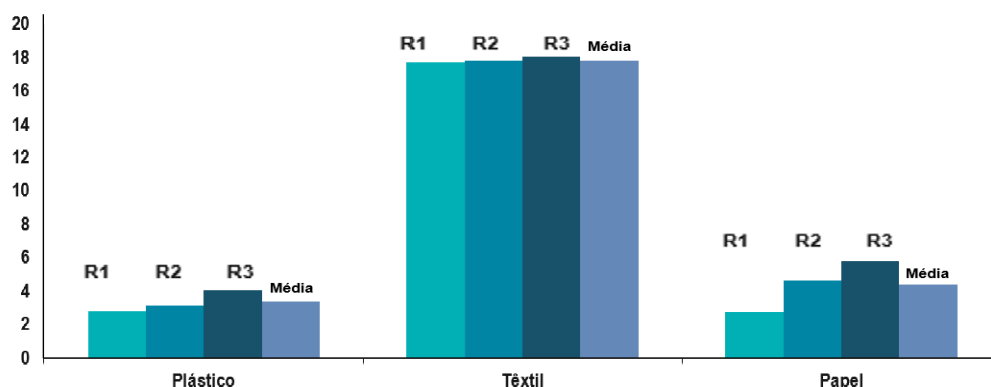


Figura 11. Média da composição gravimétrica dos componentes do CDR. *Fonte: Elaboração própria a partir de Barros (2012), Tavares (2018), Guedes et al. (2021b).*

A diferença na composição dos materiais que compõem o CDR não alterou de forma que comprometesse o uso nos fornos de clínquer, dado o resultado do poder calorífico encontrado. O resultado mínimo da análise teórica do PCI foi de 4932 kcal.kg⁻¹. Considerando que o PCI do CDR não deve ser inferior a 1675 kcal.kg⁻¹ se tratando de aproveitamento de energético. Além disso, mesmo que a classificação segundo o PCI não deva ser considerada de forma definitiva para estabelecer a destinação correta do RSU, considera-se que para um PCI > 2000 kcal.kg⁻¹ a queima é tecnicamente viável (Themelis, 2003).

Assim, ao final da análise de sensibilidade, foi verificado que, mesmo com a variação do PCI de acordo com a rota de coleta do município do estudo, os valores não comprometem o aproveitamento de energia térmica contida nos RSU e o ciclo do CDR mantém valores de emissão de CO₂ inferiores ao do Coque, reforçando sua vantagem técnica e ambiental neste parâmetro.

Conclusão

O processo de produção dos componentes do CDR se destaca por apresentar os maiores impactos positivos na categoria relacionada às mudanças climáticas devido às emissões evitadas na substituição do combustível fóssil e à redução da exploração de petróleo para fabricação de resinas plásticas e fibras dos principais componentes. Já o impacto negativo está relacionado ao uso de combustível no transporte do material, energia elétrica no processo de fabricação do CDR e queima nos fornos das cimenteiras com impactos negativos para a categoria de ecotoxicidade.

A comparação analítica entre o CDR e o Coque, dois casos combustíveis utilizados nos fornos de produção de cimento, foi realizada pelo método internacionalmente padronizado de ACV. A produção de 1 t de combustíveis de ambos os casos contribuiu com a Emissão de GEE para o caso do CDR de 28321.1 tCO_{2-eq}.ano⁻¹, e para o caso do Coque de 30102.56 tCO_{2-eq}.ano⁻¹, sugerindo que os RSU quando utilizados como substituto dos combustíveis fósseis na indústria de cimento reduz a emissão de Carbono para a atmosfera. Os resultados mostram que o uso desse combustível alternativo pode reduzir as emissões em até 85,98% em toda a cadeia de suprimento, evitando 1.781,46 tCO_{2-eq}.ano⁻¹.

A variação dos valores nos resultados do Poder Calorífico do CDR em diferentes cenários não compromete o aproveitamento de energia térmica contida nos RSU e o ciclo do CDR mantém valores de emissão de CO₂ inferiores ao do Coque, reforçando sua vantagem técnica e ambiental neste parâmetro.

Vale ressaltar que o fato do coprocessamento de CDR ter sido escolhido para a pesquisa não significa que seja a melhor opção para destinação dos RSU gerados no município. Sugere-se, ainda, em estudos futuros, a realização de ACV mais abrangentes, que englobem o consumo de água demandados por cada etapa, bem como os aspectos financeiros e sociais.

Referencias bibliográficas

- ABLP, Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (2019) *Revista Limpeza Pública*. Ed. nº 102. Publicação trimestral da 3ª trimestre. São Paulo-SP.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014a) *NBR 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro-RJ.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014b) *NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro-RJ.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018) *NBR 14067: Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação*. Rio de Janeiro-RJ.
- Araújo, Y. R. V., Góis, M. L., Coelho Junior, L. M., CARVALHO, M. (2018) Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(2), 863-1868. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p609-629>
- Barros, R. T. DE V. (2008) *Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos*. 1.ed. Belo Horizonte: Tessitura, 2012

- Blank, L., Tarquin, A. (2008) *Engenharia Econômica*. 6ª ed. McGraw-Hill, Porto Alegre, Brasil.
- Bongiovanni, R. G., Tuninetti, L. (2021) Huella de Carbono de la cadena de trigo de Argentina. *LALCA: R. Latino-Amer. Aval. Ciclo Vida*. (4), 1-38. <https://doi.org/10.18225/lalca.v4i0.5206>
- D'agosto, M. A., Ribeiro, S. K. (2002) Sistema de gestão da ecoeficiência energética: modelo para frotas de transporte rodoviário, *COPPE/UFRJ*, Rio de Janeiro-RJ.
- EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. (2020) Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. Empresa de Pesquisa Energética. Brasil. Rio de Janeiro-RJ, 292 p.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., Wernet G. (2007) Overview and Methodology.ecoinvent report Nº. 1. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, Dübendorf.
- Giannetti, B. F., Almeida, C. M. V. B. (2006) Ecologia Industrial: Conveitos, Ferramentas e Aplicações. *Editora Edgard Blucher*, São Paulo-SP.
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer, E. (2016) Introduction to LCA with SimaPro. *Pré Consultants*. Netherlands.
- Guedes, F. L., Juca, J. F. T., Oliveira Júnior, A. I., Aragão Júnior, W. R., Araujo, J. A. R. (2021) Potencial energético do combustível derivado de resíduo produzido em Pernambuco, Brasil. *XIX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA*. Recife.
- IVIG, Instituto Virtual Internacional de Mudanças - COPPE. (2005) Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ. *Rotas Tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU*. Rio de Janeiro. 237 pp.
- Jucá, J. F. T., Lima, J. D., Mariano, M. O. H., Firmo, A. L. B., Lima, D. G. A., Lucena, L. F. L., Farias, P. R. R., Junior, F. H. C., Carvalho, E. H., Ferreira, J. A., Reichert, G. A. (2014) Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. *Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE*, Recife-PE.
- Johnke, B. (2002) Emissions from waste incineration: good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 455-468.
- Lombardi, L., Carnevale, E., Corti, A. (2015) A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, (37), 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>
- Luiz, B., Suski, C. A. (2021) Avaliação da geração de gases de efeito estufa em diferentes tratamentos de resíduos domiciliares – Estudo de caso em Florianópolis-SC. *Metodologias e Aprendizado*. (4), 89–98. <https://doi.org/10.21166/metapre.v4i.1489>
- Machado, F. L. O., Magalhães, G. V. V., Lima, A. C. A., Albuquerque, P. C., stefanutti, R., Albuquerque, L. (2021). Valorização dos resíduos orgânicos através da biodigestão anaeróbica com a utilização da análise multivariada. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, **7**(1), p.4893-4903.
- Melquíades, T.F., Carvalho, M., Araújo, Y. R. V., Coelho Junior, L. M. (2019) Pegada de carbono associada ao processo de pasteurização de sorvetes. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá-PR. **12**(2), 609-629. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p609-629>
- Piaia, E., Castilhos Júnior, A. B., Nadaleti, W. C., Silva, C. S., Haertel, P. L. (2021) Potencialidades do uso energético de combustíveis derivados de resíduos sólidos urbanos (CDRU) na indústria brasileira. *Anais. IV Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos – CONRESOL*. Gramado-RS.
- REDEACV. Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida. (2017) Combustível Derivado de Resíduos: ACV Comparativa. *Estudos e Casos Empresariais*. Votorantim Cimentos. São Paulo-SP.
- Rocha, M. R., Lemme, R. F. F., D'agosto, M. A. (2014) Inventário de ciclo de vida das emissões de CO2 do pneu inservível como combustível em fornos de cimenteiras. *Anais. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA)*.

- Sampaio, R. P. (2014) *Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana*. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 162 pp.
- Soares, E.L.S.F. (2011) *Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos*. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro-RJ. 133 pp.
- SIMAPRO, PRé Consultants. (2021) *Software Simapro, versão 9.2.0.2*. About SimaPro: The world's leading LCA software chosen by industry, research institutes, and consultants in more than 80 countries.
- Silva, V. A. O. (2021) *Aplicação de Avaliação de Ciclo de Vida na estimativa das emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao consumo de alimentos: Estudo de caso em Brasília*, DF. Dissertação. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília-DF, 289pp.
- Tavares, G. S. C. (2018) *Contribuição para a sustentabilidade na gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios da Região Metropolitana*. Dissertação. Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 124pp.
- Thakur, P., Ganguly, R., Dhulia, A. (2018) Occupational Health Hazard Exposure among municipal solid waste workers in Himachal Pradesh, India. *Waste Management*, (78), 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.waSiMAAn.2018.06.020>
- Verschoor, A. H., Reijnders, L. (1999) The use of life cycle methods by seven major companies. *Journal of Cleaner Production*, (7), 375-382.
- Visedo, G., Pecchio, M. (2019) ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 64 pp.

REVISTA AIDIS

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

VIGILÂNCIA DA QUALIDADE DA ÁGUA TRATADA USANDO O SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) NO MUNICÍPIO DE BELÉM, PARÁ, BRASIL

* Fábio Sérgio Lima Brito ¹
Karoline da Costa Barros ²
Claudinei Rodrigues de Aguiar ³

SURVEILLANCE OF TREATED WATER QUALITY USING THE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS) IN THE MUNICIPALITY OF BELÉM, PARÁ, BRAZIL

Recibido el 29 de enero de 2024. Aceptado el 9 de abril de 2024

Abstract

Safe drinking water is an essential human right for all segments of society. In this sense, the water quality surveillance program for human consumption (VIGIAGUA) aims to promote the collective and preventive health of the population in order to reduce the aggravation of diseases related to water transmission, through the management of risks related to the water supply system. In this context, the present study aimed to specialize and analyze the quality data of treated water in the municipality of Belém-PA-Brazil, located in the Amazon region of the State of Pará, using the Geographic Information System (GIS) tool. The methodology was divided into three main stages: initially, data from the Water Quality Surveillance Information System (SISAGUA) were consulted; subsequently, the service goals were evaluated with the coverage of the water supply system and verification of compliance with the sampling plan required by VIGIAGUA. In addition, thematic maps were prepared comparing the results with the potability standards required by current legislation. The results for the basic parameters indicated that the turbidity was in accordance with the value of 5 uT for waters from surface water abstraction and 1 uT for groundwater as required by Ordinance n. 888, of May 4, 2021, of the Ministry of Health (MS). On the other hand, the variables of free residual chlorine, total coliforms and *Escherichia coli* showed "VERY POOR" performance due to the alteration of the water distributed to the population. Therefore, this scenario of vulnerability puts the health of the population at risk due to the physical, chemical and microbiological contamination of the water in the public supply system of the municipality of Belém, pointing to the need for emergency public policies so that the potability standard is met.

Keywords: public water supply, treated water, water quality, fulfillment goals, VIGIAGUA.

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

² Universidade Federal do Pará, Câmpus Belém, Brasil.

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, Brasil.

* Autor correspondente: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-010 – Brasil. Email: fabibrito@ufmg.br

Resumo

A água potável e segura é um direito humano imprescindível para todos os segmentos da sociedade. Nesse sentido, o programa de vigilância da qualidade da água para consumo humano (VIGIAGUA) visa promover a saúde coletiva e preventiva da população de forma que se diminuam os agravos de doenças relacionadas à transmissão hídrica, por intermédio da gestão de riscos referentes ao sistema de abastecimento de água. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo espacializar e analisar os dados de qualidade da água tratada do município de Belém, situada na região amazônica do Estado do Pará-Brasil, usando a ferramenta de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A metodologia foi dividida em três principais etapas: inicialmente, foram consultados os dados do Sistema de Informação de Vigilância de Qualidade da Água (SISAGUA); posteriormente, foi avaliada as metas de atendimento com a cobertura do sistema de abastecimento de água e verificação do cumprimento ao plano de amostragem exigidos pelo VIGIAGUA. Além disso, foram elaborados mapas temáticos comparando os resultados com os padrões de potabilidade exigidos pela legislação vigente. Os resultados para os parâmetros básicos apontaram que a turbidez estava em conformidade com o valor de 5 uT para águas provenientes de captação de águas superficiais e 1 uT para águas subterrâneas, conforme o requerido pela Portaria de nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde (MS). Por outro lado, as variáveis de cloro residual livre, coliformes totais e *Escherichia coli* apresentaram desempenho “PÉSSIMO” em virtude da alteração da água distribuída à população. Portanto, esse cenário de vulnerabilidade coloca em risco a saúde da população devido à contaminação física, química e microbiológica da água do sistema de abastecimento público do município de Belém, apontando a necessidade de políticas públicas emergenciais para que o padrão de potabilidade seja atendido.

Palavras-chave: água de abastecimento público, água tratada, qualidade da água, metas de atendimento, VIGIAGUA.

Introdução

A Organização das Nações Unidas (ONU) reconheceu em 2010 o direito humano à água e ao saneamento como um elemento básico a toda população mundial, independentemente do país, da política, da religião, da cultura ou da economia, todos devem ter acesso a um suprimento adequado de água (Aleixo *et al.*, 2019). Todavia, de acordo com a ONU (2020), aproximadamente 2.1 mil milhões de pessoas não têm acesso aos serviços de água potável e 4.5 mil milhões carecem de serviços de saneamento.

Em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, aproximadamente 84.9% da população é atendida com água tratada. Ao analisar as regiões do país, constata-se que são grandes as disparidades, pois os maiores déficits são para as regiões Norte e Nordeste que obtêm índice de atendimento com abastecimento de água de 64.2% e 76.9%, enquanto as regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste obtêm cobertura de 89.8%, 91.6% e 90.9%, respectivamente (Sinisa, 2022).

Nesse sentido, além dos serviços de abastecimento de água potável não serem universalizados, ainda existe uma enorme preocupação com a qualidade da água distribuída à população por parte dos gestores, pois as doenças de veiculação hídrica ainda são uma das principais causadoras de internações hospitalares (Ferreira *et al.*, 2021).

Segundo o Instituto de Geografia e Estatística – IBGE (2021), as doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado (DRSAI) são: diarreia, hepatite A, febres entéricas, dengue, febre amarela, filariose linfática, leishmanioses, malária, doença de chagas, esquistossomose e leptospirose. Segundo o Trata Brasil (2020), mais de 273 mil casos de internações foram ocasionados devido à falta de acesso aos serviços de saneamento básico.

A água para consumo humano deve ser potável e não apresentar riscos à saúde, de forma que se evite a ocorrência de doenças à população (De Queiroz de Oliveira, 2018; De Souza et al., 2018). Segundo Brito *et al.*, (2021-a) quando a água não recebe os tratamentos adequados e sua potabilidade não é avaliada corretamente, micro-organismos podem acabar se proliferando, promovendo o aparecimento de várias doenças.

Para Brito *et al.*, (2019), as Estações de Tratamento de Água (ETAs) e os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) correspondem a uma das principais obras de engenharia para promoção da saúde e do bem-estar da população no contexto do saneamento básico. Assim, nesses sistemas, a água passa por tratamento garantindo os padrões estéticos e sanitários, para que, posteriormente, sejam distribuídas à população com o objetivo de melhorar a salubridade ambiental.

De Queiroz de Oliveira (2018) ressaltam que, nos aglomerados urbanos, a infraestrutura é mínima, ocasionando um cenário de falta de água encanada e/ou tratada. Essa é uma realidade do cotidiano de várias cidades, onde o fornecimento do serviço é intermitente ou insuficiente, levando os usuários a realizarem o racionamento compulsório ou procurar fontes de águas inseguras.

A contaminação da água tratada nos SAA pode ocorrer no sistema de distribuição, armazenamento ou na rede geral (AKHTAR *et al.*, 2019). Assim, a sua qualidade deve ser avaliada por uma ampla variedade de parâmetros físico-químicos e microbiológicos (De Morales *et al.*, 2020). Sabendo disso, o governo brasileiro criou em 2005, o programa VIGIAGUA, o qual consiste em ações contínuas realizadas pelas autoridades de saúde pública para garantir a qualidade da água potável e o cumprimento dos padrões estabelecidos na legislação vigente para avaliar os riscos que a água de fontes públicas e/ou alternativas pode representar para a saúde humana (Faria *et al.*, 2021).

A principal ferramenta do VIGIAGUA é o Sistema de Informações de Monitoramento da Qualidade da Água para Consumo Humano (SISAGUA) que é um banco de dados disponibilizado pelo Ministério da Saúde (MS) do Brasil. O foco é criar uma ferramenta capaz de auxiliar no gerenciamento de riscos à saúde relacionado ao abastecimento de água disponível para consumo humano no país (Oliveira Júnior *et al.*, 2019).

No Brasil, o padrão de potabilidade é regulamentado pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, do MS, a qual dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021). Logo, é um marco legal importante, pois foram regulamentadas políticas institucionais para promoção da saúde pública.

De acordo com Queiroz *et al.*, (2012), são poucos os estudos que analisaram as informações geradas pelo SISAGUA. Apesar dessa constatação pretérita, o número de publicações vem crescendo paulatinamente. Vasconcelos *et al.*, (2016) avaliou água potável na Amazônia Legal (Amapá, Amazonas e Maranhão); Santana *et al.*, (2021) analisou a qualidade da água no Estado do Amazonas. Faria *et al.*, (2021) verificou a potabilidade das águas distribuídas na região metropolitana do Rio de Janeiro. Por sua vez, Gomes *et al.*, (2022) propôs uma metodologia para análise estatística de dados de monitoramento do SISAGUA.

Nesse contexto, faz-se necessário avaliar a potabilidade da água distribuída à população de Belém-PA, visando melhorar o sistema de gestão e vigilância da sua qualidade. Dessa maneira, o Sistema de Informação Geográfica (SIG), é uma ferramenta de geoprocessamento que pode auxiliar no sistema de informação, uma vez que facilita a representação dela ao resumir uma grande quantidade de dados por meio da elaboração de mapas temáticos espaciais, tabelas e imagens digitais que retratam uma determinada realidade (Ramadan *et al.*, 2019).

Portanto, o presente trabalho tem por objetivo espacializar os dados de qualidade da água tratada no município de Belém, utilizando a ferramenta SIG, com base no banco de dados do SISAGUA, analisando os parâmetros básicos de turbidez, cloro residual livre, coliformes totais e *Escherichia coli* (*E.coli*). Esse estudo pode auxiliar ainda na gestão dos recursos hídricos tornando-se um importante instrumento para a tomada de decisões dentro das políticas públicas de saneamento da cidade.

Metodologia

Caracterização da área de estudo

O município de Belém, capital do Estado do Pará (Figura 1) está localizado na Mesorregião Metropolitana de Belém (PMB, 2020). O município tem uma população estimada de 1,303,403 para o ano de 2023, uma densidade demográfica de 1,315.26 hab/km² e uma área territorial equivalente a 1,059.458 Km², com índice de desenvolvimento humano (IDH) de 0.746, considerado alto (IBGE, 2023).

De forma geral, Belém se caracteriza como clima quente e úmido devido a sua baixa altitude, topografia plana e vegetação densa. O tipo climático é classificado como tropical úmido de

floresta e tem temperatura entre 26° e 28°C, além de alto índice pluviométrico, com média anual de 2.889 mm nas proximidades do rio Amazonas. Situa-se nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 01° 23' 06" ao sul e longitude 48° 29' 05" a oeste de Greenwich (PMB, 2020).

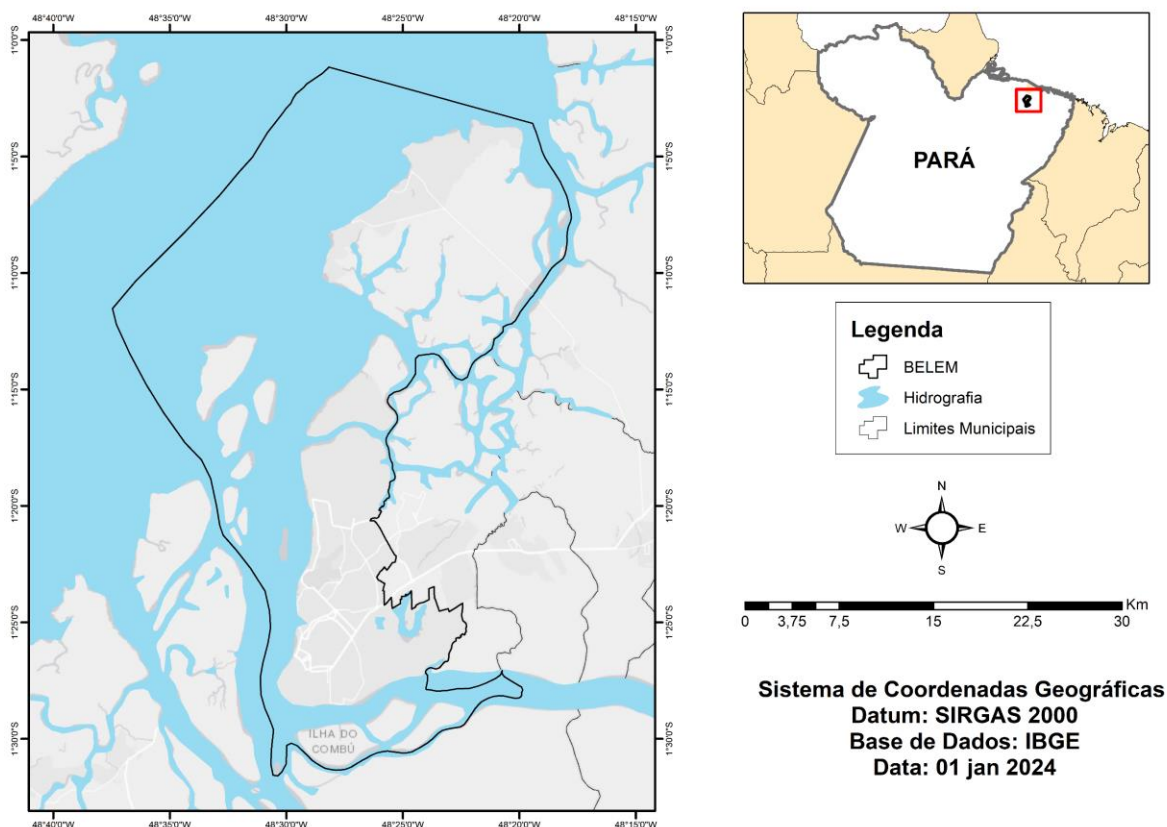


Figura 1. Mapa de localização do Município de Belém, Estado do Pará, Brasil. Fonte: Autores, 2024.

Base de dados

Os dados da cobertura com abastecimento de água foram extraídos da série histórica do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) para os anos de 2014 a 2022, com análise para cada dois anos visando identificar as mudanças nos índices de atendimento do serviço prestado à população. Na tabela 1, estão as informações relacionadas à zona de localização, os bairros e os tipos de captação que os abastecem, segundo o plano municipal de saneamento do município de Belém (2020).

Tabela 1. Zonas de localização, bairros e seus respectivos tipos de captação

Zonas	Bairros	Tipo de captação
Central	Batista Campos, Campina, Canudos, Castanheira, Cidade Velha, Condor, Cremação, Curió-Utinga, Fátima, Guamá, Jurunas, Marambaia, Marco, Nazaré, Pedreira, Reduto, Sacramento, São Brás, Souza, Telégrafo, Terra Firme e Umarizal.	Superficial
Expansão	Águas Lindas, Águas Negras, Agulha, Benguí, Cabanagem, Coqueiro, Mangueirão, Maracangalha, Paracurí, Parque Guajará, Parque Verde, Pratinha, Souza, Tapanã, Tenoné e Val-de-Cães.	Subterrânea

Fonte: PMSB, 2020.

Os dados de qualidade da água foram oriundos do SISAGUA, que é público e de livre acesso, disponível no portal de dados abertos. O endereço eletrônico: <https://dados.gov.br/home> disponibilizado pelo Governo Federal brasileiro. O período escolhido foi de 2014 a 2022, pois correspondem aos anos que possuem dados. O programa VIGIAGUA recomenda uma avaliação em termos de indicadores institucionais, ou seja, é necessário verificar o número de amostras realizadas e o número mínimo de amostras obrigatórias exigidas pelo setor de saúde. Essa análise visa identificar se o programa é efetivo para o monitoramento da vigilância da qualidade da água na localidade em questão.

Ademais, os dados para a cidade de Belém foram extraídos, uma vez que a base de dados contempla todo o Brasil. Os parâmetros básicos analisados foram: turbidez, cloro residual livre, coliformes totais e *E.coli* por apresentarem maior periodicidade no monitoramento. Assim, foram contabilizados 10.426 (dez mil, quatrocentos e vinte e seis) análises realizadas com mais de 5.000 (cinco mil) pontos de coleta e amostragem que foram catalogados e transferidos para o *software* Excel para realização do tratamento das informações.

Análise dos dados

Cada parâmetro físico-químico e microbiológico, coletado no banco de dados, foi analisado mediante as faixas de classificação que variam com pontuação 0 (zero), a qual retrata a pior situação, e 100 (cem) como a melhor, de acordo com a metodologia de Braga *et al.*, (2022), disposto na Tabela 2.






Os parâmetros de qualidade da água foram categorizados não somente pela pontuação, mas também foram catalogados conforme o desempenho, que variou de péssimo a excelente, os quais foram representados por cores conforme a tabela 3, para melhor visualização dos dados. Além disso, utilizou-se o *software* QGIS versão 3.34.2 para a elaboração dos mapas temáticos para uma melhor visualização dos resultados.

Tabela 2. Qualidade da água de acordo com parâmetros físico-químico e microbiológico

Parâmetro	Fórmula	Pontuação
Turbidez	$\frac{\text{Número de amostras dentro do padrão}}{\text{Número total de amostras}} * 100$	Amostra = 100% - Pontuação 100
Cloro residual	$\frac{\text{Número de amostras dentro do padrão}}{\text{Número total de amostras}} * 100$	Amostra= 95% a 100% - pontuação 80
Coliformes totais	$\frac{\text{Número de amostras com ausência de coliformes}}{\text{Número total de amostras}} * 100$	Amostra= 85% a 95% - pontuação 60
<i>E. Coli</i>	$\frac{\text{Número de amostras com ausência de E. Coli}}{\text{Número total de amostras}} * 100$	Amostra= 70% a 85% - pontuação 40
		Amostra= 50% a 70% - pontuação 20
		Amostra= < 50% - pontuação 0

Fonte: Braga et al. (2022).

Tabela 3. Avaliação da qualidade da água dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos

Pontuação	Classificação	cor
20	Péssimo	
40	Ruim	
60	Regular	
80	Bom	
100	Excelente	

Fonte: adaptado de (Veiga, 2010).

Resultados e discussão

Cobertura com abastecimento de água

Na Figura 2, estão dispostos os dados referentes à cobertura com o serviço de abastecimento de água no município de Belém. Nesse contexto, constatou-se que, no ano de 2014, o atendimento era de 90.89% com bom progresso com vista à universalização em virtude do alto índice com rede de abastecimento de água tratada. Nos anos posteriores, houve um decaimento no fornecimento do serviço para 74% e em 2022 o índice de atendimento voltou a aumentar progressivamente para 95.52%.

A redução na cobertura do serviço pode estar relacionada a dois principais fatores: (i) aumento populacional, o que demanda por mais água potável; (ii) constantes reparos na ETA Bolonha desde o ano de 2018, o que provoca um cenário de vulnerabilidade ao acesso à água. Portanto, observa-se que são necessários recursos técnicos, econômicos e de gestão para universalização do serviço de abastecimento no município.

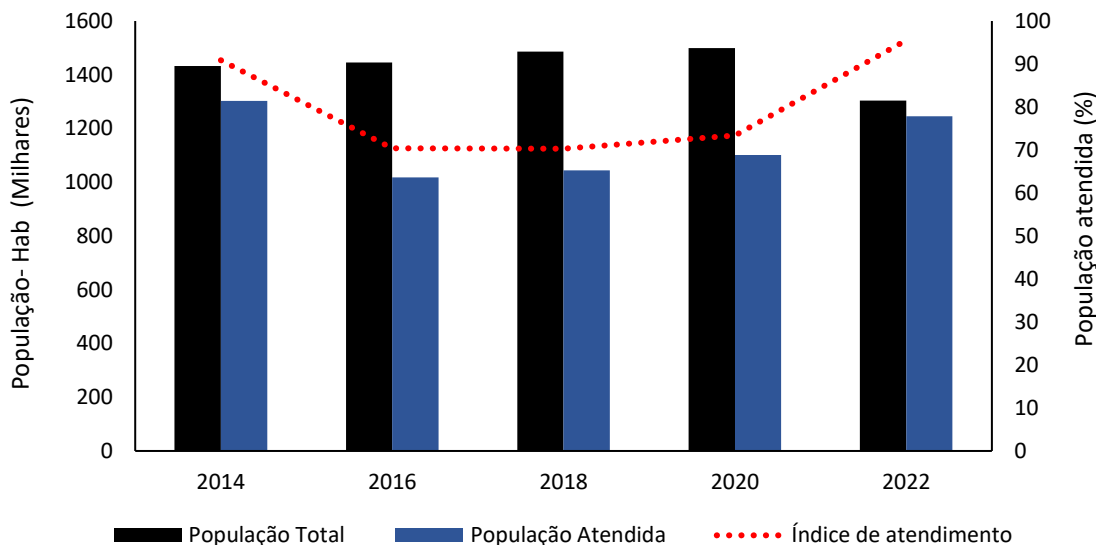


Figura 2. Índice de cobertura com abastecimento de água no município de Belém, PA, BR. *Fonte: Adaptado de Sinisa, 2022.*

Na pesquisa de Rodrigues e Szlafsztein (2021), foi constatado que, entre os anos de 2014 e 2020, foram 587 registros de falta de água na cidade de Belém-PA. O índice de insegurança hídrica proposto pelos autores revelou que os principais problemas estavam relacionados a vazamentos nas tubulações, problemas elétricos e manutenção na rede de abastecimento de água, ocasionando uma frequência de falta de água de até um dia nos domicílios.

Ademais, é oportuno mencionar que, segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém – (PMSB) - (2020), é difícil quantificar expressamente o percentual de abastecimento, visto que há inconsistência nas informações. Logo, o percentual pode ser superior, devido a existência de muitas ligações irregulares nas áreas periféricas da cidade.

Metas de atendimento ao programa VIGIAGUA

O VIGIAGUA é regimentado pela diretriz nacional do plano de amostragem da vigilância da qualidade da água para consumo humano. Nesse documento, são abordados os parâmetros a serem analisados, a frequência de amostragem e o quantitativo mínimo de amostras, bem como as orientações para a seleção dos pontos de coleta em cada cidade (Brasil, 2016). Essas ações visam a prevenção e a promoção da saúde da população utilizando a ferramenta de vigilância em saúde ambiental.

Nesse sentido, é importante verificar se o número de análises exigidas pela legislação, considerando o número de habitantes, é atendida pelo município de Belém. Ao analisar a Figura 3, verificou-se

que somente no ano de 2014 e 2018 a meta de atendimento não foi alcançada, pois o percentual foi de 46.35% e 52.99%, respectivamente, uma vez que a quantidade de amostras exigidas não foi cumprida pelo órgão de saúde, que é o responsável pela vigilância da qualidade da água. Nos anos consecutivos, o percentual foi acima de 90%, apresentando uma boa performance, em virtude do adequado monitoramento da qualidade da água distribuída à população.

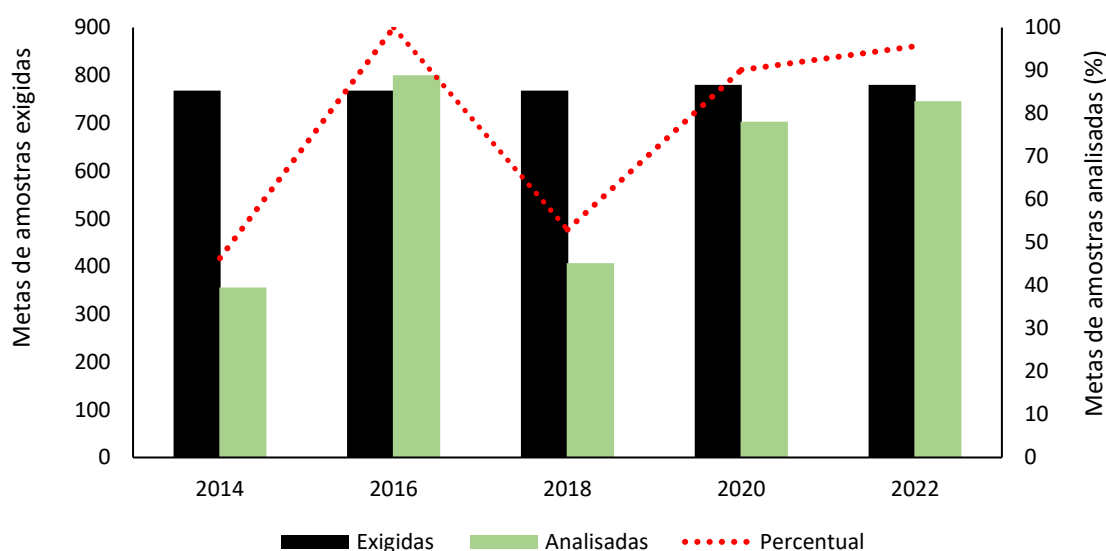


Figura 3. Metas de atendimento ao programa VIGIAGUA no município de Belém. *Fonte: Autores, 2024.*

Vale ressaltar, que a verificação do cumprimento do número de análises realizadas em função da quantidade exigida, possibilita que os gestores responsáveis pela vigilância em saúde ambiental façam uma avaliação da atual conjuntura dos municípios e possam traçar estratégias para aperfeiçoar o monitoramento da qualidade da água, aumentando, conseqüentemente, a capacidade do VIGIAGUA em inferir sobre a qualidade da água consumida pela sociedade (Brasil, 2019-a).

Um importante aspecto observado foi que os pontos de coleta e amostragem da qualidade das águas do sistema de distribuição foram principalmente em estabelecimentos de ensino, unidades básicas de saúde (UBS) e condomínios. O que é positivo, pois mostra que o procedimento de amostragem é representativo ao priorizar os sistemas coletivos com maior circulação de pessoas, além de seguir as recomendações do plano de amostragem do MS.

No banco de dados do SISAGUA, constatou-se que o monitoramento da vigilância da qualidade da água tem dois principais focos: o primeiro é preventivo e rotineiro, visando avaliar os riscos à saúde humana por meio da construção de uma ferramenta epidemiológica. O segundo é garantir que a água consumida pela população atenda ao padrão de potabilidade exigida pela regulamentação vigente.

Um dos objetivos do programa VIGIAGUA é manter a população informada sobre a qualidade da água distribuída em decorrência dos riscos à saúde pela ingestão de água contaminada (Brasil, 2020). Dessa maneira, as informações referentes à qualidade da água tratada deveriam ser disponibilizadas pela secretaria do município de Belém ou pelo órgão estadual de saúde pública. No entanto, não existe boletim analítico com os resultados da qualidade da água, o que impede a sociedade de tomar possíveis medidas preventivas, além de impossibilitar a participação social da população no processo de melhoria da democratização da água potável.

Qualidade da água distribuída nos bairros de Belém, PA, Brasil

O Programa VIGIAGUA tem como foco garantir à população o acesso à água com qualidade condizente com os valores de potabilidade instituídos na regulamentação vigente. Além disso, o programa visa direcionar a operacionalização da vigilância de maneira abrangente, considerando a execução das ações de forma descentralizada (Mata, 2022). Nesse sentido, a vigilância é feita pelo órgão de saúde municipal, estadual ou federal para identificar as fragilidades do sistema de abastecimento de água para que, posteriormente, possam ser tomadas as medidas corretivas.

Com relação a turbidez, constatou-se que houve uma variação na performance situacional, mas, de modo geral, foi verificado que a grande maioria dos bairros obteve um “BOM” desempenho por conta da alta pontuação, acima de 80% de amostras dentro dos padrões de potabilidade (Figura 4). A regulamentação de nº 888 de 2021, do Ministério da Saúde, determina que o Valor Máximo Permitido (VMP) para turbidez é de 5 uT na rede de distribuição e 1 uT para água proveniente de manancial subterrâneo. Portanto, as amostras atendem as exigências dos limites estabelecidos pela legislação.

Apesar desse resultado positivo, houve bairros como os do Coqueiro, Tenoné e Benguí que apresentaram performance variando de “REGULAR” para “PÉSSIMO” desempenho. Esse resultado significa dizer que os valores dos pontos monitorados pelo VIGIAGUA estão acima do valor referência estipulado pela legislação. Além disso, foi verificado que todos os bairros apresentaram pontos críticos e/ou vulneráveis, apontando que o tratamento empregado é inadequado e/ou ineficiente.

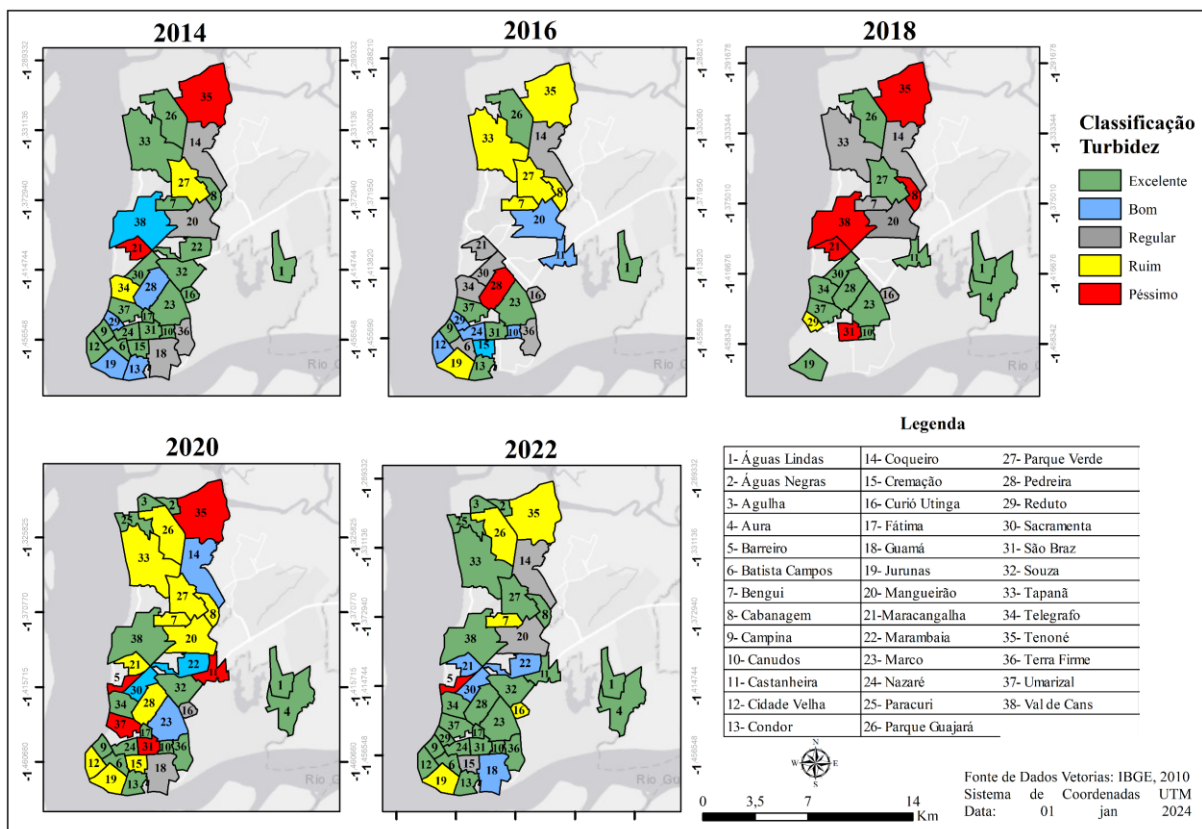


Figura 4. Mapa da distribuição espacial de turbidez nos bairros do município de Belém (2014-2022). Fonte: Autores, 2024.

É válido mencionar que a turbidez é uma variável estética, mas também pode ser um indicador sanitário e padrão organoléptico, visto que, em altas concentrações, indicam falhas no seu tratamento. Além disso, pode afetar o processo de desinfecção da água, porque os micro-organismos patogênicos podem ficar protegidos nessas partículas causadoras de turbidez, impedindo o contato com o agente desinfetante (Brito *et al.*, 2019).

Na pesquisa de Santana *et al.*, (2021), os autores constataram que o aumento da turbidez pode ser provocado por falhas na rede de distribuição da água, ocasionada por rompimentos na tubulação e formação de biofilmes que propiciam um ambiente favorável para proliferação de patógenos como *Legionella*, *Pseudomonas* e *micobactérias*. Por isso, é fundamental que as redes de abastecimento de água apresentem baixa turbidez visando assegurar que a água distribuída à população seja adequada para o consumo humano.

Nesse viés, a água potável é um direito humano preconizado pela ONU para toda a população. Assim, o percentual de violação ao padrão de qualidade da água requerida foi calculado nos bairros do município de Belém. Na Figura 5, estão os resultados do percentual de violação aos padrões de qualidade da água para turbidez.

Nesse sentido, foi constatada uma baixa variação nos dados, indicada pelas baixas amplitudes interquartis, sendo que houve algumas exceções nos bairros Parque Guajará, Tenoné e Val-de-Cães, que apresentaram as maiores variações (Figura 5). Um importante aspecto é que a água tratada com valores acima de 0,3 uT pode conter oocistos de *Cryptosporidium* (Melo *et al.*, 2021).

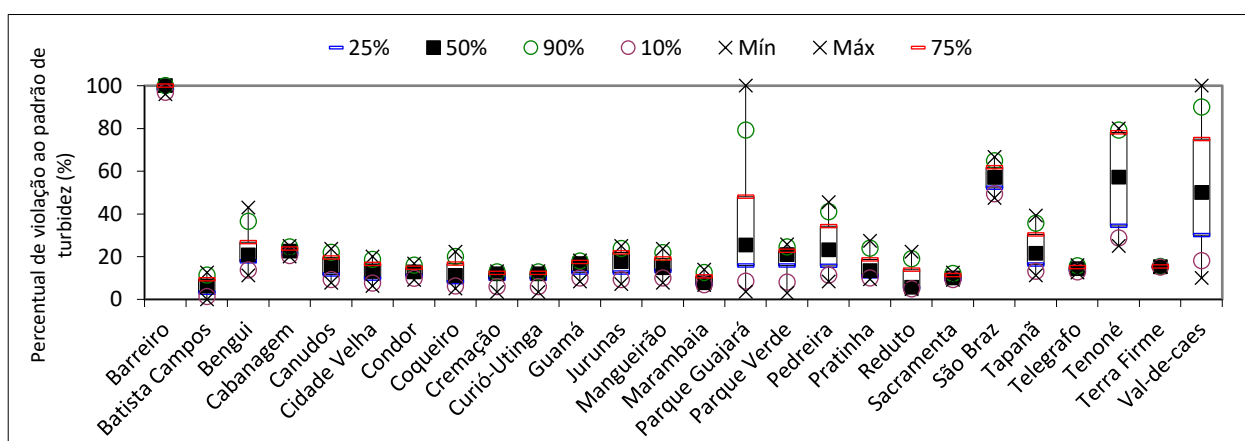


Figura 5. Box-plot do percentual de violação ao padrão de turbidez nos bairros de Belém (2014 a 2022).
Fonte: Autores, 2024.

Outrossim, protozoários como *Giardia* e *Cryptosporidium* são causadores de infecções intestinais e possuem alta resistência à cloração. Assim, a turbidez pode ser um indicador da eficiência de remoção desse patógeno (Andreoli Sabogal-Paz, 2019). Portanto, todos os bairros apresentaram riscos, uma vez que todas as amostras com desconformidade estavam acima de 5 uT para água proveniente de captação superficial e 1 uT para água subterrânea.

Em relação ao parâmetro de cloro residual livre, essa variável mede a quantidade de cloro presente na rede de distribuição, após o processo de desinfecção da água. A Portaria n° 888 de 2021 estabelece o valor máximo permitido de 2 mg/L e mínimo de 0,2 mg/L (Brasil, 2021). Dessa maneira, ao observar o mapa de distribuição de cloro livre residual nos bairros da cidade de Belém-PA, constatou-se que a classificação foi de “PÉSSIMO” desempenho em virtude de mais de 50% das amostras apresentarem ausência de cloro no sistema de distribuição (Figura 6).

Além disso, no ano de 2014 e 2016, os bairros ainda apresentavam de 20% a 40% de cloro residual livre na rede de água da companhia de saneamento nos bairros do Souza, Marambaia e Umarizal. Vale ressaltar que esses bairros são considerados economicamente como de classe média, e como a concessionária de saneamento possui redes constituídas de diferentes materiais, tais como: polietileno de alta densidade (PEAD) e amianto reforçado com ferro, o decaimento do cloro pode apresentar variações. Além disso, a distância do reservatório até o local de consumo e o diâmetro da tubulação também ocasionam variações nas concentrações de cloro residual livre.

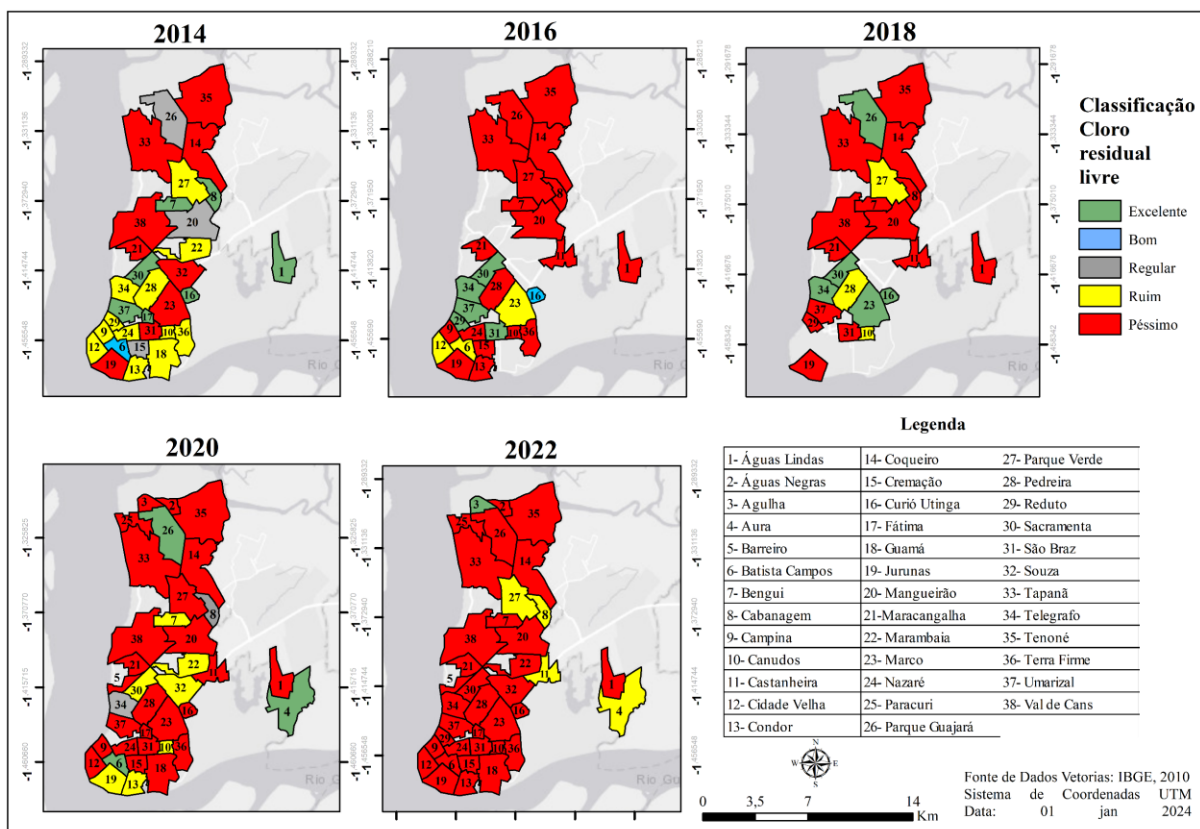


Figura 6. Mapa da distribuição espacial de cloro residual livre nos bairros do município de Belém (2014-2022).
Fonte: Autores, 2024.

De maneira geral, constatou-se que a menor violação ao padrão de cloro residual foi evidenciada nos bairros da Sacramento e de Nazaré, enquanto os maiores percentuais de violação foram nos bairros das

Águas Negras e Castanheira, ou seja, os bairros com maior vulnerabilidade socioeconômica são os que mais sofrem com a precariedade do serviço público de abastecimento de água (Figura 7).

Os bairros de Águas Lindas, Benguí, Águas Negras, Castanheira, Coqueiro, Mangueirão, Maracangalha e Pratinha apresentaram pelo menos 75% dos dados fora dos padrões estipulados pela legislação. Ressalta-se que a grande maioria desses bairros estão localizados na zona de expansão do município e possuem tratamento simplificado com aplicação de cloro.

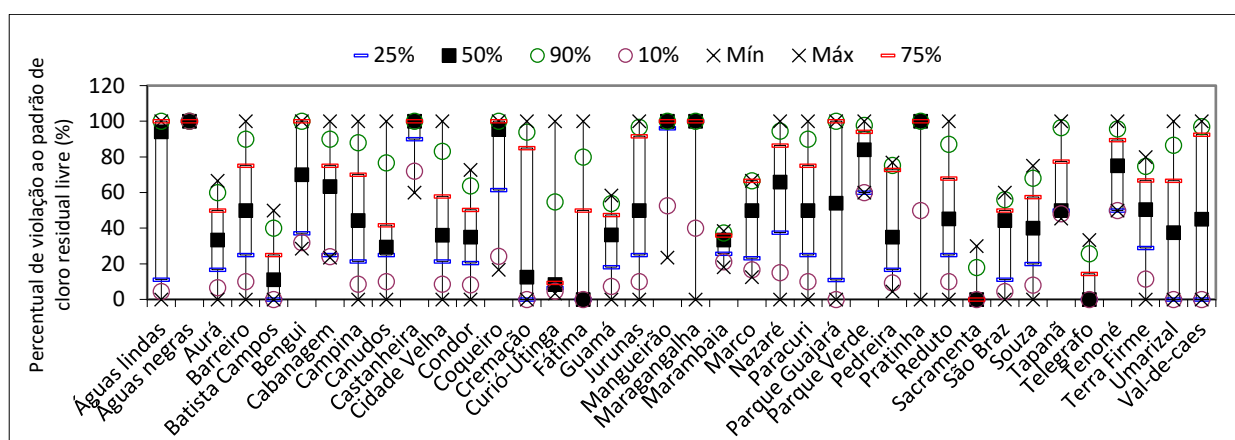


Figura 7. Box-plot do percentual de violação ao padrão de cloro residual livre nos bairros de Belém (2014 a 2022).
Fonte: Autores, 2024.

O padrão de cloro residual livre é importante para garantir a desinfecção da água, uma vez que grande parte dos micro-organismos potencialmente patogênicos são eliminados pela sua ação desinfetante. Um grande problema das redes de abastecimento de água do município de Belém são as ligações clandestinas (Brito *et al.*, 2021-b). Vale dizer que essas ligações ilegais comprometem a qualidade da água distribuída pela companhia de saneamento devido a contaminação por compostos orgânicos e inorgânicos. Desse modo, como as águas apresentaram alto percentual de violação, a quantidade de cloro residual na rede está fora dos padrões preconizados pela Portaria do MS.

No que diz respeito à distribuição espacial da qualidade da água para o padrão de coliformes totais, a legislação de nº 888 de 2021, determina ausência em amostras com 100 mL de água. Desse modo, ao analisar a Figura 8, constatou-se que houve uma piora na qualidade da água tratada ao longo dos anos, o que pode estar relacionado com o melhor monitoramento e efetivação do programa VIGIAGUA no município de Belém, uma vez que em 2014 o programa estava em fase de consolidação e não cumpriu as metas estabelecidas no plano de amostragem.

Além disso, os reparos na ETA Bolonha durante os anos de 2017 a 2020 podem ter contribuído para o cenário de deterioração da qualidade da água nos bairros abastecidos por captação superficial. Um outro importante aspecto a ser analisado é que a tubulação de distribuição de água da companhia de saneamento da cidade é de material de amianto reforçado com aço e, devido à falta de manutenção das redes ao longo dos anos, a tubulação entra em oxidação ocasionando alterações na qualidade da água que chega aos usuários.

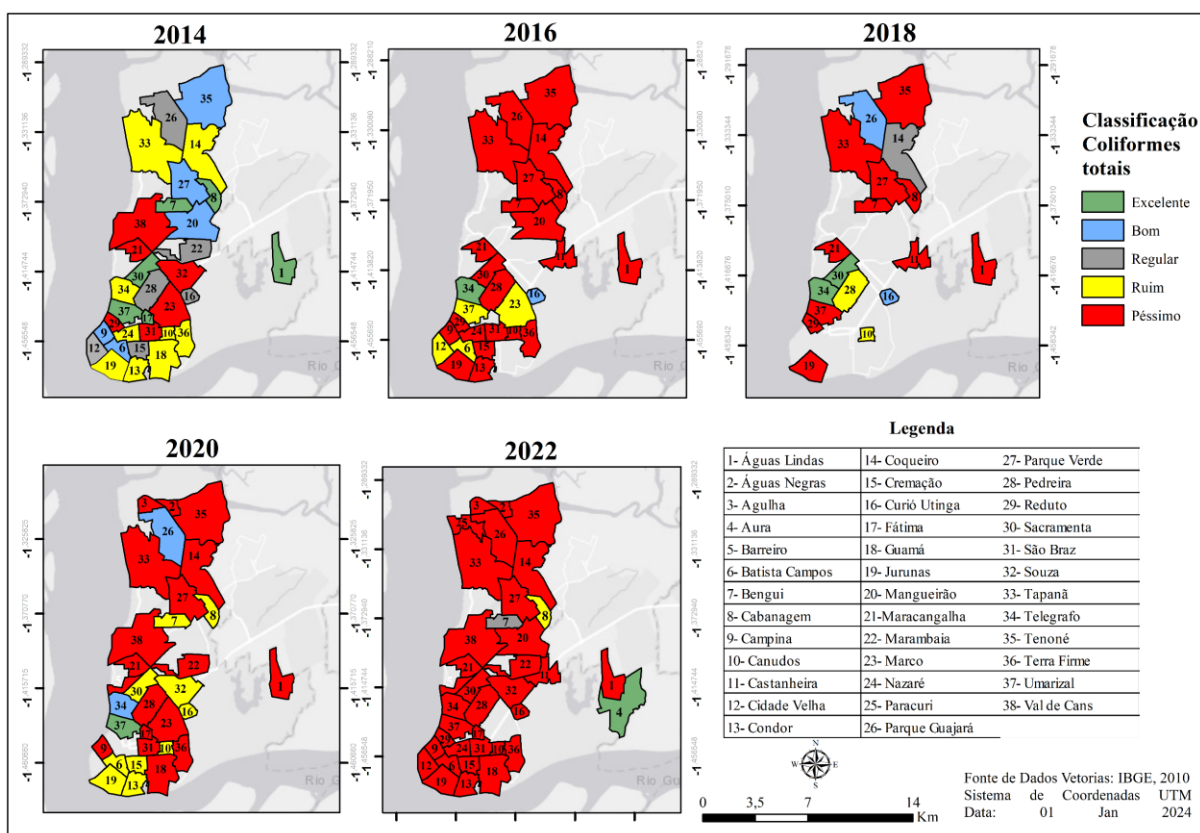


Figura 8. Mapa da distribuição espacial de coliformes totais nos bairros do município de Belém (2014-2022).
Fonte: Autores, 2024.

Na pesquisa De Moraes *et al.*, (2018), os autores destacaram que a presença de coliformes totais indica condições higiênico-sanitárias inadequadas e tem como consequência o alto risco de transmissão de doenças de veiculação hídrica. Essas bactérias abrangem ainda os seguintes gêneros: *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella* e *Escherichia*, que causam infecções agudas por

conta da contaminação da água tratada (Alves *et al.*, 2018). Portanto, essa pode ser uma explicação plausível para o cenário de vulnerabilidade da água nos bairros da cidade de Belém.

No tocante a violação ao padrão de qualidade para coliformes totais, foi evidenciada uma discrepância de resultados na maioria dos bairros (Figura 9). Nos Bairros do Aurá e Barreiro, os resultados mostram que todos os dados atingiram o percentual de violação ao padrão de potabilidade. Além disso, bairros como Batista Campos e Telégrafo obtiveram uma redução de informações em desacordo com os valores apresentados pela regulamentação vigente.

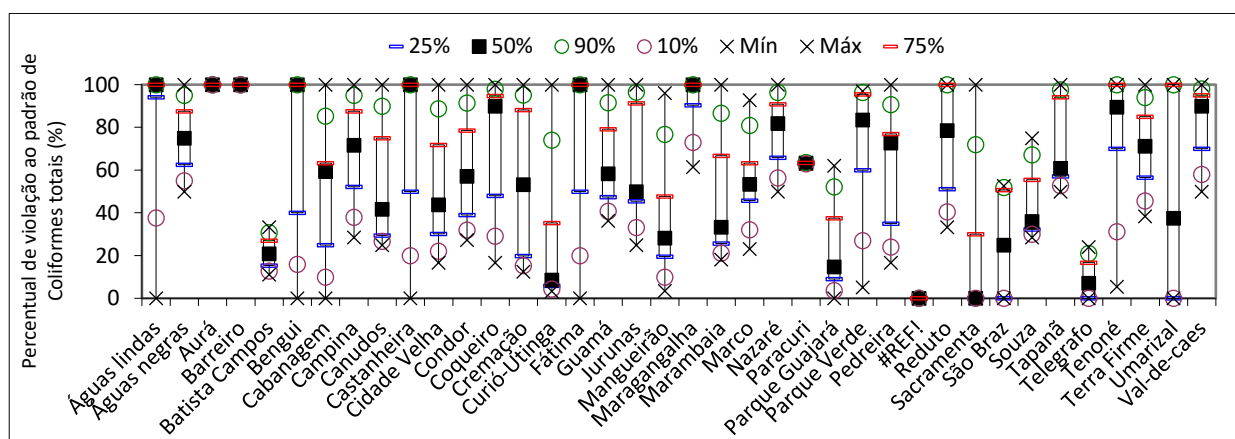


Figura 9. Box-plot do percentual de violação ao padrão de coliformes totais nos bairros de Belém (2014 a 2022).
Fonte: Autores, 2024.

No estudo de Reitter *et al.*, (2021), foi analisado que os coliformes totais se apresentam de forma natural no meio ambiente como na água, no solo e nas excretas de humanos ou de animais. Desse modo, somente a presença de coliformes totais não revela que a água está contaminada, mas pode indicar atuação de bactérias potencialmente patogênicas. Assim, Silva *et al.*, (2019) afirmou que “os coliformes totais não são úteis como indicadores de contaminação fecal, mas a sua presença na água pode ser utilizada para revelar a eficácia do tratamento, bem como evidenciar a limpeza e a integridade dos sistemas de distribuição”.

Além disso, quando forem detectadas amostras com resultados positivos, medidas corretivas devem ser tomadas pelo gestor do SAA e amostras devem ser coletadas em dias consecutivos até apresentar resultados de acordo com padrão exigido pela legislação (Brasil, 2021). Sendo assim, foi possível observar que, em alguns locais, houve resultados positivos para coliformes totais de modo a questionar se as ações corretivas para mudança de situação foram realmente implementadas.

Com relação ao parâmetro de *E.Coli*, constatou-se uma performance média classificada como “REGULAR” para o ano de 2014, enquanto que em 2022 a média foi de “PÉSSIMO” desempenho para qualidade da água (Figura 10). Logo, constatou-se que as águas consumidas pela sociedade, nesse período estavam contaminadas, ou seja, impróprias para o consumo humano. Esse fato pode comprometer seriamente a saúde da população, além de aumentar os agravos de possíveis surtos de doenças de veiculação hídrica na cidade.

Ainda é oportuno mencionar que o mapeamento dos bairros apontou um panorama de vulnerabilidade da água potável. Esse cenário diagnosticado demonstra que são necessárias intervenções públicas emergenciais para melhorar as condições sanitárias do município. Dessa forma, faz-se necessário que os gestores dos órgãos públicos em vigilância em saúde ambiental, juntamente com o corpo técnico da companhia de saneamento, se reúnam para traçar metas a curto, médio e longo prazo para solucionar os problemas dos sistemas de abastecimento do município.

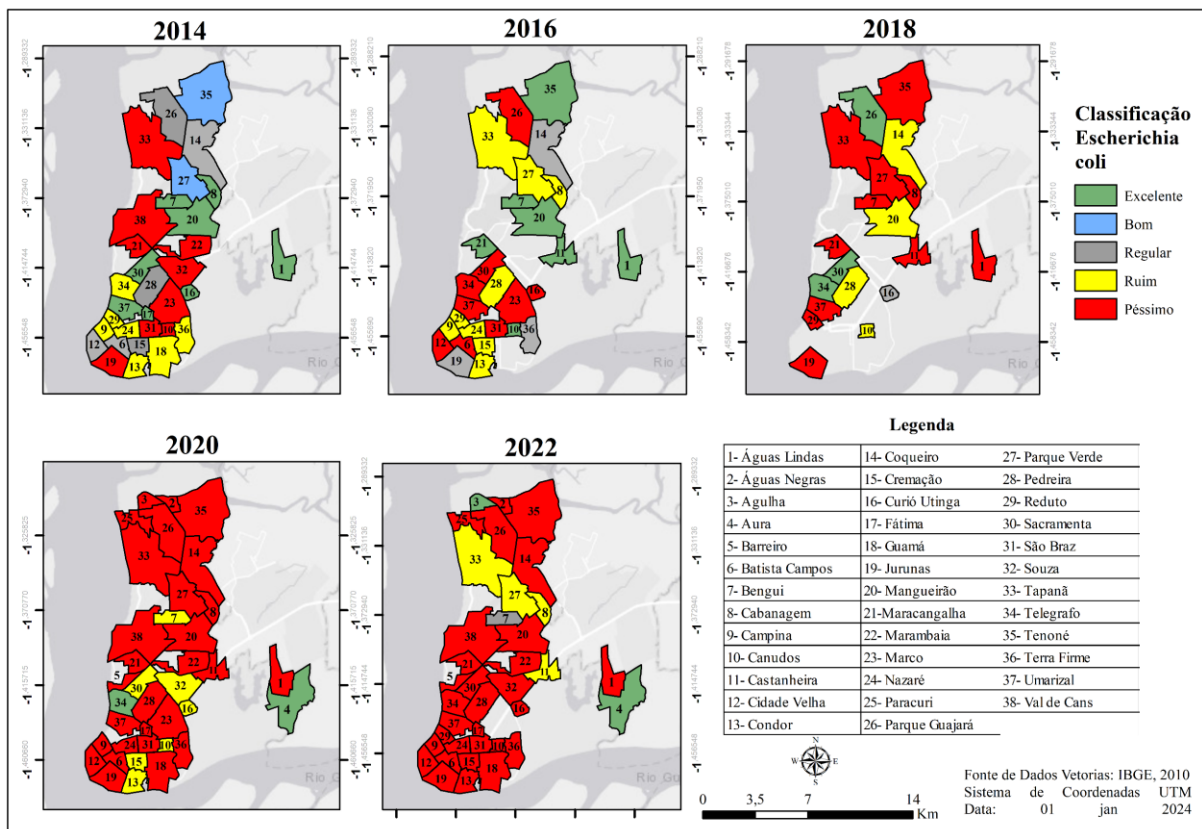


Figura 10. Mapa da distribuição espacial de *Escherichia coli* nos bairros do município de Belém (2014-2022).
Fonte: Autores, 2024.

De acordo com Brasil (2019-b), micro-organismos patogênicos devem estar ausentes na água tratada, além disso, não devem conter bactéria indicadora de contaminação fecal. Nesse caso, a *E. coli* é considerada indicador específico de contaminação fecal recente, sendo sua presença altamente prejudicial à saúde humana.

Nesse contexto, a vigilância e a avaliação microbiológica da água destinada ao consumo humano é um instrumento primordial para assegurar a qualidade e a segurança da saúde pública, já que os micro-organismos são os principais causadores de surtos de doenças, como a cólera, a diarreia, a disenteria, a hepatite A, a febre tifóide e a poliomielite (Colet *et al.*, 2021).

Nesse ínterim, no gráfico de Box-plot para *E. coli*, verificou-se uma alta variação nos dados, indicado pelas altas amplitudes interquartis, sendo que houve algumas exceções nos bairros Águas Negras, Barreiro, Aurá, Paracuri, Val-de-caes que apresentaram as menores variações (Figura 11). Nota-se também que os bairros Águas Negras e Reduto possuem conjunto de dados semelhantes ao gráfico box-plot de coliformes totais.

Na pesquisa de Silva *et al.*, (2019), foi alertado que um considerável número de *E.coli* são classificadas não patogênicas, porém, existem algumas cepas de bactérias que adquiriram fatores de virulência no processo mutação e ocasionam um sério risco à saúde humana. Assim sendo, constatou-se que ainda há uma quantidade significativa de bairros do município de Belém que estão em violação aos padrões estabelecidos pelo MS colocando em risco a saúde dos consumidores.

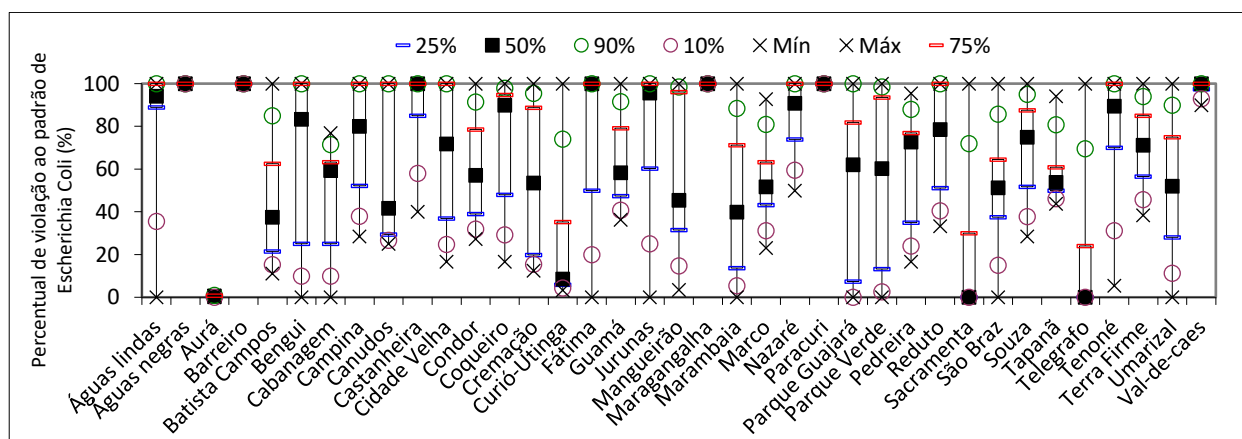


Figura 11. Box-plot do percentual de violação ao padrão de *Escherichia coli* nos bairros de Belém (2014 a 2022).
Fonte: Autores, 2024.

Conclusão

O programa VIGIAGUA do Ministério da Saúde é um mecanismo de monitoramento da qualidade da água potável que pode ser utilizado como um instrumento norteador para o melhoramento das políticas públicas em sistemas de abastecimento de água. Nesse contexto, por meio da utilização da ferramenta SIG, foi possível realizar a espacialização dos dados do SISAGUA para o município de Belém, localizado na região amazônica do Estado do Pará, Brasil.

Na avaliação dos parâmetros de qualidade da água, constatou-se uma melhora na Turbidez, enquanto as variáveis de Cloro residual livre, Coliformes Totais, e *E.Coli* evidenciaram-se um declínio, o que ficou classificado como “PÉSSIMO” desempenho situacional da água tratada, apontando comprometimento no tratamento da etapa de desinfecção. Além disso, os bairros vulneráveis socialmente mostraram-se, em maioria, com grande desacordo aos padrões estabelecidos pela Portaria nº 888 de 2021 do MS, indicando a precariedade na rede do sistema de distribuição dessas localidades.

Ademais, embora o VIGIAGUA recomende que os dados do SISAGUA sejam disponibilizados para comunicar a população sobre a situação da água distribuída nos domicílios. Na cidade de Belém-PA, não existem boletins informativos à população, essa lacuna pode estar relacionada a ausência de capacitação e/ou de corpo técnico para realizar tal atividade. Portanto, os dados deste trabalho servem como um instrumento de diagnóstico, gestão e planejamento do gerenciamento de risco da água do sistema de abastecimento.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências bibliográficas

- Akhtar, S., Fatima, R., Soomro, Z. A., Hussain, M., Ahmad, S. R., Ramzan, H. S. (2019) Bacteriological quality assessment of water supply schemes (WSS) of Mianwali, Punjab, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, **78**(15), 458. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8455-1>
- Aleixo, B., Pena, J. L., Heller, L., Rezende, S. (2019) Infrastructure is a necessary but insufficient condition to eliminate inequalities in access to water: Research of a rural community intervention in Northeast Brazil. *Science of the Total Environment*, **652**, 1445–1455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.202>
- Alves, S.G.S., Ataíde, C.D.G., Silva, J.X (2018) Análise microbiológica de coliformes totais e termotolerantes em água de bebedouros de um parque público de Brasília, Distrito Federal. *Rev. Cient. Sena Aires*, **7**(1), 12-17.
- Andreoli, F. C., Sabogal-Paz, L. P. (2019) Coagulation, flocculation, dissolved air flotation and filtration in the removal of *Giardia* spp. and *Cryptosporidium* spp. from water supply. *Environmental Technology (United Kingdom)*, **40**(5), 654–663. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1400113>

- Braga, L. D., Bezerra, N. R., Scalize, P. S. (2022) Proposition and application of an environmental salubrity index in rural agglomerations. *Revista de Saúde Pública*, **56**. <https://doi.org/10.11606/s1518-8787.2022056003548>
- Brasil (2016) *Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano*. Brasília: Ministério da Saúde, 53 pp. Acesso em 10 jan. 2024. Disponível em: <https://sisagua.saude.gov.br/sisagua/paginaExterna.jsf>.
- Brasil (2019-a) *Indicadores institucionais do Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para consumo humano – 2019*. Brasília: Ministério da Saúde, 37 pp. Acesso em 08 jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/cartilhas>.
- Brasil (2019-b) *Fundação Nacional de Saúde. Manual de saneamento*. Brasília, 5 ed. 547 pp. Acesso em 02 jan. 2024. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/91837?returnUrl=/sophia_web/Home/Index&guid=1705104006424.
- Brasil (2020) *Curso básico de vigilância da qualidade da água para consumo humano*. Brasília: Ministério da Saúde. 39 pp. Acesso em 02 jan. 2024. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/bvsmis/resource/pt/mis-40896>.
- Brasil (2021) *Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021*. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: DOU 2021. Acesso em 02 jan. 2024. Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html
- Brito, F. E. da S., Brito, C. A. R. de S., Carvalho, R. M. de, Shinya, T. Y. (2021-a) Análise microbiológica da qualidade da água do povoado Barra Nova, Cocal de Telha – Piauí, Brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, **6**(3), 174–182. <https://doi.org/10.24221/jeap.6.3.2021.3606.174-182>
- Brito, F. S. L., Norat, M. D. V. C., Ribeiro, E. I. S. (2019) Utilização de diferentes metodologias para avaliação do consumo e qualidade da água dos bebedouros da Universidade Federal do Pará-UFPA. *Revista Gestão Sustentabilidade Ambiental*, **8**(1), 1043. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e120191043-1061>
- Brito, F. S. L., Pimentel, B. A., Duarte, J. M., Rabelo, M. F., Gomes, N. C. da R., Ferreira, R. da S., Braga, R. L. (2021-b) Aplicação do Indicador de Salubridade Ambiental (ISA) nos municípios de Belém e Ananindeua, região amazônica do estado do Pará, PA - 2000 a 2017. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, **12**(3), 283–298. <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2021.003.0024>
- Colet, C., Pieper, M., Kaufmann, J. V., Schwambach, K., Pletsch, M. (2021) Microbiological quality and sensitivity profile to antimicrobials in artesian well waters in a municipality in the northwest of Rio Grande do Sul. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **26**(4), 683–690. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200078>
- de Moraes, M. S., Moreira, D. A. da S., Santos, J. T. de L. A., de Oliveira, A. P., Salgado, R. L. (2018) Microbiological evaluation of water fountains of public and private schools from Santa Rita city (PB), Brazil. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **23**(3), 431–435. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018159099>
- De Queiroz, T. M., de Oliveira, L. C. P. (2018) Water quality in vão grande quilombola communities, municipality of barra do bugres (MT) *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **23**(1), 173–180. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018166375>
- De Souza, L., Lopes, C., Zeferino, S., Serbent, M. P., Goetten, W. J. (n.d.) *Qualidade da água das escolas públicas de ensino fundamental de Ibirama (SC)/BRASIL*. **4**, 563–587. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e42018563-587>
- Faria, C. P., Almendra, R., Dias, G. S., Santana, P., do Céu Sousa, M., de Freitas, M. B. (2021) Evaluation of the drinking water quality surveillance system in the metropolitan region of Rio de Janeiro. *Journal of Water and Health*, **19**(2), 306–321. <https://doi.org/10.2166/wh.2021.217>
- Ferreira, D. C., Grazielle, I., Marques, R. C., Gonçalves, J. (2021) Investment in drinking water and sanitation infrastructure and its impact on waterborne diseases dissemination: The Brazilian case. *Science of The Total Environment*, **779**, 146279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146279>
- Gomes, F. B. R., Assunção, T. de O. G. de, Nicolau, G. B., Cordeiro, P. F., Castro, S. R., Pereira, R. de O., Brandt, E. M. F. (2022) Occurrence of chemical substances in water supply systems of Brazil: a nonparametric approach for statistical analysis of Sisagua data. *Ciência e Natura*, **44**, (24) <https://doi.org/10.5902/2179460x63368>

- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024) *Panorama das cidades*. Acesso em 10 jan. 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). *Organização do território*. Acesso em: 10 jan. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024) *Atlas de saneamento: Saneamento básico e saúde pública*. Rio de Janeiro: IBGE: 2021. 190 pp. Acesso em 12 jan. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_saneamento/#/home
- Mata, R. N da (2022) *Avaliação do Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua)*, Brasil, 2014-2020. Tese (Doutorado em Saúde Coletiva), Faculdade de Ciências da Saúde, Universidade de Brasília, Brasília, 166 pp.
- Melo, D. V. L., Barroso, R. G., Santos, F. R., Pinheiro, C. E., Oliveira, C. M.S. (2021) Applicability of statistical analysis for performance and reliability evaluation of large-scale water treatment plants with direct filtration systems. *Environmental Science And Pollution Research*, **28**(18), 22427-22438. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12288-5/Published>
- Morales, D., Molares, S., Epele, L., Ladio, A., Manzo, P., Alday, G. (2020) An interdisciplinary approach to perception of water quality for human consumption in a Mapuche community of arid Patagonia, Argentina. *Science of the Total Environment*, **720**, 137508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137508>
- Oliveira Júnior, A., de Brito M. T., da Mata, R. N., dos Santos, F. S. G., de Oliveira, D. C., de Carvalho, J. L. B., de Araújo, W. N. (2019) Drinking Water Quality Surveillance Information System (SISAGUA): Characteristics, evolution and applicability. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, **28**(1) <https://doi.org/10.5123/S1679-49742019000100024>
- ONU, Organização das Nações Unidas (2021) *Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico*. Acesso em 10 jan. 2024. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2020/11/1733352>.
- PMB, Prefeitura Municipal de Belém (2020) *Plano municipal de saneamento básico de Belém*. Acesso em 10 jan. 2024. Disponível em: <https://arbel.belem.pa.gov.br/legislacao/pmsb-plano-municipal-de-saneamento-basico/>
- Queiroz, A. C. L., Cardoso, L. S. M., Silva, S. C. F da., Heller, L., Cairncross, S. (2012) Programa Nacional de Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada à Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua): lacunas entre a formulação do programa e sua implantação na instância municipal. *Saúde e Sociedade*, **21**(2), 465-478. <https://doi.org/10.1590/S0104-12902012000200019>
- Ramadan, E. M., Fahmy, M. R., Nosair, A. M. M., Badr, A. M. (2019) Using geographic information system (GIS) modeling in evaluation of canals water quality in Sharkia Governorate, East Nile Delta, Egypt. *Modeling Earth Systems and Environment*, **5**(4), 1925–1939. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00618-7>
- Reitter, C., Petzoldt, H., Korth, A., Schwab, F., Stange, C., Hamsch, B., Tiehm, A., Lagkouvardos, I., Gescher, J., Hügler, M. (2021) Seasonal dynamics in the number and composition of coliform bacteria in drinking water reservoirs. *Science of the Total Environment*, **787**. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147539>
- Rodrigues, T. C. N. F., Szlafsztein, C. F. (2022) medidas adaptativas autônomas diante a falha no abastecimento de água em Belém – PA. *Revista Geoamazonia*, **9**(18), 99. <http://dx.doi.org/10.18542/geo.v9i18.12816>.
- Santana, B. C., Forster, L. A., Mendes, A. P., Yamaguchi, K. L, Y. (2021) Análise de dados do Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua) no estado do Amazonas, 2016-2020. *Vigilância Sanitária Em Debate: Sociedade, Ciência Tecnologia*, **9**(4), 25–34. <https://doi.org/10.22239/2317-269x.01936>
- Silva, R. C., Silva S. M., Milhim, H. G.A, B., Rocha, P. D. S., Pelayo, S. J. (2019) Avaliação da presença e quantificação de coliformes totais e Escherichia coli em amostras de água destinada ao consumo humano proveniente de poços artesianos. *Ciências Biológicas e da Saúde*, **40**(2), 129–140. <https://doi.org/10.5433/1679-0367.2019v40n2p129>
- SINISA, Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (2022) *SNIS divulga os indicadores de saneamento com ano base de 2020*. Acesso em 15 jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel>.

- Trata Brasil (2020) *Novo estudo do Trata Brasil demonstra como a falta de saneamento afeta diretamente na saúde da população*. Acesso em 20 jan. 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/novo-estudo-do-itb-demostra-como-a-falta-de-saneamento-afeta-diretamente-na-saude-da-populacao/>
- Vasconcelos, C. H., Andrade, R. C. de, Bonfim, C. V., Resende, R. M. de S., Queiroz, F. B. de, Daniel, M. H. B., Grigoletto, J. C., Cabral, A. R., Redivo, A. L., Lacerda, J. C. V., Rohlf, D. B. (2016) Surveillance of the drinking water quality in the Legal Amazon: analysis of vulnerable areas. *Cadernos Saúde Coletiva*, **24**(1), 14–20. <https://doi.org/10.1590/1414-462x201500040142>
- Veiga, A. J. P. (2010) *Sustentabilidade urbana, avaliação e indicadores: um estudo de caso sobre Vitória da Conquista - BA*. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal da Bahia – UFBA: Salvador. 283 pp.

REVISTA AIDIS

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

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA CIDADE DE GUANAMBI-BA

* Thomas Leonardo Marques de Castro Leal ¹
Thaynara Lorryne de Oliveira ¹
Luísa Magalhães Araújo ²

ANALYSIS OF THE GRAVIMETRIC COMPOSITION OF URBAN SOLID WASTE FROM THE CITY OF GUANAMBI-BA

Recibido el 30 de enero de 2024. Aceptado el 9 de abril de 2024

Abstract

More efficient waste management must begin with its classification and quantification, i.e. the physical characterization of waste. The aim of this study is to survey the gravimetric composition of MSW in the city of Guanambi. In addition, through a systematic review, the aim is to analyze the studies on gravimetric composition in Brazil, giving an overview of the publications and comparing the results with those obtained in the field survey. The systematic review found a difference in the classification of some materials in reject category, such as fabric and rubber, which may led to statistically significant difference in the percentage. As for organic and recyclable materials, the sample average does not differ statistically from the national average, i.e. the values found by the authors are within the confidence interval. Regarding the data found for the city of Guanambi, the results show that the fraction of organic waste is above the national average (71.78%) and recyclable waste (24.66%) and rejects (3.72%) are below average. In general, the results also showed a difference between the fraction results for different income brackets, with the lowest fraction of recyclables identified in high-income neighborhoods, mainly due to population characteristics. The results demonstrate the need to look for new alternatives for disposing of organic waste, since the current form, an open-air dump, exacerbates the negative environmental impacts of this waste.

Keywords: rejects, final destination, per capita generation, MSW, gravimetry, systematic review.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, Brasil.

² Universidade do Estado da Bahia, Campus II - Alagoinhas, Brasil.

*Autor correspondente: Instituto Federal de Educação, Ciência, Tecnologia de Goiás (IFG) - Campus Goiânia. Rua 75, n. 46, Setor Central, Goiânia, Goiás, Brasil. 74055-110. Email: thomasmdcl@gmail.com

Resumo

Uma gestão de resíduos mais eficiente deve começar pela classificação e quantificação desses, ou seja, pela caracterização física dos resíduos. Esse trabalho tem como objetivo realizar o levantamento da composição gravimétrica dos RSU da cidade de Guanambi. Além disso, através de uma revisão sistemática, buscou-se analisar os trabalhos de composição gravimétrica do Brasil, dando um panorama das publicações e comparando os resultados com os obtidos no levantamento de campo. Na revisão sistemática, verificou-se uma diferença na classificação de alguns materiais da categoria de rejeitos, como tecido e borracha, fato que pode ter levado a diferença estatisticamente significativa no percentual. Já para os orgânicos e recicláveis, a média da amostra não difere estatisticamente da média nacional, ou seja, os valores encontrados pelos autores estão dentro do intervalo de confiança. Sobre os dados encontrados para a cidade de Guanambi, os resultados mostram que a fração de resíduos orgânicos está acima da média nacional (71.78%) e a de resíduos recicláveis (24.66%) e rejeitos (3.72%) estão abaixo da média. De forma geral, os resultados também apontaram uma diferença entre os resultados das frações para diferentes faixas de renda, com a menor fração de recicláveis identificados em bairro de alta renda, devido, principalmente, a características populacionais. Os resultados demonstram a necessidade de buscar novas alternativas para a destinação dos resíduos orgânicos, já que a forma atual, um lixão a céu aberto, agrava os impactos ambientais negativos desses resíduos.

Palavras-chave: rejeitos, destinação final, geração per capita, RSU, gravimetria, revisão sistemática.

Introdução

Em 2015, representantes dos 193 Estados-membros da ONU assinaram um compromisso em comum por meio do documento “Transformando o Nosso Mundo: A Agenda 2030 para Desenvolvimento Sustentável, comprometendo-se, a tomar medidas para promoção da sustentabilidade. A partir da definição dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), a serem alcançados até 2030, o ODS 12, especificamente, se refere aos resíduos sólidos, tendo como objetivo a redução na sua geração e aumento da taxa de reciclagem (ODS Brasil, 2021).

Estima-se que, a taxa global anual de geração de resíduos aumente de 2 bilhões para 3.4 bilhões de toneladas anuais até o ano de 2050 (Kaza *et al.*, 2018). Segundo Sharma *et al.* (2021), a má gestão de resíduos envolve desde a falta de sistemas e infraestrutura de reciclagem eficazes até o descarte não regulamentado de resíduos que poluem o ar, a água e o solo. Além disso, aterros inadequados e lixões à céu aberto levam à poluição do ar e à contaminação das águas subterrâneas (Sharma *et al.*, 2021).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e o decreto 10.936/2022, são os instrumentos da União com a finalidade de regulamentar a gestão dos resíduos sólidos no país (Brasil, 2010; 2022). Os municípios brasileiros são os órgãos responsáveis pela execução da PNRS em âmbito local, mas, de acordo Leal e Sampaio (2020), embora as determinações da política nacional, especialmente os municípios de pequeno porte não estão em conformidade com a legislação vigente. No tocante, à destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), por exemplo, cerca de 40.5% das cidades brasileiras ainda destinam seus resíduos para locais inadequados (Antenor e Szigethy, 2020).

De acordo Rezende *et al.* (2013), uma gestão eficiente deve começar pela classificação e quantificação dos resíduos gerados, ou seja, pela caracterização física dos resíduos. Entre os indicadores que compõem a caracterização física incluem-se a quantidade total por habitante e análise da composição gravimétrica. Estes indicadores permitem a análise de origem e destinação final ambientalmente adequada RSU (Menezes *et al.*, 2019).

Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo realizar o levantamento da composição gravimétrica dos RSU da cidade de Guanambi. Além disso, através de uma revisão sistemática, buscou-se avaliar os trabalhos voltados à composição gravimétrica desde a promulgação da PNRS, dando um panorama das publicações e comparando os resultados com os obtidos no levantamento de campo. O diferencial desse trabalho é avaliar a diferença entre renda e o perfil de geração per capita e composição dos resíduos.

Metodologia

Revisão sistemática

Para o desenvolvimento da pesquisa, realizou revisão sistemática, no intuito de caracterizar a produção científica sobre composição gravimétrica. Para Page *et al.* (2021, p. 3), uma revisão sistemática é “uma revisão que usa métodos explícitos e sistemáticos para reunir e sintetizar achados de estudos que abordam uma questão formulada”. Esse método possui 3 etapas: identificação, seleção/exclusão e inclusão.

Com isso, pesquisou-se os trabalhos publicados em algumas bases de dados como a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), *Scopus* e *Web of Science* e o Periódicos Capes. Utilizou-se os seguintes descritores, em português e inglês, em todas as bases:

- Composição gravimétrica AND resíduos sólidos
- “Características físicas” AND resíduos sólidos urbanos
- Gravimetric characterization AND solid waste AND Brazil
- “Physical characteristics” AND urban solid waste AND Brazil

Além dos descritores, aplicou-se um filtro do período de interesse, a partir de 2010. Excluiu-se, neste estudo, os trabalhos publicados em congressos e trabalhos de conclusão de curso, já que as bases supramencionadas não incluem essas categorias de publicação. Os dados obtidos foram organizados em planilha Excel na forma de banco de dados, de modo a avaliar os trabalhos quanto à área de estudo; tipo de trabalho; tipo de dado (dados primários, secundário); método e; os resultados obtidos através do percentual de cada tipo gerado (orgânico, reciclável e rejeito).

De posse dos resultados quantitativos (em percentual) dos resíduos de cada trabalho analisado, realizou-se uma análise estatística desses dados a fim de verificar se há uma tendência entre eles.

Primeiramente, avaliou-se a normalidade dos dados. Para isso, organizou-se os dados em ordem crescente, aplicando o teste de Shapiro-Wilk. Pereira Filho e Pereira (2012) afirmaram que tal teste é aplicável a um número máximo de até cinco mil observações, portanto, aplicável a esse trabalho.

Após a avaliação da normalidade dos dados, foi verificado se as médias diárias fornecidas pelos municípios diferem entre si e, utilizando-se o teste t de *Student*, aplicável quando os dados possuem distribuição normal, ou o teste de *Wilcoxon*, quando estes não possuem distribuição normal. Essa mesma metodologia foi utilizada por Leal *et al.* (2023) para avaliar a geração de resíduos no Estado da Bahia. Essas análises foram realizadas com o software *Bioestat 5.0*.

Local de estudo

A área de estudo foi a cidade de Guanambi, localizado no sudoeste da Bahia, a 675 km da capital Salvador. O município conta com uma população estimada em 87.817 habitantes (IBGE, 2022). Na região de Serra Geral, Médio São Francisco, que envolve 50 municípios, Guanambi destaca-se como polo regional, respondendo por 12.63% da população, segundo IBGE (2022), conforme mostra a figura (Figura 1).

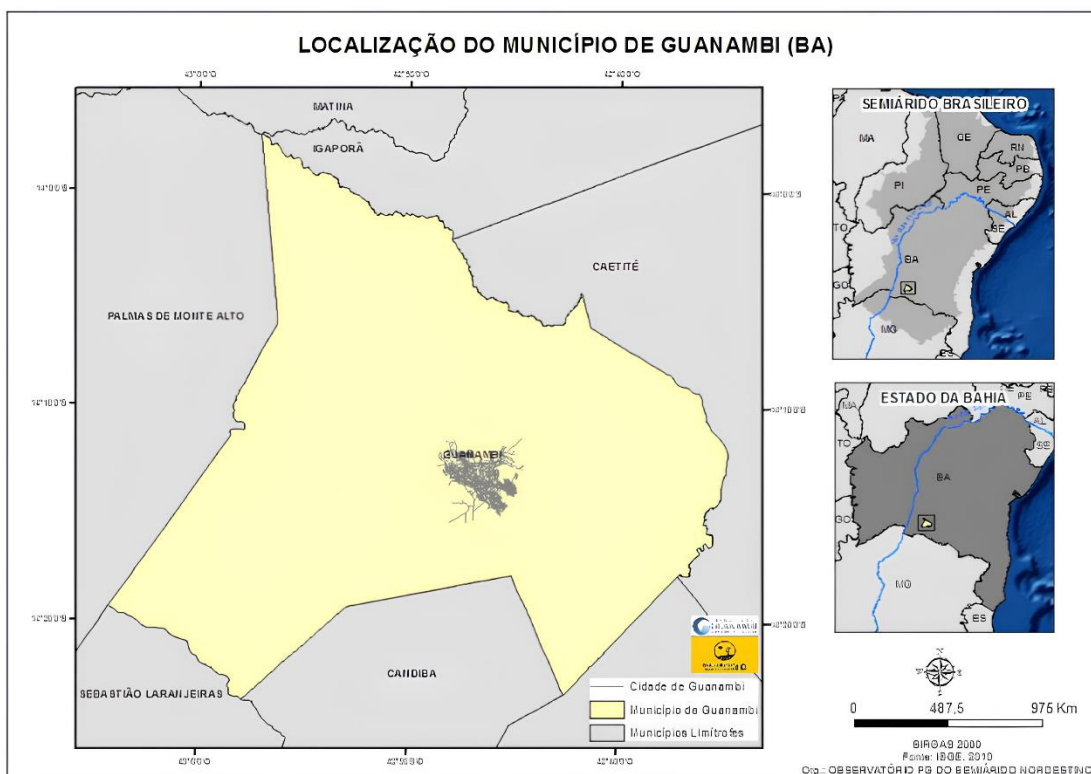


Figura 1. Mapa de localização da cidade de Guanambi. Fuente: Clemente *et al.*, 2016.

Além de uma importância econômica, o município é principal gerador de RSU da microrregião. De acordo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), Guanambi possui uma geração média diária de 130 toneladas de resíduos sólidos, ou seja, uma média de 1.55kg por habitante/dia (Brasil, 2020a), sendo destinados a um lixão, conforme verificado por Leal e Sampaio (2020).

Estudo da Composição Gravimétrica

Apesar de ter sido recentemente aprovado, o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) da cidade de Guanambi (Guanambi, 2021) não detalha os dados de composição gravimétrica dos RSU. A composição gravimétrica é um passo fundamental para a gestão integrada e eficiente desses materiais (Menezes *et al.*, 2021).

Para isso, utilizou-se como base a metodologia proposta pela NBR 10.007 (ABNT, 2004). Essa norma define os procedimentos de amostragem de resíduos sólidos. Assim, inicialmente, realizou-se, um planejamento das rotas de coleta a serem seguidas. Essas rotas foram traçadas levando em consideração a renda dos bairros, conforme mostrado (Figura 2).

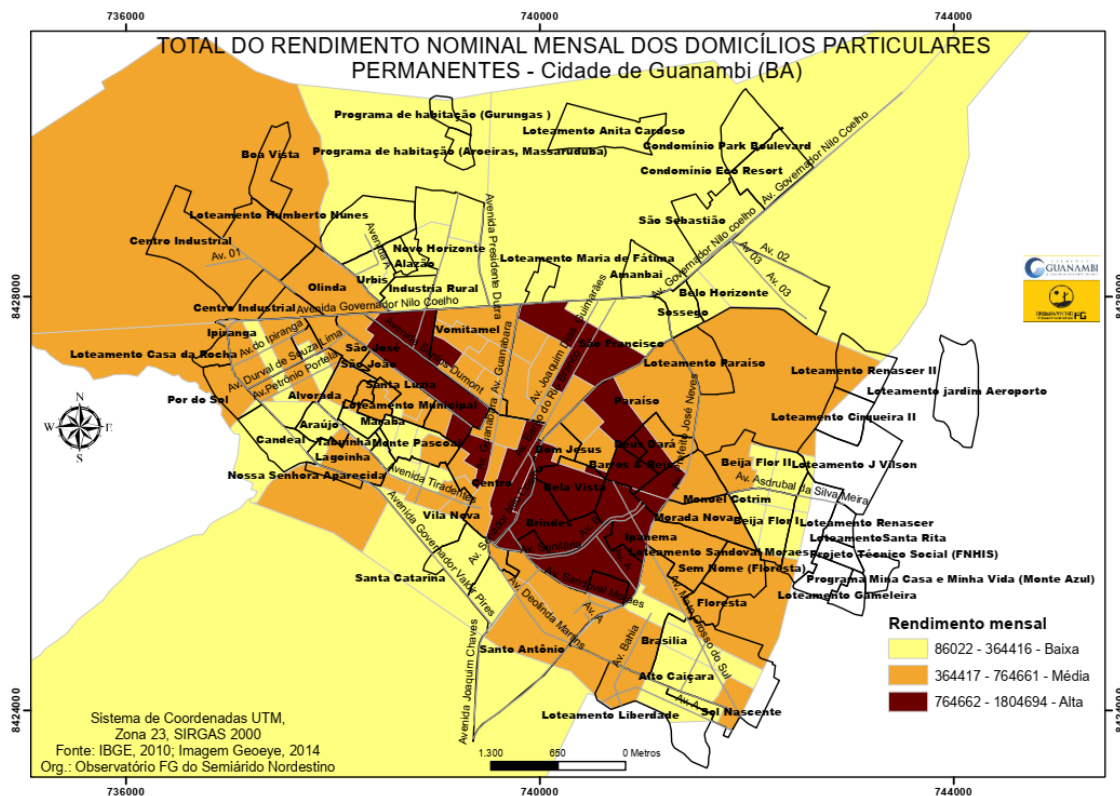


Figura 2. Mapa da limitação dos bairros da cidade de Guanambi. Fonte: IBGE, 2010 (modificado por autores).

A tabela (Tabela 1) mostra as rotas e os bairros nos quais foram realizadas as coletas de RSU. Cada rota engloba pelo menos um bairro de cada faixa de renda com a finalidade de uma posterior comparação.

Tabela 1. Rotas percorridas na coleta das amostras.

	Bairros		
	Renda baixa	Renda média	Renda alta
Rota 1	Monte Pascoal	Centro	Aeroporto Velho
Rota 2	Novo Horizonte	Vomitamel	São José

Esses bairros foram escolhidos em conjunto com os cooperados da Cooperativa de Trabalho dos Agentes Ecológicos de Guanambi (COOTAEG). Segundo eles, esses bairros são os que eles têm mais facilidade acesso à coleta de resíduos, que é feita porta a porta, facilitando o processo de amostragem.

A coleta dos resíduos se deu com um caminhão basculante COOTAEG, e os próprios cooperados ajudaram na execução. Realizou-se duas coletas, uma na quarta para a rota 1 e outra na quinta para a rota 2, o que levou a formação duas amostras. Essa coleta aconteceu nos dias 16 e 17 do mês de junho do ano de 2021, período de seca na região.

Após a coleta, o caminhão depositou os resíduos na área aberta dentro da propriedade da cooperativa, formando uma pilha para cada bairro. Após esse processo, os resíduos foram separados em big bags e pesados. A partir desses coletados, aplicou-se as Equações (1) e (2) para avaliar a geração per capita e a composição gravimétrica, respectivamente. Outros parâmetros como peso específico e teor de umidade não puderam ser medidos devido à ausência de equipamentos específicos. Além disso, avaliou-se a média ponderada dos valores encontrados de cada fração (orgânica, reciclável e rejeito), conforme a Equação (3).

$$n = \frac{\text{Massa material}}{\text{Massa total}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\text{Geração per capita} = \frac{\text{Massa total}}{\text{Nº de moradores do bairro}} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\text{Média ponderada} = \frac{n_1 \cdot p_1 + n_2 \cdot p_2 + \dots + n_k \cdot p_k}{p_1 + p_2 + \dots + p_k} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde

n = percentual dos materiais (%);

p = número de casas do bairro.

Uma metodologia semelhante foi utilizada por Silva *et al.* (2021), Almeida (2012) e Moura *et al.* (2012), os quais determinaram a composição gravimétrica por setores ou bairros da cidade, utilizando a renda como um dos indicadores para estratificação das amostras.

O número de moradores dos bairros foi estimado através do número de residência de cada um e multiplicado pelo número médio de pessoas por residência no Brasil que, de acordo com o IGBE (2022), é de 2,79 moradores por domicílio, não considerando diferença entre os bairros de diferentes faixas de renda. O levantamento das residências foi realizado pelo Observatório UniFG do Semiárido Nordeste a partir do acesso às imagens de satélite de alta resolução, delimitando as residências a partir da cobertura (telhados).

Resultados

Revisão sistemática

A figura (Figura 3) sintetiza os resultados encontrados com a revisão sistemática, conforme descrito anteriormente. Ao final, foram analisados 22 trabalhos, incluindo artigos científicos, artigos técnicos e dissertações de mestrado. A tabela (Tabela 2), compila os resultados encontrados, possibilitando a comparação entre eles.

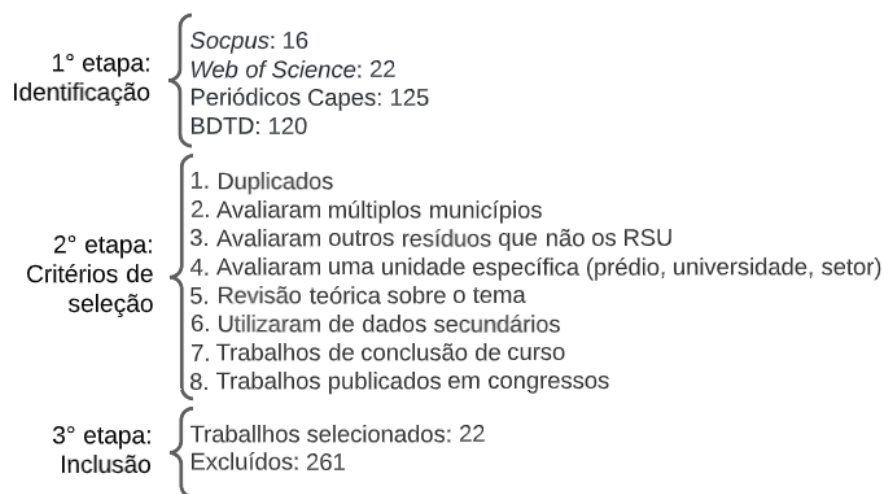


Figura 3. Aplicação das etapas da revisão sistemática.

Tabela 2. Análise bibliométrica dos estudos selecionados

Autor (es)	Tipo	Periódico	Região
Alkmin e Ribeiro Júnior (2017)	Artigo Científico	Caminhos da Geografia	Sudeste
Almeida (2012)	Artigo Científico	Ignis	Sul
Araújo <i>et al.</i> (2018)	Artigo Científico	RICA	Nordeste
Costa <i>et al.</i> (2013)	Artigo Científico	RICA	Sudeste
Couto <i>et al.</i> (2020)	Artigo Científico	RICA	Centro-Oeste
Fiel <i>et al.</i> (2021)	Artigo Científico	Research, Society and Development	Norte
Galdino e Martins (2015)	Artigo Científico	Tecno-Lógica	Sul
Gomes <i>et al.</i> (2017)	Artigo Técnico	Engenharia Sanitária e Ambiental	Sul
Kim (2019)	Dissertação	-	Sudeste
Konrad <i>et al.</i> (2010)	Artigo Científico	Revista Destaques Acadêmicos	Sul
Menezes <i>et al.</i> (2019)	Artigo Técnico	Engenharia Sanitária e Ambiental	Sudeste
Moura <i>et al.</i> (2018)	Artigo Científico	Waste Management	Sudeste
Nobre <i>et al.</i> (2021)	Artigo Científico	Brazilian Journal of Development	Nordeste
Rezende <i>et al.</i> (2013)	Artigo Técnico	Engenharia Sanitária e Ambiental	Sudeste
Ricardo e Orozco (2018)	Artigo Científico	Revista AIDIS	Norte
Santos e Mota (2010)	Artigo Técnico	Revista Tecnologia	Nordeste
Silva <i>et al.</i> (2021)	Artigo Científico	Revista em Agronegócio e Meio Ambiente	Nordeste
Siqueira <i>et al.</i> (2015)	Artigo Técnico	Revista DAE	Sudeste
Sousa (2018)	Dissertação	-	Nordeste
Tassinari (2020)	Artigo Científico	Revista Alemur	Sudeste
This <i>et al.</i> (2021)	Artigo Científico	RBMA&S	Sul
Waskow (2015)	Dissertação	-	Sul

A partir dos dados da tabela, é possível perceber que os estudos estão concentrados mais em cidades da região Sudoeste e Sul (63.6%). Esse percentual pode ser relacionado com a forma de destinação predominante de destinação final; nas regiões mencionadas, o percentual de aterro é maior que 80% nessas regiões (Brasil, 2020b). De acordo com o Ministério do Desenvolvimento Regional (Brasil, 2020b), um maior número de aterros sanitários privados nessas macrorregiões pode implicar em maior rigor na seleção de resíduos sólidos a eles destinados.

Em relação aos periódicos, os que mais apresentaram estudos foram a Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais e a Engenharia Sanitária e Ambiental (13.6% cada). Além disso, há uma predominância de artigos científicos (63.6%). Motta (2022) elucida a diferença entre artigos técnicos e científicos, sendo o primeiro orientado para uso e como audiência-alvo os praticantes com foco no *know-how*. No caso desses estudos, os praticantes podem ser considerados os gestores e técnicos do poder público local, por exemplo.

Uma segunda análise incluiu a análise dos dados de composição gravimétrica dos estudos selecionados. A fim de tornar possível a comparação os trabalhos, alguns critérios de exclusão foram utilizados (Figura 3). Entre eles é importante enfatizar que foram selecionados apenas estudos que realizaram coleta primária de dados, avaliaram os RSU de uma cidade. Por consequência, excluem-se então as análises de múltiplos municípios em conjunto e/ou unidades de gerenciamento isoladas (universidades, prédios, setores etc.).

Os dados dos trabalhos foram avaliados em três categorias: orgânicos, recicláveis e rejeitos. Apesar da heterogeneidade dentro desses grupos, especialmente recicláveis e rejeitos, muitos trabalhos não realizaram tal detalhamento. Dessa forma, das diferentes classificações dentro dos grupos, com o objetivo de comparar os trabalhos, foi possível avaliar apenas essas três categorias. A tabela (Tabela 3) resume os dados encontrados.

Tabela 3. Dados de composição gravimétrica dos estudos selecionados (*Continua*)

Autores	Fração Orgânica (%)	Fração Reciclável (%)	Rejeitos (%)
Alkmin e Ribeiro Júnior (2017)	55.6	31.7	12.7
Almeida (2012)	38.9	24.2	36.9
Araújo <i>et al.</i> (2018)	18.6	34.2	47.2
Costa <i>et al.</i> (2013)	46.5	33.8	19.7
Couto <i>et al.</i> (2020)	55.1	35.1	9.8
Fiel <i>et al.</i> (2021)	38.0	29.3	32.7
Galdino e Martins (2015)	54.0	40.6	5.4
Gomes <i>et al.</i> (2017)	42.0	31.0	27.0
Kim (2019)	37.1	37.0	25.9
Konrad <i>et al.</i> (2010)	46.1	28.6	25.3
Menezes <i>et al.</i> (2019)	43.8	31.7	24.5
Moura <i>et al.</i> (2018)	54.0	28.4	17.6

Tabela 3. Dados de composição gravimétrica dos estudos selecionados (*conclusão*)

Nobre <i>et al.</i> (2021)	14.6	46.7	38.7
Rezende <i>et al.</i> (2013)	49.4	25.5	25.1
Ricardo e Orozco (2018)	44.9	38.7	16.4
Santos e Mota (2010)	47.5	35.3	17.2
Silva <i>et al.</i> (2021)	67.5	20.3	12.2
Siqueira <i>et al.</i> (2015)	40.5	21.4	38.1
Sousa (2018)	36.7	34.1	29.2
Tassinari (2020)	58.4	23.7	17.9
This <i>et al.</i> (2021)	67.6	6.4	26.0
Waskow (2015)	57.3	27.2	15.5

É importante citar quase todos os trabalhos utilizaram o quarteamento como procedimento de amostragem, proposto pela NBR 10.007 (ABNT, 2004). Segundo o CEMPRE (2018), esse consiste em um processo de mistura pelo qual uma amostra bruta é dividida em quatro partes iguais, sendo tomados dois quartis opostos entre si para consistir em uma nova amostra, descartando-se os dois restantes. Apenas Waskow (2018) utilizou a metodologia ASTM D5231, que é uma norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), um órgão estadunidense de normalização. A diferença entre esses métodos está, basicamente, no tamanho e unidade da amostra: o ASTM D5231 utiliza a massa, que varia entre 91 e 136 kg; já na NBR 10.007, utiliza o volume como base, 100 litros.

A partir desses dados, realizou-se algumas inferências estatísticas através do *Bioestat* 5.0. O primeiro passo foi realizar o teste de normalidade por meio do teste de *Shapiro-Wilk*, ou seja, a hipótese H_0 é de que os dados possuem distribuição normal, aceitando H_0 se $p > 0.05$ ou rejeitando H_0 se $p < 0.05$. Como mostrado (Tabela 4), as três variáveis avaliadas seguem esse formato de distribuição normal.

De acordo com os dados do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2022), a estimativa da composição gravimétrica dos RSU coletados no país é de 45.3% para fração orgânica, 15.5% de rejeitos e a fração reciclável 33.6%. Com isso, aplicou-se o teste t de *Student* a fim de avaliar se a média dos valores dos estudos diferem estatisticamente da média disponível no Plano Nacional, com nível de significância de 5%.

Os resultados da tabela (Tabela 4) mostram que, para a fração orgânica e de recicláveis, a média da amostra não difere estatisticamente da média nacional, ou seja, os valores encontrados pelos autores estão dentro do intervalo de confiança. Contudo, em relação aos rejeitos, a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, a média amostral difere estatisticamente da média nacional.

Tabela 4. Inferência estatística das variáveis analisadas

Tipo	Normalidade <i>p</i> -valor	Teste t de Student			
		H_0	H_1	<i>p</i> -valor	Intervalo de confiança
Fração orgânica	0.23	$\mu = 45.30$	$\mu \neq 45.30$	0.77	$40.29 < \mu < 51.89$
Fração reciclável	0.40	$\mu = 33.60$	$\mu \neq 33.60$	0.71	$26.53 < \mu < 33.91$
Rejeitos	0.73	$\mu = 15.50$	$\mu \neq 15.50$	0.0015	$19.01 < \mu < 28.35$

De acordo o Plano Nacional, materiais como têxteis, couro e borracha estão inclusos na categoria “outros” (Brasil, 2022). Alguns autores incluem esses materiais na categoria de rejeitos (Almeida, 2012; Alkmin, Ribeiro Júnior, 2016; Fiel *et al.*, 2021; Moura *et al.*, 2018); já outros autores, como Couto *et al.* (2020), Costa *et al.* (2012) e Nobre *et al.* (2021) incluem os materiais mencionados na categoria de recicláveis. Essa divergência na classificação pode gerar uma diferença no resultado final em relação aos percentuais encontrados.

Acerca dos resíduos recicláveis, alguns fatores podem influenciar no resultado também. Konrad *et al.* (2010), por exemplo, verificaram que, embora haja coleta seletiva no município estudado, há materiais recicláveis que não foram descartados corretamente tornando-se rejeitos, ou seja, há potencialmente mais recicláveis nos resíduos descartados. Um outro fator, citado por Kim (2018), é a surgência de novos produtos, que não entrando em nenhuma categoria de resíduos reciclável, acabam na categoria de rejeitos, como é o caso das cápsulas de café. Tassarini (2019) inferiu que, por possuir coleta seletiva ineficiente ao longo dos anos, aumenta o custo final da disposição final, já que há um índice de material que vai para o aterro sanitário que poderia ser reciclado.

Sobre a fração orgânica dos resíduos, a presença/ausência da coleta seletiva pode influenciar diretamente sobre o percentual. Segundo Galdino e Martins (2015), a ausência de um sistema de sistema de coleta seletiva eficiente acarreta maior dificuldade de separação do material na Central de Triagem e Compostagem de Resíduos Sólidos (CTCRS) no município estudado. Gomes *et al.* (2017), por sua vez, verificaram que há uma quantidade expressiva de matéria orgânica nos RSU da cidade de Ponta Grossa, fator que, a depender das características (carbono, enxofre etc.), pode diminuir o potencial de geração de energia a partir de sua incineração.

Um outro fator que chama atenção é a diferença entre os resultados percentuais, com uma amplitude de até 53.1% na fração orgânica, comparando Nobre *et al.* (2021) e This *et al.* (2021), por exemplo. Mas essa diferença é esperada, já que os estudos foram realizados em diversas regiões e cidades do país. Sendo assim, a composição gravimétrica decorre de fatores como tamanho da população e de suas características socioeconômicas e culturais, do grau de urbanização e dos hábitos de consumo vigentes (CEMPRE, 2018).

Composição gravimétrica

A geração per capita, de acordo Pisani Júnior *et al.* (2018), é um indicador bastante utilizado para representar a geração de RSU, pois relaciona a massa diária de resíduo produzido por habitante em uma dada localidade. De acordo com os dados informados pelo município no SNIS, o valor médio per capita é de 1.55 kg/hab.dia. Nesse estudo encontrou-se o valor de 2.11 kg/hab.dia, ao determinar a média ponderada da produção per capita, conforme Equação (3). Como o local de disposição final do município não possui uma balança para pesagem dos veículos, conforme dados do SNIS (Brasil, 2020a), a diferença entre esses valores pode residir justamente nesse fato.

O volume total de resíduos coletados foi de 482.5 kg e 697.7 kg, respectivamente, para as rotas 1 e 2. A análise da composição gravimétrica das amostras coletadas está compilada na tabela (Tabela 5).

Tabela 5. Dados da análise da composição gravimétrica dos bairros analisados

<i>Rota 1</i>	<i>Pontos amostrados</i>	<i>Fração Orgânica (%)</i>	<i>Fração Reciclável (%)</i>	<i>Rejeitos (%)</i>
Monte Pascoal	47	84.04	12.68	3.28
Centro	48	66.09	31.03	2.88
Aeroporto Velho	22	92.15	3.14	4.71
<i>Rota 2</i>	<i>Pontos amostrados</i>	<i>Fração Orgânica (%)</i>	<i>Fração Reciclável (%)</i>	<i>Rejeitos (%)</i>
Novo Horizonte	47	70.39	21.76	7.85
Vomitamel	22	77.17	20.87	1.97
São José	48	55.03	44.44	0.53
<i>Média ponderada</i>		<i>71.78</i>	<i>24.66</i>	<i>3.72</i>

A partir dos dados analisados é possível que alguns valores chamam a atenção. O bairro Aeroporto Velho, por exemplo, possui a menor fração de recicláveis de todos os bairros analisados, apesar de ser um bairro de alta renda, e o bairro São José com a maior fração de recicláveis. Essa discrepância, de acordo com Silva *et al.* (2020), é justificável, já que não foi alcançada uma visão consensual quanto à correlação positiva entre renda e geração de diferentes tipos de resíduos sólidos domiciliares, pois essa relação depende de outros fatores, como, por exemplo, o grau de urbanização da área estudada. Em uma revisão sistemática conduzida por Alzamora *et al.* (2022), os autores chegaram à conclusão de que há um efeito positivo sim do PIB e da renda na geração per capita, mas que não implica, necessariamente, em diferenças no percentual de cada fração.

A média da fração orgânica é significativamente alta em relação à média nacional. Além de diminuir a vida útil dos aterros, a presença dos resíduos orgânicos em lixões é agravada por conta da sua degradação que emite metano e gera chorume, o qual pode levar a poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas por conta do percolamento do chorume, bem como a proliferação de doenças e vetores (Leal *et al.*, 2023). De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, deve-se estimular a redução da geração e optar por rotas tecnológicas para tratamento de resíduos com menor emissão de gases de efeito estufa (Brasil, 2022).

Já os rejeitos estão abaixo da média nacional e fora do intervalo de confiança encontrado nos outros estudos. Esses dados podem ser influenciados por estilo de vida, padrões de consumo e atividades econômicas (Silva *et al.*, 2020), dificultando uma análise mais aprofundada das possíveis influências. É importante ressaltar que os autores Leal *et al.* (2023) tentaram avaliar a geração de resíduos no estado da Bahia e sua relação com o número de habitantes das cidades, mas os autores não conseguiram estabelecer uma correlação, reforçando assim a ausência de um perfil de geração pela população.

A Tabela 6 condensa os dados dos materiais recicláveis encontrados. Um dos dados que mais chamam atenção são os resíduos de construção civil, que em um bairro chega a valores acima de 20%. Segundo Monteiro *et al.* (2001), os resíduos domiciliares são os doméstico e comercial, mas que a população costuma descartar os resíduos de construção civil (entulho) junto com os domiciliares. Entretanto, conforme estabelece a PNRS, os resíduos de construção civil são passíveis de gestão do próprio gerador, e deve observar as normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama visando à reutilização e reciclagem (Brasil, 2010). Na cidade de Guanambi, Leal, Silva e Lima (2021, p. 169) perceberam que as iniciativas por parte do poder público municipal “não são suficientes para cumprir o que preconiza a Resolução Conama nº 307/2002 e a PNRS”.

Tabela 6. Dados dos materiais recicláveis encontrados nos bairros analisados

Percentual dos materiais (%)	Monte Pascoal	Centro	Aeroporto velho	Novo Horizonte	Vomita Mel	São José
Metal	0.00	0.29	0.00	0.79	0.98	8.99
Papel	2.11	25.0	1.57	4.71	4.33	1.06
Vidro	0.47	0.00	0.00	0.16	4.92	8.99
Plástico	5.16	4.89	1.57	4.32	1.97	3.17
Tecido/couro/borracha	0.47	0.86	0.00	2.75	1.57	1.06
Resíduos de Construção Civil	4.46	0.00	0.00	9.03	7.09	21.16

A ausência de segregação prévia na fonte geradora, ocasiona perdas na recuperação dos resíduos sólidos, reduzindo o aproveitamento dos materiais, transformando-os em rejeitos, que seguem para unidades de disposição final (Brasil, 2022). Uma das formas que o poder público tem influenciado é através dos regulamentos, acordos setoriais e termos de compromisso de logística reversa, especialmente o acordo de embalagens, os quais visam aumentar o conteúdo reciclado, aumentando a quantidade de material reciclado em relação à matéria-prima virgem na fabricação de novas embalagens (Brasil, 2022).

Considerações finais

A revisão sistemática demonstrou que os estudos relacionados à composição gravimétrica têm apresentado uma tendência no que tange à metodologia utilizada, a NBR 10.007. A análise estatística dos resultados dos estudos mostra que há uma tendência nos resultados da fração orgânica e da reciclável, mas não dos rejeitos. Isso pode ser justificado devido à classificação dos materiais no momento da aplicação da metodologia.

Para a composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados na cidade de Guanambi, os resultados mostram uma predominância de resíduos orgânicos que são encaminhados para o lixão do município agravando os impactos ambientais negativos. Um outro agravante é a presença de resíduos de construção civil descartados junto com os resíduos comuns, o que é proibido pela legislação vigente.

Como limitação da pesquisa, aponta-se as informações censitárias que remetem ao ano de 2010, o que pode gerar erros na delimitação setores de renda. Além disso, em função da disponibilidade de recursos, houve uma limitação no número de setores analisados, o que pode enviesar os resultados.

Os dados gerados nessa pesquisa podem servir de base para a tomada de decisões acerca das melhores formas de gerenciar os resíduos gerados no município de Guanambi. Além disso, é importante avaliar a necessidade de desenvolvimento de ações de educação ambiental voltadas à segregação dos resíduos e implementação de uma coleta seletiva no município.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) *NBR 10.007 - Amostragem de resíduos sólidos*. 21 pp.
- Alkmin, D.V., Ribeiro Júnior, I.U. (2017) Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do lixão do município de Maria da Fé, estado de Minas Gerais. *Caminhos da Geografia*, **18**(61), 65-82, 2017. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/>

- Almeida, R.G. (2012) Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares urbanos do município de Caçador SC, a partir da caracterização física e composição gravimétrica, *Ignis*, **1**(1), 51-70. Disponível em: <https://periodicos.uniarp.edu.br/index.php/ignis/article/view/30>
- Alzamora, B.R., Barros, R.T.V., Oliveira, L.K., Gonçalves, S.S. (2022) Forecasting and the influence of socioeconomic factors on municipal solid waste generation: A literature review, *Environmental Development*, **44**, 100734. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100734>
- Antenor, S., Szigethy, L. (2020) *Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: Desafios Tecnológicos, Políticos e Econômicos*. IPEA. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>
- Araújo, N.C., Soares, B.B., Suassuna, R.C.A., Santo, F.S.E., Santos, M.S.T., Queiroz, A.J.P. (2018) Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos gerados na cidade de Santa Cecília/Paraíba, *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, **9**(7), 90-97, 2018. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.007.0009>
- 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. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm
- Brasil (2010) *Lei nº 12.305 de 10 de agosto de 2010*, Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- Brasil (2020a) Ministério de Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Série História*. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>
- Brasil (2020b) Ministério do Desenvolvimento Regional, Secretaria Nacional de Saneamento, *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos*, Brasília, DF, 2020b. 244 pp. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico_RS2019.pdf
- Brasil (2022) Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental, *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Brasília, DF, 209 p. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>
- CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem (2018) *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*, 4a ed, São Paulo, SP, 316 pp. Disponível em: https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf
- Clemente, C.M.S., Pereira, D.M., Queiroz, L.R., Domingues, E.M. (2016) Análise técnica dos produtos cartográficos de mapeamentos colaborativos: um estudo de caso da cidade de Guanambi - BA. *Revista Desenvolvimento Social*, **17**(1), 5-18. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/rds/article/view/2098>
- Costa, L.E.B., Costa, S.K., Rego, N.A.C., Silva Junior, M.F. (2012) Gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais, *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, **3**(2), 73-90. <http://doi.org/10.6008/ESS2179-6858.2012.002.0005>
- Couto, B.O.C., Oliveira, A.F., Saleh, B.B., Morais, B.B., Silva Júnior, C.R. (2020) A composição gravimétrica como ferramenta fundamental na gestão dos resíduos sólidos: estudo de caso do município de Rio Verde/GO, *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, **11**(6), 404-410. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0033>
- Fiel, L.G., Monteiro Neto, A., Sousa, M.C. de, Gusmão, M.T.A. de, Paiva, P.F.P.R., Braga, T. G.M., Silva Junior, O.M. da, Ruivo, M.L.P. (2021) Análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados na Ilha de Cotijuba em Belém – PA, *Research, Society and Development*, **10**, 1-15. <http://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20724>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) *Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) *Censo Brasileiro de 2022*, Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>
- Galdino, S.D.J., Martins, C.H. (2015) Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional de um município de pequeno porte, *Tecno-Lógica*, **20**(1), 01-08. <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v20i1.6060>

- Gomes, S., Weirich Neto, O.H., Silva, D.A. da, Antunes, S.R.M., Rocha, C.H. (2017) Potencial energético de resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **22**(6), 1197-1202. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017143432>
- Guanambi (2021) *Lei Municipal nº 1.409 de 16 de dezembro de 2021*, Institui a política e o plano municipal de saneamento básico e de gestão integrada de resíduos sólidos do município Guanambi e seus instrumentos, e dá outras providências, Diário Oficial da Prefeitura Municipal de Guanambi. Disponível em: <https://diariooficial.procedebahia.com.br/guanambi/Diario%20Oficial%20-%20PREFEITURA%20MUNICIPAL%20DE%20GUANAMBI%20-%20Ed%202520.pdf>
- Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018) *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, Washington, DC: World Bank. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Kim, V.J.H. (2019) *Análise da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares de São Carlos (SP)*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 196 pp. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-17062019-104821>
- Konrad, O., Casaril, C.E., Schmitz, M. (2010) Estudo dos resíduos sólidos domésticos de Lajeado/RS pela caracterização gravimétrica, *Revista Destaques Acadêmicos*, **2**(4), 57-62. Disponível em: <http://univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/90>
- Leal, T.L.M.C., Freitas, M.F., Alencar, N.R.O., Lisboa, G.S., Stracieri, J. (2023) Análise estatística da geração de resíduos sólidos do estado da Bahia, Brasil, *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, **19**(1). <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v19i1.6612>
- Leal, T.L.M.C., Sampaio, R.J. (2020) Gestão dos resíduos sólidos: o caso do consórcio de desenvolvimento sustentável do Alto Sertão na Bahia, *urbe Revista Brasileira de Gestão Urbana*, **13**, e20180123. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20180123>
- Leal, T.L.M.C., Silva, N.L., Araújo, L.M. (2021) Gestão dos resíduos da construção civil: análise da legislação municipal de Guanambi-Ba, *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **10**(3), 154-173. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e32021154-173>
- Menezes, R.O., Castro, S.R., Silva, J.B.G., Teixeira, G.P., Silva, M.A.M. (2019) Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **24**(2), 271-282. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019177437>
- Monteiro, J.H.P. et al. (2001) *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro: IBAM. 204 pp. Disponível em: Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>
- Motta, G.S. (2022) O Que É um Artigo Tecnológico? *Revista de Administração Contemporânea*, **26**(Sup), e220208. <https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2022220208>
- Moura, A.A., Lima, W.S., Archanjo, C.R. (2012) Análise da composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso - município de Itaúna- MG, *SynThesis Revista Digital FAPAM*, **3**, 4-16. Disponível em: Disponível em: <https://periodicos.fapam.edu.br/index.php/synthesis/article/view/47>
- Moura, J.M.B.M., Pinheiro, I.G., Carmo, J.L. (2018) Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes, *Waste Management*, **74**, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.011>
- Nobre, S.B., Sousa, C.R.C., Bezerra, J.M., Mendonça, E.V.P., Roque, F.S., Costa, H.C.G., da Costa, T.T., Rêgo, A.T.A. (2021) Levantamento dos resíduos sólidos gerados no município de Pau Dos Ferros, Rio Grande do Norte, *Brazilian Journal of Development*, **7**(6), 54056-54075. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-009>
- ODS Brasil (2021) *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br>
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Hamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P., Moher, D. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, *BMJ*, **372**(71), 1-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

- Pereira Filho, N.A., Ferreira, D.F. (2012) Teste Monte Carlo de normalidade univariado baseado em distâncias, *Revista Brasileira de Biometria*, **30**(3), 401-416. Disponível em: http://jaguar.fcav.unesp.br/RME/fasciculos/v30/v30_n3/A7_Nelson_Daniel.pdf
- Rezende, J.H., Carboni, M., Murgel, M.A.T., Capps, A.L.A.P., Teixeira, H.L., Simões, G.T.C., Russi, R.R., Lurenço, B.L.R., Oliveira, C.A. (2013) Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP), *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **18**(1), 1-8. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000100001>
- Ricardo, D.L., Orozco, M.M.D. (2018) Caracterização física de resíduos sólidos domiciliares do município de Rolim de Moura - Rondônia – Brasil, *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, **11**(3), 362-375. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2018.11.3.58252>
- Santos, G.O., Mota, F.S.B. (2010) Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE. *Revista Tecnologia*, **31**(1), 39-50. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/5334>
- Silva, C.O., Konrad, O., Callado, N.H., Feitosa, A.K., Araújo, L.G.S. (2021) Discretização da estimativa de geração per capita e análise gravimétrica de resíduos sólidos urbanos, *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá (PR)*, **14**(3), e8128, 2021. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n3e8128>
- Silva, R.C.P., Costa, A.R.S., El-Deir, S.G., Jucá, J.F.T. (2020) Setorização de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares por técnicas multivariadas: estudo de caso da cidade do Recife, Brasil, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **25**(6), 821–832. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020200205>
- Siqueira, H.E., Souza, A.D., Barreto, A.C., Abdala, V.L. (2015) Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Nova Ponte (MG), *Revista DAE*, **64**, 39-52. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_202_n_1638.pdf
- Sousa, A.N. (2018) *Indicadores socioeconômicos, geração e composição dos resíduos sólidos domiciliares da cidade de Teresina-PI: uma contribuição para gestão municipal*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2018, 223 pp. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32219>
- Tassarini, D.J. (2019) Análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município de Igarapé/mg e o “Projeto Recicla mais Igarapé”, *Alemur*, **4**(1), 99-115. Disponível em: <https://periodicos.ufop.br/alemur/article/view/1402>
- This, L.G., Bohrer, R.E.G., Souza, E.L., Guerra, D., Silva, D.M., Lara, D.M., Lanzanova, M.E., Clasen, B.E. (2021) Avaliação da coleta seletiva dos resíduos sólidos urbanos do município de Crissiumal – RS, *Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade*, **1**(4), 17–41. Disponível em: <https://rbmaes.emnuvens.com.br/revista/article/view/89>
- Sharma, H.B., Vanapalli, K.R., Samal, B., Cheela, V.R.S., Dubey, B.K., Bhattacharya, J. (2021) Circular economy approach in solid waste management system to achieve UN-SDGs: Solutions for post-COVID recovery, *Science of the Total Environment*, **800**, 149605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149605>
- Waskow, R. P. (2015) *ASTM D5231 aplicada à caracterização da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos: estudo de caso: Novo Hamburgo, RS*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 131 pp. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/115271>

REVISTA AIDIS

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

**EFEITO DA SAZONALIDADE NA QUALIDADE DA
ÁGUA DO AÇUDE TAQUARA, CEARÁ, BRASIL**

Brenda de Assis Ferreira Carvalho ¹
* Waleska Martins Eloi ¹
Deborah Mithya Barros Alexandre ²
Maria Thereza Rocha Chaves ¹
Jacques Carvalho Ribeiro Filho ³

**SEASONALITY EFFECT ON WATER QUALITY IN THE
TAQUARA RESERVOIR, CEARÁ, BRAZIL**

Recibido el 30 de enero de 2024. Aceptado el 6 de mayo de 2024

Abstract

Water quality in reservoirs is a growing concern for environmental sustainability, water bodies play a vital role in providing drinking water, in agriculture and in maintaining aquatic ecosystems. It is noted that the water issue has been worsening over time, with the semi-arid region having the greatest impacts in relation to the water crisis, but today the concern about availability is notable in all regions of the world. This study assessed the impact of seasonality on the water quality of the Taquara Reservoir. The data utilized were sourced from the Water Resources Management Company (COGERH) for the period from 2016 to 2020. Parameters analyzed for water characterization included pH, dissolved oxygen, electrical conductivity, chlorophyll "a," cyanobacteria, Escherichia coli, total nitrogen, total phosphorus, chlorides, color, magnesium, potassium, sodium, total solids, and turbidity. Descriptive analyses and box-plot graph construction were employed to assess water body quality during seasonal periods, comparing concentrations of the analyzed variables with the maximum allowable values (MAVs) established by CONAMA Resolution No. 357/2005 for freshwater class 2. The concentrations obtained mostly fall within the limits permitted by CONAMA Resolution. However, parameters such as total phosphorus, dissolved oxygen, Escherichia coli, chlorophyll "a," and cyanobacteria did not comply with the legislation. The results suggest seasonal variations and anthropogenic contaminations. Emphasis is placed on the importance of understanding the influence of seasonal changes and adopting measures to reduce human interference, aiming at the preservation of the quality and sustainability of this vital resource.

Keywords: monitoring, reservoir, semiarid.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Fortaleza, Brasil.

² Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, Brasil.

³ Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará, Brasil.

* Autor correspondente: Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Fortaleza/Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica. Fortaleza, Ceará. CEP: 60040-215. Brasil. Email: waleska@ifce.edu.br

Resumo

A qualidade da água em reservatórios é uma preocupação crescente para sustentabilidade ambiental, os corpos hídricos desempenham um papel vital no fornecimento de água potável, na agricultura e na manutenção dos ecossistemas aquáticos. Nota-se que a questão hídrica vem se agravando ao longo do tempo, sendo a região semiárida a que apresenta maiores impactos em relação a crise hídrica, porém hoje a preocupação com a disponibilidade é notável em todas as regiões do mundo. A pesquisa avaliou o impacto da sazonalidade na qualidade da água do açude Taquara. Os dados utilizados pertencem a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), do período de 2016 a 2020. Os parâmetros analisados para a caracterização da água do açude foram: pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, clorofila "a", cianobactérias, *Escherichia coli*, nitrogênio total, fósforo total, cloretos, cor, magnésio, potássio, sódio, sólidos totais e turbidez. Para avaliar a qualidade dos corpos hídricos, aplicou-se análises descritivas juntamente na construção de gráficos box-plot nos períodos sazonais e comparou-se as concentrações das variáveis analisadas com os valores máximos permitidos (VMPs) da Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces classe 2. As concentrações obtidas, em sua maioria, estão dentro dos limites permitidos pela Resolução do CONAMA. Porém, os parâmetros fósforo total, oxigênio dissolvido, *Escherichia coli*, clorofila a e cianobactérias não atenderam à legislação. Os resultados sugerem variações sazonais e contaminações antrópicas. Destaca-se a importância de entender a influência das mudanças sazonais e adotar medidas para reduzir a interferência humana, visando a preservação da qualidade e sustentabilidade desse recurso vital.

Palavras-chave: monitoramento, reservatório, semiárido.

Introdução

As preocupações em relação aos recursos hídricos têm crescido substancialmente nas últimas décadas, especialmente devido às práticas inadequadas e ao uso inadequado da água, que acarretam uma série de consequências prejudiciais à sociedade, sendo a ação antrópica uma das que mais afeta de maneira direta e indireta a qualidade da água em contexto mais amplo (Bernardini *et al.*, 2021).

Em diversos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, a disponibilização de água para toda a população, em quantidades adequadas e com qualidade satisfatória, ainda é um desafio, fazendo-se necessário pensar em formas de ampliar tal fornecimento. No entanto, é importante enfatizar que, ao invés de buscar novas fontes de água para suprir a crescente demanda da sociedade por esse recurso, é de extrema importância adotar uma abordagem de racionalização do consumo hídrico, visando um aproveitamento mais eficiente dos recursos já disponíveis (Silva *et al.*, 2022).

Com base nessa perspectiva, as principais bacias hidrográficas do Brasil foram regularizadas pela construção de reservatórios. Na região semiárida, a construção de reservatórios traz grandes benefícios, sendo uma das medidas para se conviver com os constantes fenômenos de seca. A implantação de reservatórios tem como principais objetivos os usos múltiplos, sendo o uso prioritário o abastecimento para o consumo humano, contribuindo com o desenvolvimento de sua área de influência e garantindo a fixação do homem no interior (ANA, 2019a).

O conhecimento dos fatores que influenciam a qualidade da água é importante para o gerenciamento e estudos de ambientes aquáticos. Um fator significativo é a influência antrópica, que vem ocasionando alterações e impactos no meio ambiente ao longo do tempo, existindo uma crescente necessidade de se apresentar soluções e estratégias que atenuam e revertam os efeitos da degradação ambiental, bem como do esgotamento dos recursos naturais que se observam cada vez com mais frequência (ANA, 2019b).

A variação sazonal e, conseqüentemente, a disponibilidade de água podem exercer impactos significativos nas esferas socioeconômicas, agrícolas e industriais. Uma vez que influencia diretamente nos parâmetros químicos, físicos e biológicos para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. A análise dos padrões de sazonalidade, aliado aos parâmetros químicos, físicos e biológicos desempenha um papel fundamental na administração e no planejamento dos recursos hídricos locais, além de contribuir para a concepção de projetos nos âmbitos público e privado, abarcando uma variedade de setores (Ferreira, 2021). Assim, o objetivo central desta pesquisa consistiu em analisar o impacto sazonal na qualidade da água do Açude Taquara.

Material e Métodos

Área de Estudo

O estudo foi realizado no Açude Taquara inserido na bacia do Acaraú, localizada no oeste do Estado do Ceará (Figura 1), no município de Cariré, inaugurado em 2012 e barra o alto do rio Jaibaras, sendo suas águas utilizadas no abastecimento de água dos municípios vizinhos de Cariré, Pacujá, Graça e Mucambo, além da finalidade de controle de enchentes do rio e sua perenização, também é usado para o desenvolvimento da piscicultura na região.

De acordo com a classificação de Köppen (1918), a região possui um clima do tipo Aw', caracterizado como tropical chuvoso, com precipitações concentradas e médias anuais de 960 mm, concentrando-se 90% entre os meses de janeiro a junho. Predomina uma topográfica plana a levemente ondulada. Na região a evaporação potencial histórica anual é de 1600 mm ano⁻¹, com temperaturas variando de 22.8 °C a 34.7 °C e umidade relativa média anual atingindo em torno de 70% (Carvalho *et al.* 2020).

O açude Taquara, localiza-se na porção oeste da Bacia Hidrográfica do Acaraú, com capacidade total de armazenamento de água igual a 320.78 hm³. Essa bacia hidrográfica abrange uma extensão territorial de 565.730 km², relata-se que durante 96.27% do tempo o volume armazenado é menor ou igual a 60% da sua capacidade de armazenamento máximo. Na área de influência do açude Taquara, observa-se uma significativa extensão de terrenos desmatados, incluindo Áreas de Preservação Permanente (APP). A maioria dessas áreas, previamente utilizadas para pastagens, mineração e cultivos agrícolas (Ceará, 2017).

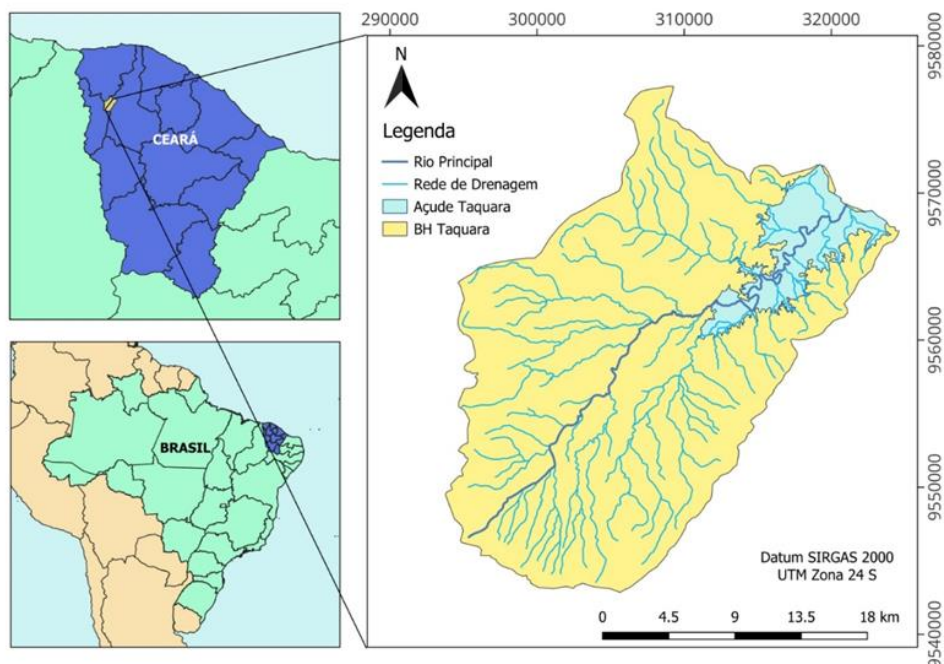


Figura 1. Localização do Açude Taquara, Ceará, Brasil. Fuente: autoria própria.

Análise dos dados

Os dados empregados para a análise foram obtidos a partir do banco de dados de monitoramento da qualidade da água, mantido pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). A janela temporal abrange o intervalo de janeiro de 2016 a agosto de 2020, sendo realizadas duas coletas no período seco e duas no período chuvoso de cada ano, contemplando informações significativas tanto dos períodos chuvosos (janeiro a junho) quanto dos períodos de estiagem (julho a dezembro) de cada ano investigado, realizando-se um total de 20 campanhas. As coletas de água ocorreram sempre no mesmo ponto amostral (Figura 2), o ponto foi escolhido pela proximidade da tomada de água do reservatório. Todos os frascos utilizados nas coletas foram cedidos pelos laboratórios contratados, e a conservação das amostras e o tempo entre a coleta e a realização das análises seguiram as orientações dos laboratórios.

Para a caracterização qualitativa das águas presentes no açude, foram empregados os seguintes parâmetros: pH, níveis de oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica da água (CE) e a transparência da água, medida através do Disco de Secchi, sendo todos esses parâmetros avaliados diretamente em campo. No que tange à análise laboratorial, as amostras foram coletadas em profundidades subsuperficiais (0,30 m) nas proximidades dos pontos de captação do açude (latitude: $-03^{\circ} 53' 32''$, longitude: $-40^{\circ} 30' 04''$).

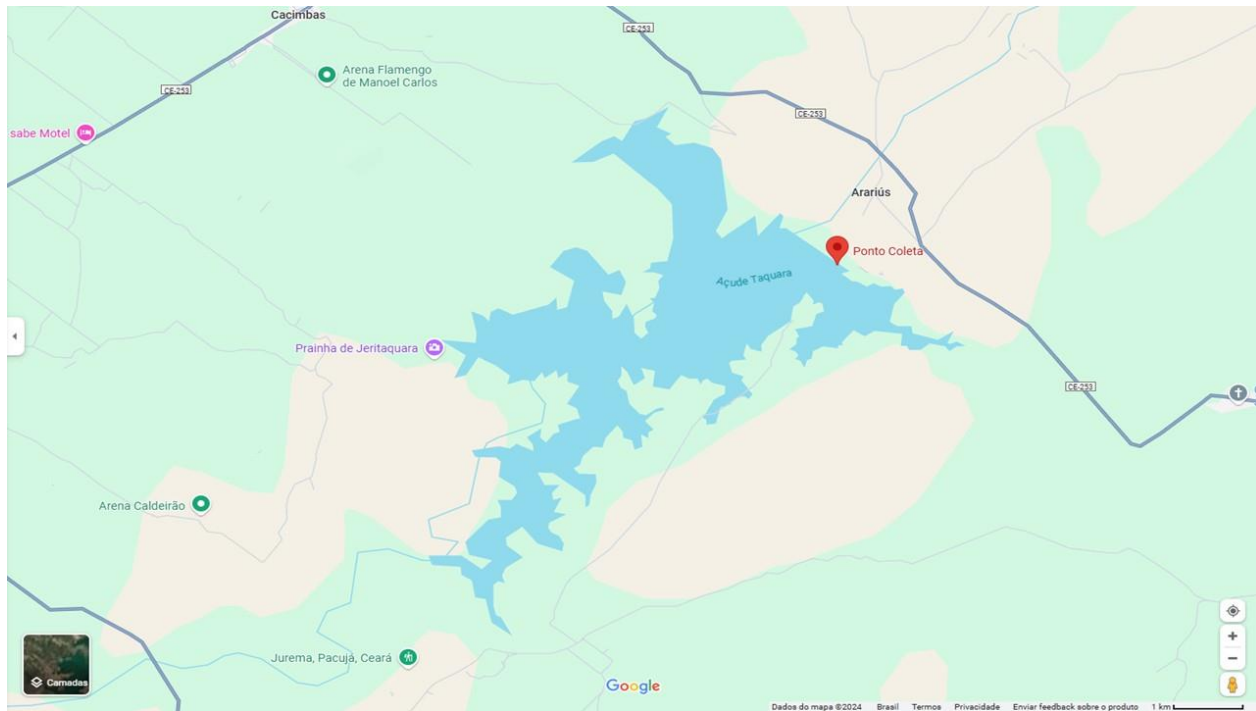


Figura 2. Localização do Ponto de Coleta no Açude Taquara, Ceará, Brasil. *Fuente: Google Maps © 2024.*

Os seguintes parâmetros foram analisados: clorofila "a", presença de cianobactérias, concentrações de fósforo total e nitrogênio total, alcalinidade por bicarbonatos, teor de cálcio, níveis de cloretos, coloração, quantidade de ferro, presença de magnésio, potássio e sódio, sólidos totais, turbidez e o indicador bacteriano *Escherichia coli*. Os procedimentos empregados em laboratório seguiram as diretrizes estabelecidas pelo "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (APHA, 2017). As metodologias utilizadas podem ser observadas na Tabela 1.

Realizou-se também a análise do Índice de Estado Trófico (IET), o qual foi determinado a partir de metodologia adaptada da adotada pela CETESB, que usa as variáveis nitrogênio total, fósforo total, clorofila-a, cianobactérias e transparência. Com base nas concentrações de fósforo e clorofila foram calculados o estado trófico individual e a média.

De posse dos dados, elaborou-se uma análise descritiva dos dados, posteriormente analisou-se a sazonalidade dos dados através de estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, quantidade de dados, valores máximos e mínimos) por meio de gráficos box-plot, comparando-se com a legislação vigente com os valores máximos permitidos (VMPs), conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005.

Tabela 1. Parâmetros e respectivos métodos utilizados para análise da qualidade da água

Parâmetros	Unidade	Método de referência
pH	escala	Disco de Secchi
Oxigênio dissolvido	mg/L	Disco de Secchi
Condutividade elétrica da água	µS/cm	Disco de Secchi
Transparência da água	m	Disco de Secchi
clorofila "a"	µS/L	APHA, 2017
presença de cianobactérias	Células/mL	APHA, 2017
fósforo total	mg/L	APHA, 2017
nitrogênio total	mg/L	APHA, 2017
alcalinidade por bicarbonatos	mg/L	APHA, 2017
cálcio	mg/L	APHA, 2017
cloretos	mg/L	APHA, 2017
Ferro	mg/L	APHA, 2017
Magnésio	mg/L	APHA, 2017
Potássio	mg/L	APHA, 2017
Sódio	mg/L	APHA, 2017
Sólidos totais	mg/L	APHA, 2017
Turbidez	NTU	APHA, 2017
Escherichia coli	NMP/100ml	APHA, 2017

Resultados e discussão

Análise precipitação local

A aquisição da série de precipitação para realização desta análise se deu por meio do Portal HidroWeb (ANA, 2024). Foram coletados valores que compreendem o período de 1914 a 2023 da Estação de Cariré, de coordenadas geográficas latitude -3.95 e longitude -40.47.

Na Figura 3 é possível visualizar as precipitações anuais locais ao longo dos anos, atingindo um pico máximo de 2081.0 mm em 2009 e uma mínima de 179.5 mm em 1915, com uma média anual de 889.7 mm, destacada em vermelho, os anos correspondentes ao período monitorado nessa pesquisa (2016-2020) estão destacados em verde, sendo elas respectivamente 707 mm, 1031mm, 804 mm, 821 mm e 1022 mm.

A média da altura de precipitação anual, registrada como 877.04 mm durante o período de monitoramento, demonstra uma proximidade substancial em relação à média histórica abrangendo o período de 1914 a 2023. Este achado sugere que a precipitação observada durante o período analisado pode ser considerada representativa para a região em estudo.

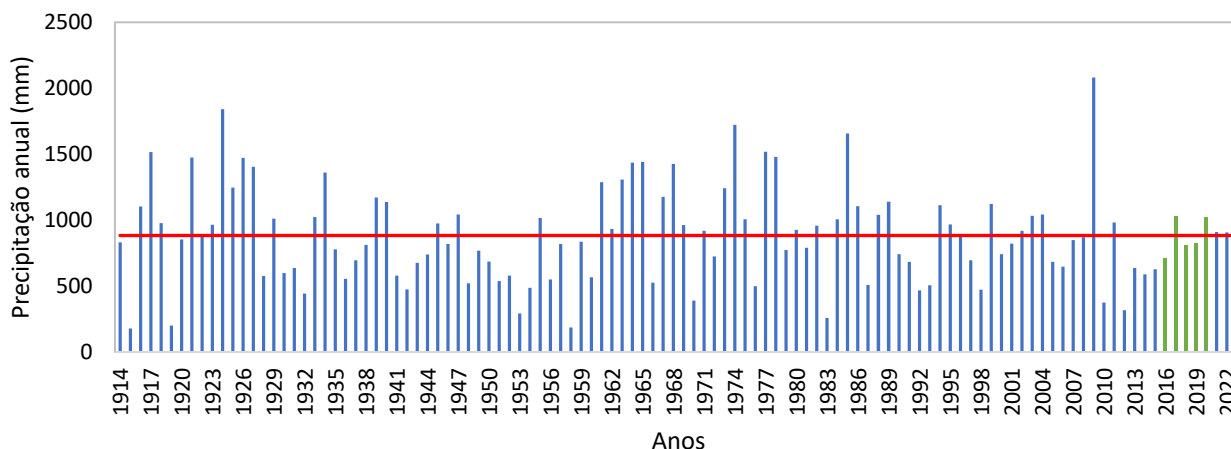


Figura 3. Série histórica (1914-2023) da altura de precipitação anual do município de Cariré (CE).

Na Figura 4, estão dispostas, as alturas de precipitação mensais do período investigado nesse artigo. Analisando a representação gráfica, torna-se evidente a existência de uma temporada chuvosa que corresponde de janeiro a maio e um período de estiagem de junho à dezembro, esse ultimo com uma maior ênfase durante os meses de agosto à novembro.

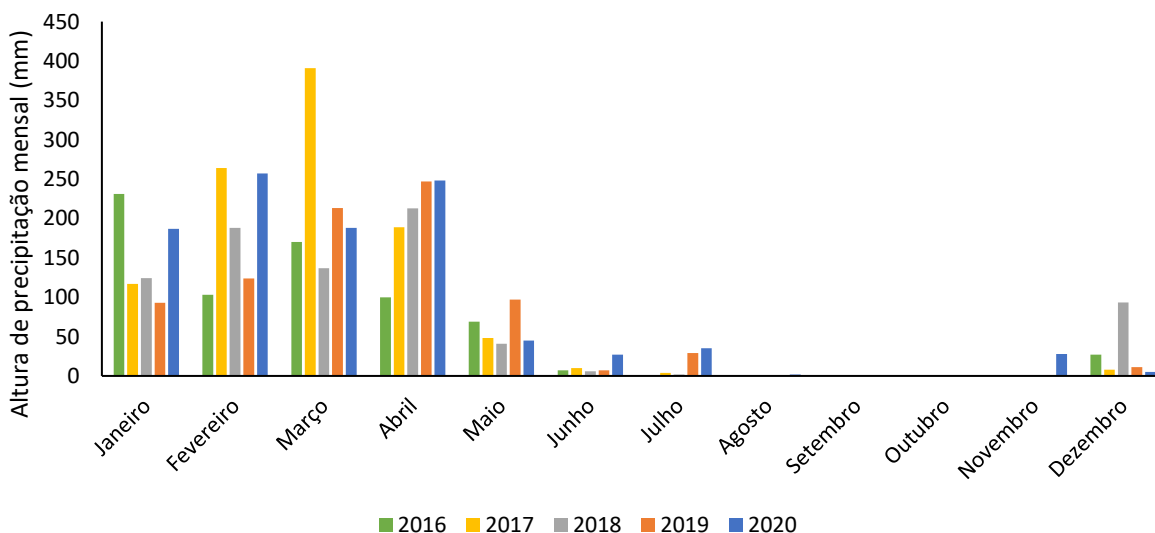


Figura 4. Alturas de precipitação mensal referente ao período monitorado (2016-2020) do município de Cariré (CE).

Observa-se que as precipitações apresentam uma concentração significativa durante o primeiro semestre do ano, destacando-se especialmente nos meses de janeiro a abril. A média desses meses sozinhos correspondem a aproximadamente 86% do volume total de precipitação registrado ao longo do ano.

Análise Sazonal das Variáveis Físico-químicas

A variável condutividade elétrica exibiu variações sazonais distintas, onde todas as amostragens registraram um aumento progressivo dos valores durante o período chuvoso (Figura 5A). Entretanto, os resultados se desviaram daqueles observados nos estudos conduzidos por Nascimento *et al.* (2021) no Sistema Cantareira, em que a condutividade elétrica não demonstrou variação considerável com a sazonalidade.

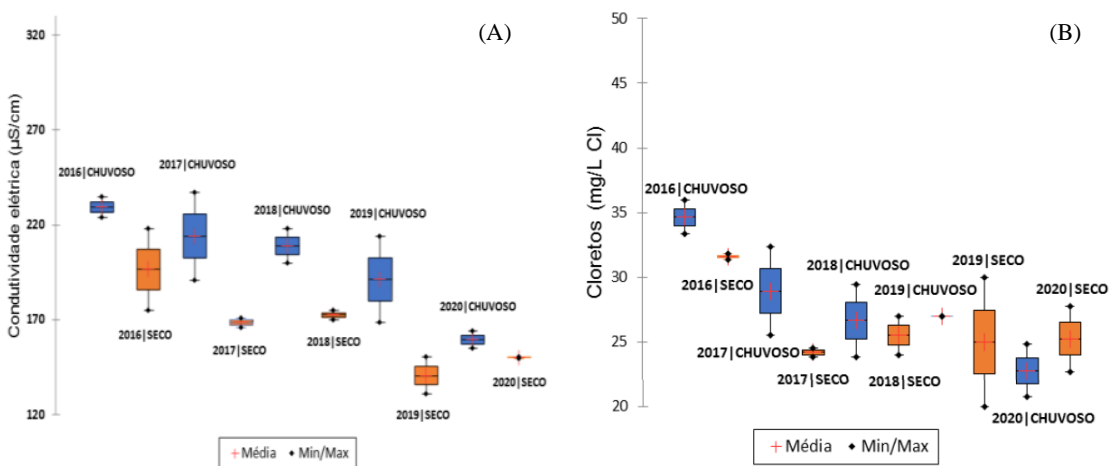


Figura 5. Representação do período sazonal da condutividade elétrica (A) e cloreto (B).

A condutividade elétrica aumenta com a concentração de íons dissolvidos na água, estabelecendo uma correlação direta. De acordo com CETESB (2022), as águas que apresentam condutividade elétrica superiores a $100 \mu\text{S/cm}$, apontam impactos decorrentes de ações antrópicas no ambiente. Ao examinar a Figura 5A, é evidente que todos os valores mínimos registrados ao longo dos anos de análise excederam $100 \mu\text{S/cm}$. Isso levanta a hipótese da existência de atividades humanas nas proximidades dos reservatórios, as quais contribuem para a introdução de íons nas águas dos reservatórios por meio do escoamento superficial durante os períodos de chuva.

As flutuações da variável cloreto são apresentadas na Figura 5B, destacando-se as concentrações mais significativas durante o período chuvoso. Conforme discutido por Piratoba *et al.* (2017), a origem do cloreto pode ser tanto de caráter antrópico quanto geológico, sendo a lixiviação de rochas e a

contribuição de esgotos domésticos e industriais as fontes preeminentes. Importante mencionar que todas as concentrações de cloreto estão em conformidade com o limite estipulado pela Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, o qual é estabelecido em até 250 mg/L.

A maior parte das medições dos sólidos totais revelou valores mais elevados durante o período de chuvas, uma tendência esperada devido à influência do escoamento superficial, que arrasta consigo matéria orgânica e sedimentos (Figura 6A). Conforme discutido por Silva e Souza (2013), há uma relação direta entre os sólidos totais e a sazonalidade, visto que os níveis de ST tendem a ser mais altos durante a temporada de chuvas. Isso implica em um aumento notável nos conteúdos de sais minerais neste intervalo de tempo.

Conforme estipulado pela Resolução CONAMA 357/05, os valores aceitáveis para o parâmetro de sólidos totais em águas doces de Classe 2 não devem exceder 500 mg/L. Nesse contexto, é possível constatar que os valores registrados no açude estudado estão em conformidade com os requisitos legais estabelecidos.

A variável turbidez apresentou maiores concentrações no período seco (Figura 6B). Resultado semelhante ao açude Taquara, foi obtido por Santos *et al.* (2021) na região amazônica, que também registrou resultados onde a turbidez foi maior no período seco.

Santos *et al.* (2021) relatam que a turbidez é um parâmetro físico que possui uma considerável influência na vida aquática. Refere-se ao grau de interferência que a luz encontra ao passar através da água. Ocorre pela presença de materiais em suspensão, tais como matéria inorgânica e orgânica oriundos de processos erosivos e despejos industriais. Destaca-se que todas as concentrações de turbidez atenderam a Resolução CONAMA 357/2005, que estabelece um valor de até 100 UNT para águas doces de classe 2.

A cor verdadeira demonstrou níveis superiores durante o período de estiagem (Figura 7A). Conforme elucidado pela CETESB (2022), a cor está intrinsecamente ligada à presença de sólidos dissolvidos, especialmente matéria coloidal de natureza orgânica e inorgânica. Nesse contexto, a elevação das concentrações de cor durante o período de seca é atribuída à diminuição do volume do reservatório, o que, por sua vez, leva a um aumento nas concentrações desses materiais. É notável que todos os valores de cor nos períodos sazonais respeitaram o limite estabelecido pela Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente é de até 75 mg Pt/L.

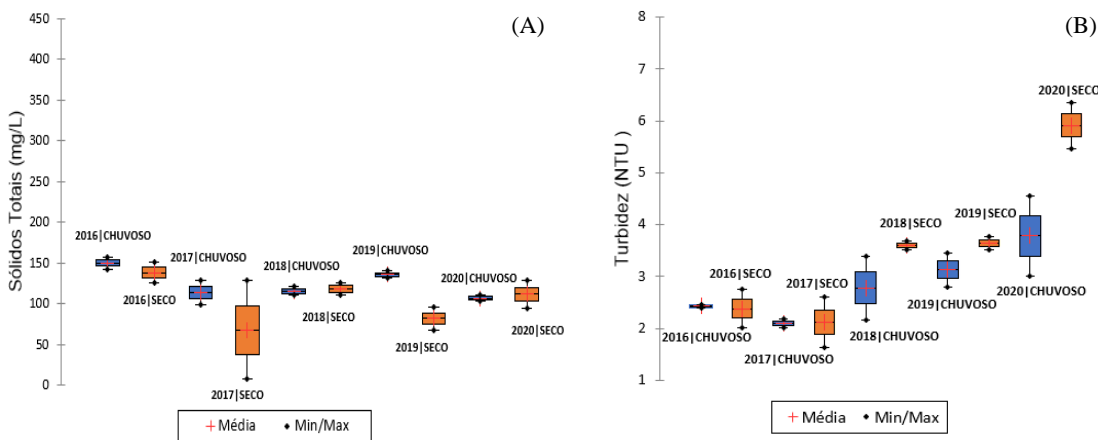


Figura 6. Representação do período sazonal dos Sólidos Totais (A) e Turbidez (B).

A análise da Figura 7B revela que, ao longo de todos os anos estudados, houve uma tendência de elevação das concentrações de sódio durante o período chuvoso. Esse padrão também foi observado no estudo de Gomes (2023), em que a concentração de sódio aumentou durante a estação das chuvas. O sódio, um elemento bastante predominantes na crosta terrestre, é notório por ser altamente solúvel, o que faz com que ele esteja presente em todas as águas naturais. De acordo com Lima e Garcia (2008), em corpos de água superficiais, as concentrações de sódio geralmente ficam abaixo de 50 mg/L, o que é corroborado pelos resultados apresentados na Figura 7B, onde todas as amostras se mantiveram abaixo desse limite.

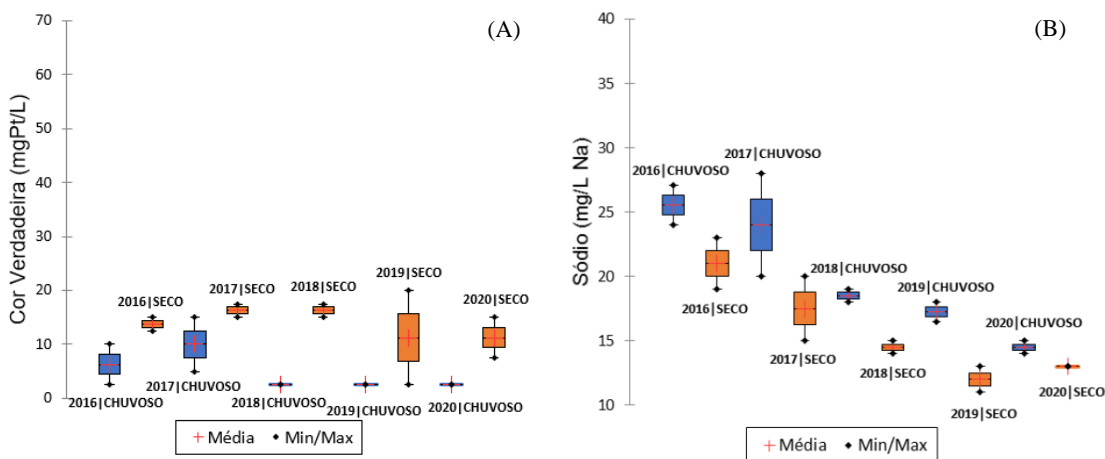


Figura 7. Representação do período sazonal da cor verdadeira (A) e sódio (B).

O potássio apresentou maiores concentrações no período chuvoso (Figura 8A). O potássio é um elemento que está em baixas concentrações nas águas naturais, sendo a lixiviação das rochas a sua principal fonte natural, entretanto a fonte antrópica é uma das suas fontes, visto que é um elemento utilizado na indústria e na agricultura (Piratoba *et al*, 2017). Segundo CETESB (2022) as concentrações de potássio em águas naturais são usualmente menores que 10 mg/L. As maiores concentrações de potássio obtidas nos anos em estudo, foram menores que 10 mg/L.

A variável magnésio, em sua análise sazonal, apresentou tendência a valores mais elevados durante o período chuvoso, exceto no ano de 2020 (Figura 8B). Os resultados foram semelhantes às observações feitas por Gomes (2023), nesse estudo dos seis lagos analisados, quatro mostraram concentrações de magnésio mais altas durante o período chuvoso. Este fenômeno é explicado pela redução do volume do reservatório, que resulta em uma maior concentração de sais de magnésio (Carvalho *et al.*, 2022).

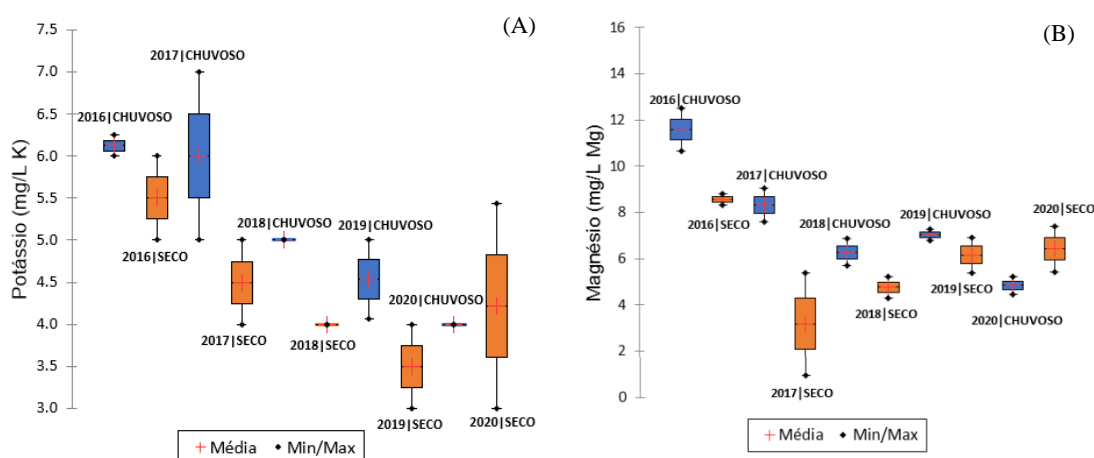


Figura 8. Representação do período sazonal do potássio (A) e magnésio (B).

Analisando as variações de pH entre os períodos chuvoso e de estiagem observa-se que durante as chuvas, as águas predominantemente assumem uma inclinação para o pH básico (Figura 9A). Costa *et al.* (2021) encontraram resultado semelhante em que o aumento nas precipitações impulsiona um crescimento gradual do pH, no Rio Guamá em Belém, Pará. Essa tendência se deve à maior diluição dos compostos dissolvidos e à aceleração do escoamento, como resultado do aumento do volume de água.

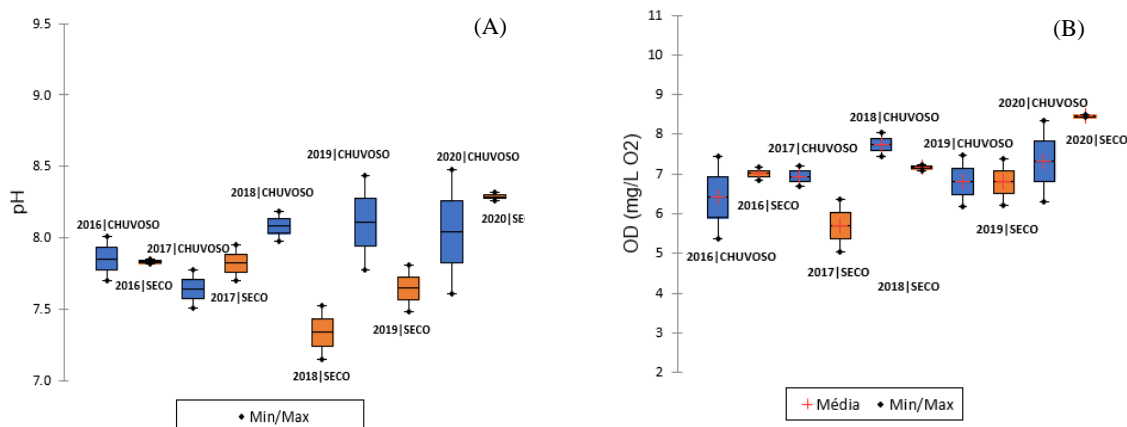


Figura 9. Representação do período sazonal do pH (A) e OD (B).

Ressalta-se que as espécies de alcalinidade como carbonato, bicarbonato e hidróxido são fundamentais para o efeito tampão, pois reagem com ácidos e bases adicionados ao sistema, mantendo o pH estável. Esse mecanismo é essencial em processos biológicos e industriais, onde flutuações de pH podem ser prejudiciais (Moreira *et al*, 2021).

Conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, os valores aceitáveis para o parâmetro de pH em águas doces de Classe 2 devem situar-se entre 6 e 9. As flutuações dos valores durante os períodos sazonais estão em conformidade com os requisitos legais. Essa conclusão está alinhada com a observação de Sousa *et al*. (2020), que identificou, em reservatórios do semiárido, valores consistentes com os limites estabelecidos pelo CONAMA.

A variável Oxigênio Dissolvido (OD) detém notável importância, uma vez que possibilita a avaliação do nível de poluição por matéria orgânica. De maneira geral, o açude Taquara exibiu valores mais elevados de OD durante o período chuvoso (Figura 9B). Resultados congruentes foram observados por Silva *et al*. (2018), onde o parâmetro de oxigênio dissolvido demonstrou concentrações mais altas durante a estação chuvosa. Esse comportamento é atribuído ao aumento do nível de água nos rios e nascentes, incrementando a turbulência e promovendo uma melhor aeração da água.

De acordo com a Resolução CONAMA 357/2005, os valores permitidos para o parâmetro de Oxigênio Dissolvido (OD) em águas doces de Classe 2 não devem ser inferiores a 5 mg/L de O₂. Os valores encontrados cumprem com esse requisito estabelecido. Em consonância, a ANA (2021) menciona que águas poluídas por esgotos tendem a apresentar baixa concentração de oxigênio dissolvido, uma vez que este é consumido durante o processo de decomposição da matéria orgânica.

Os resultados referentes ao fósforo total destacam que, de maneira geral, as concentrações mais elevadas foram identificadas durante o período de chuvas (ver Figura 10A). Esse padrão pode ser justificado pela ocorrência do escoamento superficial, que facilita a entrada de matéria orgânica no açude. De acordo com Mendonça *et al.* (2023), o período chuvoso contribui com a altas concentrações de fósforo, juntamente com a entrada de matéria orgânica da bacia hidrográfica.

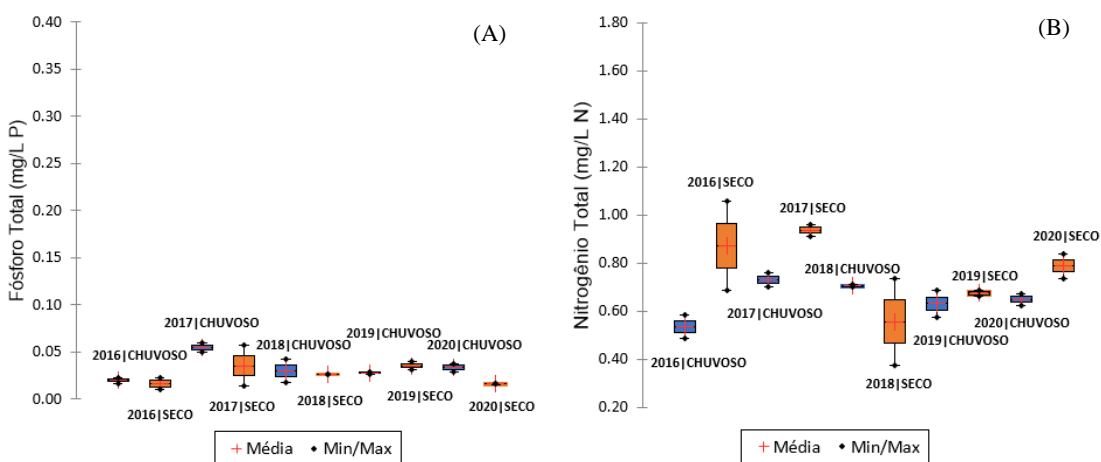


Figura 10. Representação do período sazonal do Fósforo Total (A) e Nitrogênio Total (B).

De acordo com a Resolução CONAMA 357/2005, os valores permitidos para o parâmetro de fósforo total em águas doces de Classe 2 devem ser inferiores a 0.030 mg/L de fósforo, em ambientes lênticos. O açude Taquara atendeu a essa regulamentação nos anos de 2020 (período de estiagem), 2019 (período chuvoso), 2018 (período de estiagem), e 2016 (períodos de estiagem e chuvoso).

Na Figura 10B, é possível visualizar o comportamento do nitrogênio total sob a influência da sazonalidade. Em geral, o nitrogênio total apresentou concentrações mais elevadas durante a estação de estiagem. De acordo com a ANA (2021), as principais fontes de nitrogênio no ambiente aquático derivam do lançamento de esgoto doméstico e efluentes industriais. Em áreas agrícolas, a escorrência de água da chuva em solos tratados com fertilizantes também contribui para o aporte de nitrogênio, assim como a drenagem de águas pluviais em áreas urbanas.

De acordo com a Resolução 357/2005 do CONAMA, que se aplica a ambientes lênticos, o valor máximo aceitável de Nitrogênio Total em águas doces de Classe 2 é de 1.27 mg/L. É importante notar que o açude em estudo está em conformidade com essa resolução regulatória.

Análise Sazonal da Variáveis Biológicas

As flutuações sazonais nas concentrações de clorofila "a" estão evidenciadas na Figura 11A, onde as maiores concentrações foram observadas durante o período de estiagem. Uma conclusão oposta foi encontrada por Lacerda e Mapeli. (2021), em que concentrações mais elevadas de clorofila "a" foram identificadas durante os meses com maior disponibilidade hídrica em áreas de cerrado, na Serra Bandeira, Bahia. Sousa *et al.* (2020) constataram que em reservatórios situados em regiões semiáridas, valores superiores de clorofila "a" foram observados durante períodos de temperaturas mais altas.

Conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, as concentrações aceitáveis para o parâmetro de clorofila "a" em águas doces de Classe 2 não devem exceder 30 µg/L. Observa-se que, na maioria das análises, os valores deste parâmetro se encontram dentro dos padrões definidos. Contudo, uma exceção foi identificada no ano de 2018, durante o período de estiagem no açude Taquara, com médias de 40.94 µg/L. Um resultado análogo foi obtido por Pontes *et al.* (2019), onde concentrações relativamente elevadas de clorofila foram registradas no reservatório Paulo Sarasate-CE, ultrapassando os valores estipulados pela Resolução CONAMA 357/2005.

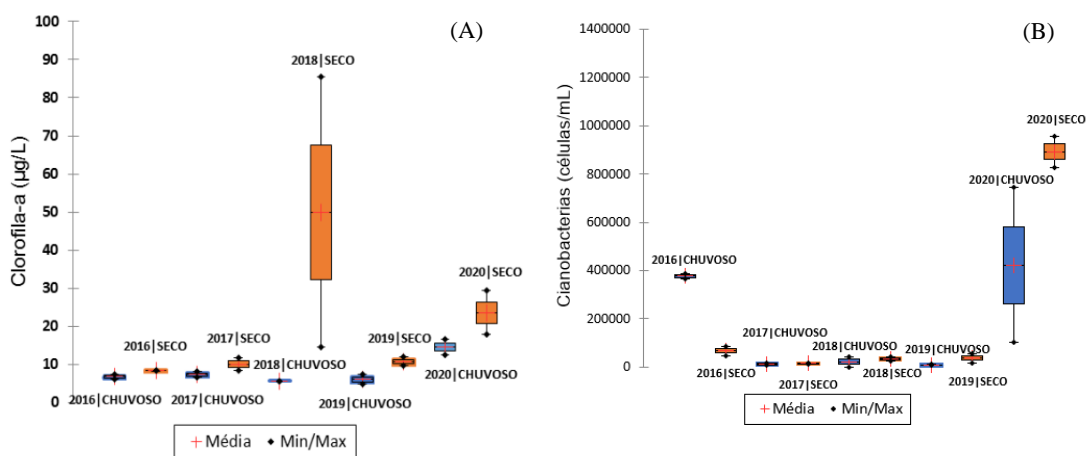


Figura 11. Representação do período sazonal da clorofila "a" (A) e cianobactérias (B).

Na Figura 11B, é possível observar o padrão das cianobactérias em resposta à sazonalidade. De maneira geral, o açude Taquara apresentou maiores valores durante o período de estiagem, um achado similar ao obtido por Lima (2022), que identificou uma maior concentração de cianobactérias durante a época de seca.

Conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, os limites aceitáveis para o parâmetro de cianobactérias em águas doces de Classe 2 não devem exceder 50000 células/mL. Por meio da análise descritiva, constata-se que os seguintes períodos não estão em conformidade com a legislação: 2016 (estiagem e chuvoso), 2019 (estiagem) e 2020 (estiagem e chuvoso).

Segundo Nichetti (2022), a proliferação de cianobactérias em águas, principalmente em rios, está associada à ação antrópica e à poluição das águas provenientes das atividades da indústria, agricultura e à falta de saneamento básico. O acompanhamento da evolução das cianobactérias em águas de abastecimento é de extrema importância para a segurança e a saúde da população, principalmente perante os problemas ambientais da atualidade.

Na Figura 12, é possível observar o padrão de variação sazonal da *E. coli*. De forma geral, a *E. coli* apresentou concentrações mais elevadas durante a estação chuvosa. Os coliformes termotolerantes, sendo predominantemente representados pela *Escherichia coli*, possuem limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05, com um valor máximo permitido de 1000 NMP por 100 mL. Durante o período de análise no açude, as concentrações observadas estiveram em conformidade com os requisitos desta resolução.

De acordo com Sousa *et al.* (2023), a detecção de *E. coli* sugere que a contaminação provavelmente decorre da ausência de saneamento básico nas comunidades ribeirinhas, onde há o lançamento inadequado de esgoto doméstico diretamente nos estuários.

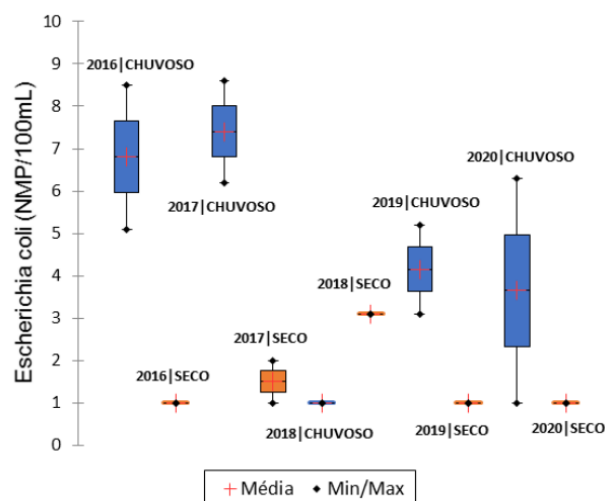


Figura 12. Representação do período sazonal do *E. coli*.

Santos *et al.* (2018) avaliaram o efeito sazonal na qualidade das águas superficiais do rio Jucu no Espírito Santo, analisando variáveis físico-químicas e microbiológicas e verificaram que o fator sazonalidade contribuiu para o agravamento na qualidade da água durante o período avaliado.

Observa-se que o IET aponta para todos os anos e períodos analisados águas classificadas segundo o estado trófico como mesotrófico, que indica um enriquecimento moderado com nutrientes.

É importante destacar que todos os parâmetros analisados podem estar sofrendo interferência das ações antrópicas, pois o desmatamento tem impactos significativos no reservatório, contribuindo para o assoreamento. A perda de vegetação nativa expõe o solo à erosão, facilitando o transporte de sedimentos para o açude durante as chuvas. Além disso, prejudica a camada produtiva do solo, que é rasa na região semiárida, diminuindo sua fertilidade. O escoamento superficial aumentado dificulta a recarga do reservatório, já que reduz a infiltração e consequentemente a água que atinge o lençol freático. O gado bovino pastando próximo ao açude também afeta a qualidade da água, pois seus excrementos ricos em nutrientes podem ser carregados para dentro da bacia hidráulica. A presença de lixões na área de influência do açude causa impactos ambientais negativos, como poluição do solo e do lençol freático. Além disso, o despejo inadequado de resíduos domiciliares e de construção civil é observado na região do reservatório e nas zonas urbanas dos municípios (Ceará, 2017).

Conclusões

A análise abrangente dos parâmetros físicos, químicos e biológicos que compõem a qualidade da água do açude Taquara revela um cenário em que a maioria dos valores, durante o período de avaliação, se situa dentro dos limites estabelecidos pela Resolução 357/05 do CONAMA para águas doces classe 2. Isso indica um quadro geral de conformidade com os padrões de qualidade regulamentados.

No entanto, é importante salientar que os parâmetros fósforo total, ferro, clorofila *a* e cianobactérias não atenderam aos critérios da mencionada resolução, sugerindo a presença de possíveis interferências de origem antrópica. Esse cenário instiga a reflexão sobre as atividades humanas que podem estar contribuindo para tais discrepâncias e a necessidade de uma abordagem mais atenta no sentido de mitigar essas influências negativas.

Ao longo do período de análise, fica claro o impacto da sazonalidade nos valores dos parâmetros avaliados. Essa observação aponta para a relevância de considerar a flutuação sazonal ao interpretar os resultados e ao planejar intervenções ou políticas destinadas à utilização, preservação e melhoria da qualidade da água nesse ecossistema.

Agradecimientos

Os autores agradecem à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), pelo fornecimento dos dados do seu banco de dados de monitoramento qualitativo e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa de mestrado concedida.

Referencias bibliográficas

- ANA, Agência Nacional de Águas (2019a) *Monitoramento da Qualidade da Água em Rios e Reservatórios*. In: Bases Conceituais para Monitoramento de Águas Continentais. Brasília: Unidade 2, 4 pp.
- ANA, Agência Nacional de Águas (2019b) *Monitoramento da Qualidade da Água em Rios e Reservatórios*. In: Fundamentos legais sobre a Gestão da Qualidade das Águas. Brasília: Unidade 1, 4 pp.
- ANA, Agência Nacional de Águas (2021) *Indicadores de qualidade - Índice de qualidade das águas (IQA)* Acesso em 16 de maio de 2023, disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn1.
- APHA, American Public Health Association (2017) *Standard methods for the examination of water and wastewaters*. Water Environment Federation, Chair Eugene W. Rice, American Public Health Association Andrew D. Eaton, American Water Works Association, 1445 pp.
- Bernardini, C. S. M., Silva, F. J. A., Farrapeira Neto, C. DE A., Albuquerque, G. de L. S., Alencar. I. F. DE O., Sales, R. J. de M., Toniolli, L. DE S. (2021) Qualidade da água como retrato da vulnerabilidade socioambiental: o caso do rio cocó-Fortaleza/CE. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, **14**(1) <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.1.70470>.
- Carvalho, B. de A. F., Eloí, W. M., Alexandre, D. M. B. (2022) Análise sazonal da qualidade da água do açude Ayres de Sousa, Ceará, Brasil. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, **15**(3), 1203–1219. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.3.81045>
- Carvalho, L. L. S. D., Lacerda, C. F. D., Carvalho, C. M. D., Lopes, F. B., Andrade, E. M. D., Gomes Filho, R. R. (2020) Spatio-temporal variability of groundwater quality in an irrigated area in the Brazilian semiarid region. *Research, Society and Development*, [S. l.], **9**(8), 644985786. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5786>
- CEARÁ, Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (2017) *Inventários ambientais de açudes da Bacia do Acaraú: Açude Taquara*. Fortaleza, 122 pp.
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2022) *Qualidade das águas no estado de São Paulo em 2021* (2022) São Paulo. Acesso em 6 de setembro de 2023, disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2022/11/RAI-2021-Relatorio-Qualidade-das-Aguas-Interiores-no-Estado-de-Sao-Paulo.pdf>.
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005) *Resolução CONAMA nº 357*, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.
- Costa, g. M. M., Ribeiro, H. M. C., Pantoja, D. N. S. M., Pontes, A. N., Coutinho, E. C., Bordalo, A. O., Meireles, R. R. (2021) Avaliação do efeito da sazonalidade na qualidade da água superficial no rio Guamá, Belém, PA. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, **12**(10), 545-560. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0043>
- Ferreira, D. B., Barroso, g. R., Dantas, M. S., Oliveira, K. L. DE., Christofaro, C., Oliveira, S. C. (2021) Pluviometric patterns in the São Francisco River basin in Minas Gerais, Brazil. *RBRH*, **26**(27) <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210035>
- Google Maps (2024) *Datos de mapas @ 2024 Google [Internet]*. Consultado el 29 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://maps.app.goo.gl/osTw4gTmfhe5Jpzb9>

- Gomes, J. M. Estudo sazonal de parâmetros físico-químicos em lagos na região sul do Amazonas. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Federal do Amazonas, Humaitá (AM) 2023. Acesso em: 16 de agosto de 2023, disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9499>.
- Koppen, W. (1918) Klassifikation der klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf, *Pet. Mitt*, **64**, 193-203.
- Lacerda, V. O., Mapeli, A. M. (2021) Efeitos da sazonalidade sobre a fenologia e a fisiologia de *Parkia platycephala* Benth (Fabaceae, Caesalpinioideae) em área de Cerrado. *Ciência Florestal*, **31**, 1344-1363. <https://doi.org/10.5902/1980509839111>.
- Lima, F. J. D. O., Lopes, F. B., Andrade, E., Rocha, F. C. D., Meireles, A. C. (2022) Spatio-Temporal Dynamics of Toxic Cyanobacteria in an Artificial Lake in the Brazilian Semi-Arid Region. *Revista Caatinga*, **35**, 423-435. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n218cr>.
- Lima, W.S., Garcia, C.A.B. (2008) Qualidade da Água em Ribeirópolis-SE: o Açude do Cajueiro e a Barragem do João Ferreira. *Scientia Plena*, **4**(12), 1-24. Acesso em: 18 de Agosto de 2023, disponível em: <https://scientiaplenu.emnuvens.com.br/sp/article/view/650>.
- Mascoli Junior, R., Anjos, R. C. dos, Sousa, Y. de L., Ribeiro, M. L. (2020) Análise temporal da qualidade da água de corpos hídricos urbanos. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, **13**(2), 263-272. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.64563>
- Mendonça, J. C., Lopes, F. B., Andrade, E. M., Praxedes, C. F., Lima, F. J. O., Silva, F. H. O. (2023) Qualitative vulnerability of the waters of a surface reservoir subjected to drought in a tropical semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, **54**(2023). <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230033>
- Moreira, O. B. de., Castro, L. dos A., Oliveira, M. A. L. de. (2021) Cálculo e preparo de soluções tampão: guia completo usando o software peakmaster. *Química Nova*, **44**(6), 783-791. Acesso em 09 de abril de 2024, disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170702>
- Nascimento, M. D. N., Bush, M., Bicudo, D. D. C. (2021) Qualidade da água e dinâmica espacial e sazonal no maior reservatório de fornecimento de água do Brasil e implicações para comunidades de diatomáceas. *Acta Limnológica Brasiliensis*, **33**. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X7120>
- Nichetti, L. M. K., Dysarz, J. M., Batista, A. G., Dalonso, N. (2022) Avaliação das florações de cianobactérias nos rios de abastecimento do município de Joinville. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **27**, 477-487. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200289>.
- Piratoba, A. R. A., Ribeiro, H. M. C.; Morales, G. P., Gonçalves, W. G. (2017) Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, **12**(3), 435-456. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1910>
- Pontes, M. M., Barros Filho, M. A. C., Freitas, F. R. S. (2019) Variação temporal de fatores limnológicos no reservatório Paulo Sarasate, Ceará. In *Anais do 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Natal, RN. Acesso em 16 outubro de 2023, disponível em: <https://www.abes-dn.org.br/congresso-da-abes-em-natal-acesse-anais-eletronicos-palestras-e-certificados/>.
- Pratte-Santos, R., Terra, V.R, Azevedo Júnior, R.R. (2018) Avaliação do efeito sazonal na qualidade das águas superficiais do rio Jucu, Espírito Santo, sudeste do Brasil. *Sociedade & Natureza*, [S. l.], **3**, 127-143. <https://doi.org/10.14393/SN-v30n3-2018-7>.
- Santos, Z., Sousa, M. S., Santos, R. F., Lopes, R. B., Melo, S. G., Moura, L. S. (2021) Análise do índice de qualidade de água em função da sazonalidade na microbacia do Irurá no município de Santarém-Pará. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, **12**(5), 314-326. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0027>
- Silva, A. E. P., Angelis, C. F., Machado, L. A. T., Waichaman, A. (2008) Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. *Acta Amazônica*, **38**(4), 733-742. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000400017>
- Silva, A. G., Souza, L. D. (2013) Efeitos antrópicos e sazonais na qualidade da água do rio do Carmo. *HOLOS*, **5**, 122-136. <https://doi.org/10.15628/holos.2013.1197>.

- Silva, M. B. M. DA., Brandão, I. A. de P., Ribeiro, M. M. R. (2022) Feasibility, seasonality and reliability of rainwater harvesting in buildings of a university in Campina Grande, Paraíba. *RBRH*, **27**(17). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220210127>
- Sousa, C. B., Costa, F. N., Funo, I. C. da S. A., FREITAS, A. S., BARROS, T. M. (2023) Qualidade microbiológica de ostras e de águas em manguezais de macromaré da costa amazônica (ilha de São Luís, MA), Brasil. *Engenharia Sanitária E Ambiental*, **28**, e20220051. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220051>
- Sousa, K. P. de, Eloi, W. M., Barreto, F. M. DE S. (2021) Evaluation of the water quality of the Maceió stream estuary. *International Journal of Development Research*, **11**(09), 50282-50288. <https://doi.org/10.37118/ijdr.22897.09.2021>.
- Sousa, K.A., DE Espindola, G. M., da Silva, C.E. (2020) Análise de atributos limnológicos em reservatórios do semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **14**(01), 357-371. <https://doi.org/10.26848/rbgf-v14.1.p357-371>

REVISTA AIDIS

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

**ANÁLISE EVOLUTIVA E COMPARATIVA DO USO
E COBERTURA DO SOLO PARA AUXILIAR NO
CADASTRO AMBIENTAL RURAL NO MUNICÍPIO
DE SÃO FÉLIX DO XINGU – PA.**

Raisa Rodrigues Neves ¹
* Thayson Assunção da Silva de Freitas ¹
Vanessa de Nazaré Cunha Lopes ²
Flávia Sales Velasco ³
Renato Augusto Soares Rodrigues ³

**EVOLUTIONARY AND COMPARATIVE ANALYSIS OF LAND USE AND
COVER TO ASSIST IN THE RURAL ENVIRONMENTAL REGISTRATION
IN THE MUNICIPALITY OF SÃO FÉLIX DO XINGU – PA.**

Recibido el 4 de marzo de 2024. Aceptado el 21 de junio de 2024

Abstract

The environmental changes caused by anthropic activity directly reflect the change in the landscape of a region and, in this context, the city of São Félix do Xingu - PA has gone through several changes. This work presents a land use and land cover mapping to get to know the environmental reality of the city and verify the reliability of MapBiomas data for the implementation of the Rural Environmental Registry (CAR) in order to collaborate with environmental control. To perform the multitemporal analysis, images of five-year time intervals from 1985 to 2020 were used, and to verify the reliability of the MapBiomas land cover data, a comparison was made with the land cover of small, medium and large rural properties. declared and approved in SICAR/PA through global accuracy and Cohen's kappa coefficient. The results indicate that there was a very expressive percentage of native forest reduction, giving way to the advance of agriculture and livestock activities until 2010, but later this percentage decreased with the application of policies aimed at reducing illegal suppression of vegetation. The results of the land cover comparison showed that MapBiomas reflects better responses for smaller scale analyses, that is, for rural properties greater than 4 fiscal modules. Therefore, it is concluded that the MapBiomas database is relevant to assist in the delimitation of the land cover of medium and large rural properties to be declared in the CAR, being a relevant tool to help implementation of the CAR.

Keywords: land cover, MapBiomes, rural environmental register, rural properties.

¹ Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Brasil.

² Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal do Pará, Brasil.

³ Faculdade de Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil.

*Autore correspondal: Universidade Federal do Pará, Brasil. Campus Universitário de Tucuruí – PA, Faculdade de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rodovia BR 422 km 13 – Canteiro de Obras UHE - Vila Permanente, Tucuruí - PA, 68464-000. Email: raisaneves@ufpa.br

Resumo

As alterações ambientais causadas pelas ações antrópicas refletem diretamente na mudança da paisagem de uma região e, nesse contexto, o município São Félix do Xingu – PA tem passado por diversas modificações. Este trabalho apresenta um mapeamento da cobertura do solo para conhecer a realidade ambiental do município e verifica a confiabilidade de dados MapBiomas para a implantação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) de maneira a colaborar com o controle ambiental. Para a realização da análise multitemporal utilizou-se imagens de intervalos temporais quinquenais desde 1985 a 2020, e para verificar a confiabilidade dos dados de cobertura do solo do MapBiomas fez-se a comparação com a cobertura do solo de pequenas, médias e grandes propriedades rurais declaradas e aprovadas no SICAR/PA por meio da exatidão global e coeficiente Kappa. Os resultados mostraram que houve um percentual bastante expressivo de redução de floresta nativa cedendo espaço ao avanço de atividades agropecuárias até 2010, mas posteriormente esse percentual diminuiu com a aplicação de políticas voltadas a diminuição de supressão ilegal da vegetação. Os resultados da comparação de cobertura do solo mostraram que o MapBiomas reflete melhores respostas para análises em menor escala, isto é, para propriedades rurais superiores a 4 módulos fiscais. Portanto conclui-se que a base de dados MapBiomas é pertinente para auxiliar na delimitação da cobertura do solo de médias e grandes propriedades rurais a serem declarados no CAR, sendo uma ferramenta fundamental para ajudar a implementação do CAR.

Palavras-chave: cadastro ambiental rural, cobertura do solo, imóveis rurais, MapBiomas.

Introdução

A Amazônia vem passando por diversas transformações devido a seu grande potencial econômico, a sua biodiversidade, clima e terras produtivas. A busca por recursos naturais, a pressão demográfica, o desenvolvimento da tecnologia, o preço da terra, a expansão de fronteiras agropecuárias e outros fatores favoreceram a ocorrência de uma maior pressão no território amazônico (Margulis, 2002). Essa pressão acaba acarretando em uma degradação ambiental desenfreada, trazendo sérios prejuízos para o meio e alteração de sua paisagem.

O município São Félix do Xingu – PA está inserido dentro do território amazônico e é um dos que mais tem sofrido com as alterações ambientais provenientes de ações antrópicas, acarretando em extensas áreas desmatadas para dar espaço a expansão de atividades agropecuárias na região. Conhecer a dinâmica da ocupação e uso da terra é fundamental para propor medidas de controle e monitoramento da degradação ambiental, e é uma ferramenta de auxílio fundamental para colaborar com uma adequada gestão do território. Neste contexto, o Cadastro Ambiental Rural (CAR) entra como um instrumento que reúne diversas informações de localização e da situação ambiental de imóveis rurais, com o objetivo de auxiliar no controle, monitoramento e minimização de desmatamentos irregulares.

A questão central deste trabalho é realizar uma análise multitemporal do município a partir de dados MapBiomas e avaliar a confiabilidade de dados secundários gerados a dele, bem como os dados da cobertura do solo disponibilizada pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS) e verificar se essa base de dados pode auxiliar na implantação do CAR.

A realização desta pesquisa se deu, em um primeiro momento, com a apresentação dos principais conceitos que serão abordados ao longo do trabalho. O desenvolvimento da pesquisa encontra-se separado em duas etapas:

- Na etapa I realizou-se um mapeamento da dinâmica cobertura da terra para conhecer como se deu o processo de ocupação da terra no município São Félix do Xingu desde 1985 a 2020 e quais foram os eventos que contribuíram para a alteração da paisagem na região. Para isso o banco de dados utilizado para realizar o mapeamento dessa dinâmica foi o do projeto MapBiomias.
- O mapeamento da cobertura da terra deve estar o mais próximo possível da realidade ambiental, principalmente ao declarar a cobertura do solo de imóveis rurais no CAR. A vista disso, na etapa II fez-se uma comparação entre a cobertura do solo disponibilizada pela SEMAS a partir dos dados MapBiomias e a cobertura do solo de pequenas, médias e grandes propriedades rurais disponíveis no Sistema de Cadastro Ambiental Rural (SICAR/PA). Por fim, apresenta-se as considerações finais.

Essa pesquisa tem o objetivo de analisar a evolução e comparação do uso e cobertura do solo para auxiliar no Cadastro Ambiental Rural no município de São Félix do Xingu -PA.

Metodologia

Todos os procedimentos metodológicos realizados neste trabalho estão exibidos na Figura (1), a qual apresenta as etapas realizadas para a elaboração deste, e a seguir, está descrito como se procedeu em cada uma destas etapas.

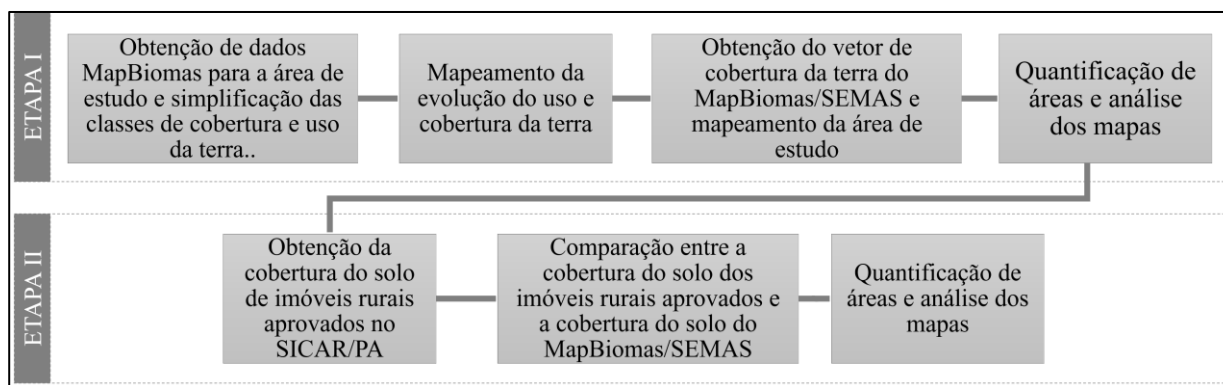


Figura 1. Procedimentos metodológicos.

Área de Estudo

O município São Félix do Xingu foi emancipado em dezembro de 1961 pela Lei 2460, onde houve o desmembramento do município de Altamira. Encontra-se localizado na região sudeste do estado do Pará (Figura 2), há 1050 km de distância da capital do estado (Claudino, Ferreira e Pocard-Chapuis, 2020). A população era de 91340 habitantes em 2010 (IBGE, 2011) e a população estimada para 2021 é de 135732 habitantes (IBGE, 2021). A densidade demográfica equivale a 1.08 hab/km² (IBGE, 2011) e possui uma extensão territorial de 84212.903 km² (IBGE, 2021).

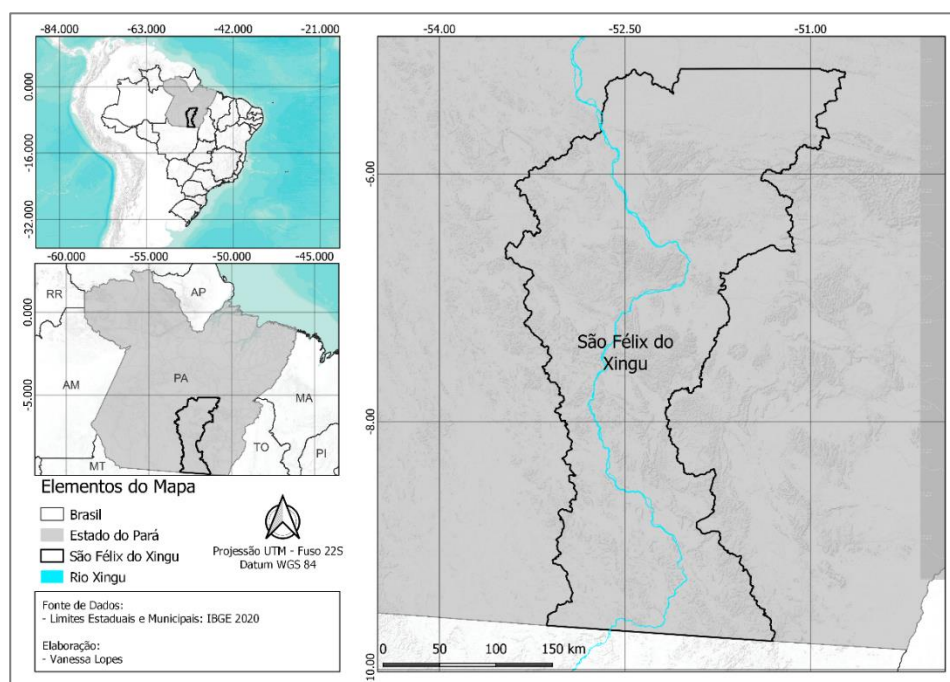


Figura 2. Mapa de localização de São Félix do Xingu-PA.

A massa d'água mais extensa do município é o Rio Xingu e a cobertura vegetal que predomina na região é a Floresta Equatorial Latifoliada, no entanto, possui consideráveis extensões de Savana, Cerradão e outros (Claudino, Ferreira e Pocard-Chapuis, 2020; Macedo, 2009).

O solo da região possui fertilidade mediana e características morfológicas consideravelmente boas, composto por Nitossolos Vermelhos Distróficos e Eutróficos, Argissolos Vermelhos-Amarelos Distróficos e Neossolos Litólicos Distróficos. Quanto ao relevo, possui características de plano a suave ondulado (Braga, 2015).

O município abriga parte da APA Triunfo do Xingu criada pelo decreto 2.612 de 04 de dezembro de 2006, a APA possui extensão de 16.796,32 km², dispõe de conselho gestor, entretanto não conta com plano de manejo, sendo ele uma ferramenta fundamental e obrigatória para assegurar a manutenção da biodiversidade e seus desafios, visando salvaguardar ecossistemas, espécies ameaçadas e diversos serviços ambientais. Além da APA, São Félix do Xingu abriga ainda em seu território duas Floresta Nacional, uma Reserva Biológica e uma Estação Ecológica (Brasil, 2021; D'amico, Coutinho e Moraes, 2018).

As áreas protegidas estão presente em grande extensão no município, como as terras indígenas Apyterewa, Araweté Igarapé Ipixuna, Badjonkore, Kayapó e Trincheira Bacaja, todas dentro do estado do Pará, e a Menkragnoti que se divide entre Pará e Mato Grosso (Funai, 2024).

Atualmente, a economia no município gira em torno das atividades de mineração e da agropecuária, e está entre os três municípios possuidores do maior efetivo de rebanho bovino do Brasil, com cerca de 2,4 milhões de cabeças, ocupando o ranking desde 2010 até atualmente. O censo agropecuário de 2017 apontou São Félix do Xingu como possuidor da maior área destinada a pastagem no estado (Claudino, Ferreira e Pocard-Chapuis, 2020; Braga, 2015; Fapespa, 2021).

Levantamento de Dados

Para atingir o propósito deste estudo, os dados utilizados foram obtidos em quatro banco de dados distintos, descritos abaixo. Os limites municipais e estaduais foram obtidos a partir dos metadados disponíveis pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com escala de 1:250000.

Para a análise multitemporal do uso e cobertura do solo, foi realizado o download da coleção 6.0 da cobertura MapBiomas que possui um recorte temporal de 1985 a 2020. Essa coleção foi obtida através do Google Earth Engine, onde possibilita o download das imagens raster apenas da região em estudo, com resolução de 30 metros.

O levantamento da classificação da cobertura da terra do município foi feito a partir de dados vetoriais disponibilizados pela SEMAS a partir da iniciativa MapBiomas. O download da cobertura do solo dos imóveis com CAR aprovado pela SEMAS foi realizado na plataforma SICAR/PA.

A Tabela 1 exhibe as bases cartográficas utilizadas no estudo.

Tabela 1. Bases Cartográficas

Fonte	Informação	Tipos de dados
IBGE	Limite Municipal e estadual	Shapefile
SEMAS	Classificação da cobertura do solo	Shapefile
SICAR/PA	Cadastros Ambientais Rurais aprovados	Shapefile
MapBiomias	Mapas de uso do solo	Raster

Processamento de dados

Etapa I: Dados do MapBiomias

Para a realização do mapeamento da evolução da cobertura da terra no município, efetuou-se uma análise quinquenal a fim de realizar um diagnóstico mais detalhado. Sendo assim, as imagens utilizadas foram referentes aos anos de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020.

Contudo, com intenção de verificar o comportamento do uso do solo considerando datas importantes para a preservação ambiental acrescentou-se dois anos à análise, 2008 e 2012. Um corresponde a data do Marco Legal, conhecido por marco temporal, que “Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências” (Brasil, 2008), e o outro é o ano da promulgação do Código Florestal Brasileiro, respectivamente.

Estas imagens foram obtidas através do portal MapBiomias, adicionadas ao QGIS e reprojetaadas para EPSG em metros para poder fazer-se o cálculo de área. A reprojeção de coordenadas foi efetuada utilizando “processamento em lote”.

Os mapas disponibilizados pelo MapBiomias classificam 26 tipos de uso e ocupação do solo, sendo que 11 foram identificados no município. Com o propósito de possibilitar um melhor entendimento dos resultados, as classes observadas no município foram simplificadas, agrupadas em 5 tipos de uso da terra. Conforme exposto na Tabela (2).

Tabela 2. Simplificação de classes

Código de Classes da Legenda e Paleta de cores MapBiomias identificadas no Município	Classificação Simplificada
Formação Florestal Formação Savânica	Floresta
Campo Alagado e Área Pantanosa Formação Campestre	Formação Natural não Florestal
Pastagem, Agricultura de lavoura temporária (Soja e outras lavouras temporárias) Silvicultura	Agropecuária
Área Urbanizada Mineração	Área não vegetada
Rio, Lago e Oceano	Corpo D'água

Em um primeiro momento, alterou-se a projeção para “Projeção Equivalente de Albers”, que é indicada no Manual Técnico em Geociências para superfícies superiores a 50 km (IBGE, 2019). Depois, feito a reclassificação das imagens raster agrupando as classes em um nível menor com a ferramenta “reclassificação por tabela”, seguindo o código de classes da legenda e paleta de cores utilizadas na coleção 6.0 do MapBiomias.

Posteriormente, foram elaborados mapas da evolução do uso da terra usando Sistema de Referência de Coordenadas WGS 84, que é o mesmo utilizado pelo projeto MapBiomias. A classificação de cobertura do solo disponibilizada pela SEMAS utiliza a base do MapBiomias, gerando uma classificação secundária, onde é analisado a transição das classes de cobertura do solo entre 2008 e 2020 (Semas, 2021).

Os dados disponibilizados pela secretaria compreendem a classe de remanescente de vegetação nativa, área consolidada, área antropizada não consolidada, área em regeneração e corpo d’água. Para este estudo, a classe regeneração foi considerada como área consolidada, tendo em vista que, de acordo com a tabela de atributos do vetor, essas áreas foram identificadas como áreas consolidadas em 2008.

Após o download, o vetor foi trabalhado no QGIS e elaborado o mapa de cobertura do solo segundo essa reclassificação. A classificação da cobertura do solo disponibilizada pela SEMAS será relatado ao decorrer do trabalho como “MapBiomias/SEMAS”.

Etapa II: Dados dos Imóveis Rurais

Com o propósito de realizar a comparação entre a cobertura do solo dos imóveis rurais aprovados no SICAR/PA com a cobertura do solo MapBiomias/SEMAS, fez-se a seleção de imóveis com cadastros aprovados no município até o dia 02 de abril de 2022. O banco de dados de imóveis rurais cadastrados até a data mencionada, apresentava 1.021 imóveis cadastrados, sendo que imóveis com cadastros aprovados até dezembro de 2020 totalizam 57 com status “Ativo” ou “Pendente” pois ainda não aderiram ao PRA.

Nesta pesquisa foram analisados imóveis com CAR aprovados no segundo semestre de 2020, em que continha 29 imóveis. A fim de analisar amostras de imóveis de pequenas à grandes extensões territoriais, separou-os em grupos, sendo que o Grupo A são pequenas propriedades com até 4 módulos fiscais, Grupo B são médias propriedades superior a 4 até 15 módulos fiscais e o Grupo C são grandes propriedades acima de 15 módulos fiscais, essa classificação está definida na Lei 8629 de 25 de fevereiro de 1993. Sendo que para o município São Félix do Xingu cada módulo fiscal corresponde a 75 hectares.

Após a separação dos grupos, utilizou-se o método de amostragem aleatória simples para a seleção dos imóveis rurais. Segundo Luiz e Epiphany (2001), esse método garante que qualquer amostra tenha a mesma possibilidade de ser selecionada, e foi usada por Sacramento *et al.* (2019), em seu estudo titulado como “ Análise de Métricas de Paisagem e influencias do uso do solo e cobertura vegetal em fragmentos florestais da mata atlântica”, por Lopes *et al.* (2019) em “Uma abordagem temporal para o espaço rural goiano por meio da aplicação de métodos Estatísticos à interpretação visual de imagens landsat – 1985 – 2017” e outros.

Portanto, se estabeleceu uma amostra de 9 imóveis rurais, sendo que foram selecionados 3 imóveis para cada grupo. A seleção dos grupos foi realizada por sorteio com auxílio de planilha eletrônica. A Tabela (3) apresenta os grupos de imóveis rurais analisados.

Tabela 3. Grupos de imóveis rurais analisados

Grupo	Módulos Fiscais	Imóvel	Número do Recibo do CAR
A	Até 4	P1	PA-1507300-13212C98D43648A8986687052E6E6CE5
		P2	PA-1507300-59C7010BAD614CE7B7315010ADFBE4A4
		P3	PA-1507300-9279F53A552E4AAFA76C4EAD026673ED
B	Superior a 4 até 15	M1	PA-1507300-B1843B0972C34E398FB8F02C33ED90BB
		M2	PA-1507300-B7ED2AB011BA439FB868616D8E286F36
		M3	PA-1507300-570BB63ED7A349AE8541COAAF3E8CAAC
C	Superior a 15	G1	PA-1507300-4AD6A673864D4437952CE1BF22830EF7
		G2	PA-1507300-032A8E74FEBB42C8AB7AD1DDBFCE95B0
		G3	PA-1507300-7C229A80984745739B843AEC60765DFE

Logo após, fez-se o download da cobertura do solo dos imóveis selecionados e, após serem importados para o QGIS, foram trabalhados os dados de remanescente de vegetação nativa, área consolidada e área antropizada não consolidada. Seguidamente, foi efetuado o recorte da cobertura do solo MapBiomass/SEMAs para as áreas dos imóveis, e então, foram gerados mapas para a comparação e, com a quantificação dessas áreas, fez-se a análise do nível de concordância e exatidão global.

Exatidão global e Nível de Concordância

Para avaliar a Exatidão Global e o nível de concordância entre as classificações, utilizou-se o coeficiente Kappa, método proposto por Cohen (1960), que consiste em determinar até que ponto um julgamento corresponde a outro, ou seja, qual o nível de concordância entre as duas bases de cobertura do solo. Essa metodologia é bastante utilizada em diferentes áreas do conhecimento, bem como foi empregue por Soares e Moraes (2018), Mastella (2017), Flores e Soriano (2019) e Arana *et al.* (2016).

Para este estudo, a classe de referência será a cobertura de solo declarada no SICAR/PA, tendo em vista que foram aprovadas e validadas por técnicos capacitados por órgão ambiental competente.

Calculou-se a Exatidão Global e o coeficiente Kappa para o Grupo A, Grupo B e Grupo C. Os valores obtidos são apresentados na seção de *Resultados e discussões* deste trabalho.

Resultados e discussões

Análise Multitemporal

A análise multitemporal da cobertura da terra realizado neste estudo teve como resultado três mapas do município, sendo que o primeiro apresenta a evolução do uso e ocupação da terra nos anos de 1985, 1990, 1995 e 2000 (Figura 3), o segundo exibe a evolução nos anos de 2005, 2008, 2010 e 2012 (Figura 4), e o terceiro indica a evolução em 2015 e 2020 (Figura 5). Com base nos mapas gerados, pôde-se obter as áreas referente a cada classe em relação a área total do município, conforme exposto na Tabela (6).

Tabela 6. Área das classes

Ano	Floresta	Formação Natural não Florestal	Agropecuária	Área não vegetada	Corpo D'água
1985	8168421.63	118595.88	38380.14	702.09	98974.53
1990	8120965.37	116442.99	85354.83	1691.10	100621.35
1995	7969412.44	116214.03	236545.02	2119.59	100781.46
2000	7675505.17	116740.62	532137.51	1971.63	98718.84
2005	7093414.26	114549.48	1116133.29	1999.17	98980.56
2008	6815920.84	113917.50	1394364.06	2240.01	98636.76
2010	6722532.06	114111.45	1487625.66	2348.01	98463.51
2012	6685718.21	114238.08	1523700.36	3244.95	98180.01
2015	6635441.73	113808.51	1571778.73	5217.21	98832.78
2020	6427922.13	110077.02	1780113.52	7584.48	99374.04

Partindo desta análise, as classes que tiveram maior alteração ao longo do período estudado foi a classe de floresta e agropecuária. Nas classes de formação natural não florestal, área não vegetada e corpo d'água não houveram mudanças significativas, pois, as variações que tiveram ao longo dos anos foram de 0.1%, 0.0008% e 0.0003%, respectivamente.

A Figura (3) apresenta a variação entre os anos de 1985 a 2000, onde foi possível constatar que houve supressão, e conseqüentemente a diminuição da área de floresta em 5.85%, enquanto que a agropecuária aumentou em 5.86%.

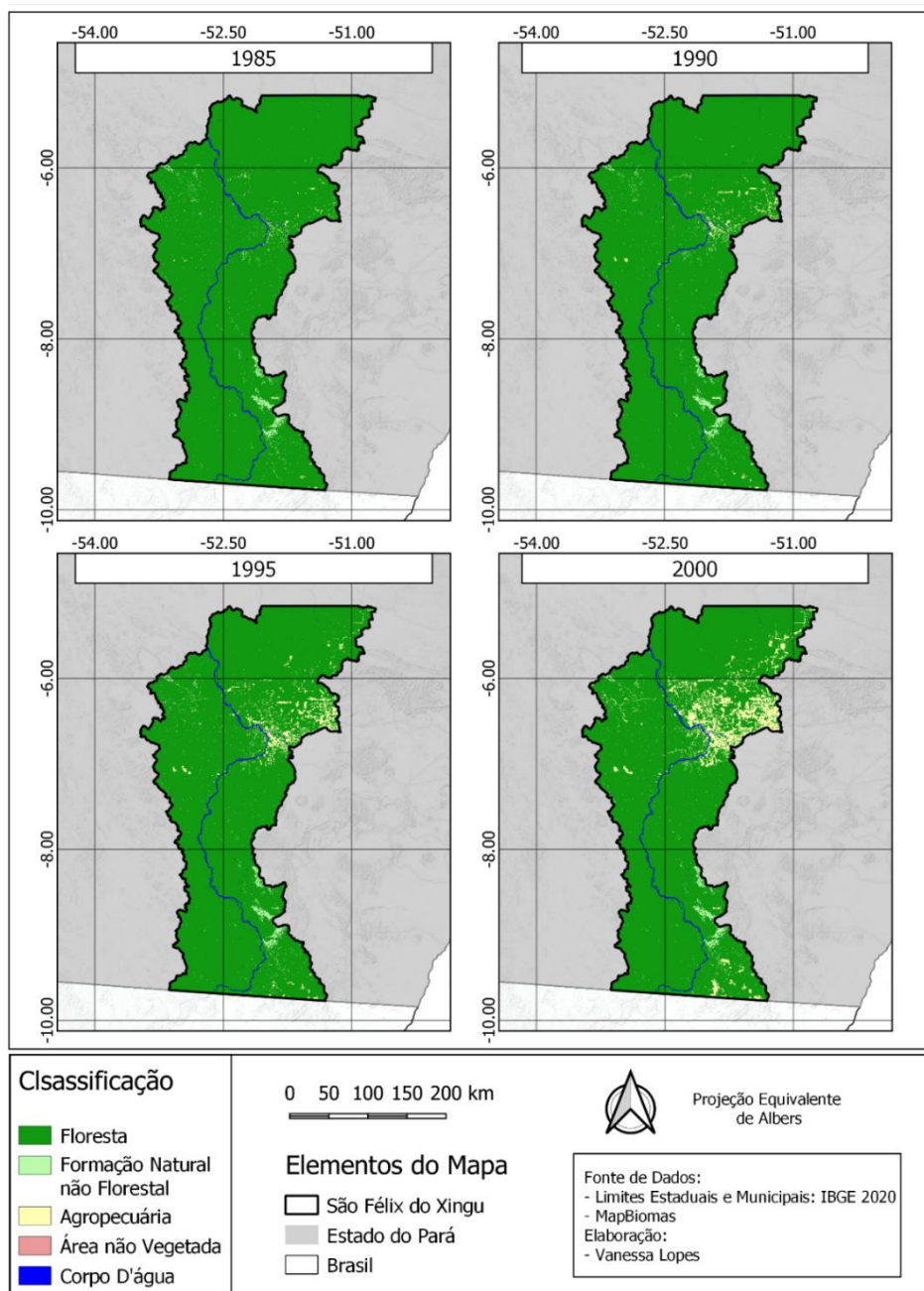


Figura 3. Evolução do uso e ocupação da terra nos anos de 1985 a 2000.

A variação temporal de 2005 a 2012 é mostrada na Figura (4), em que, 4.84% foram de perda de floresta e, essa mesma porcentagem foi equivalente ao incremento da agropecuária.

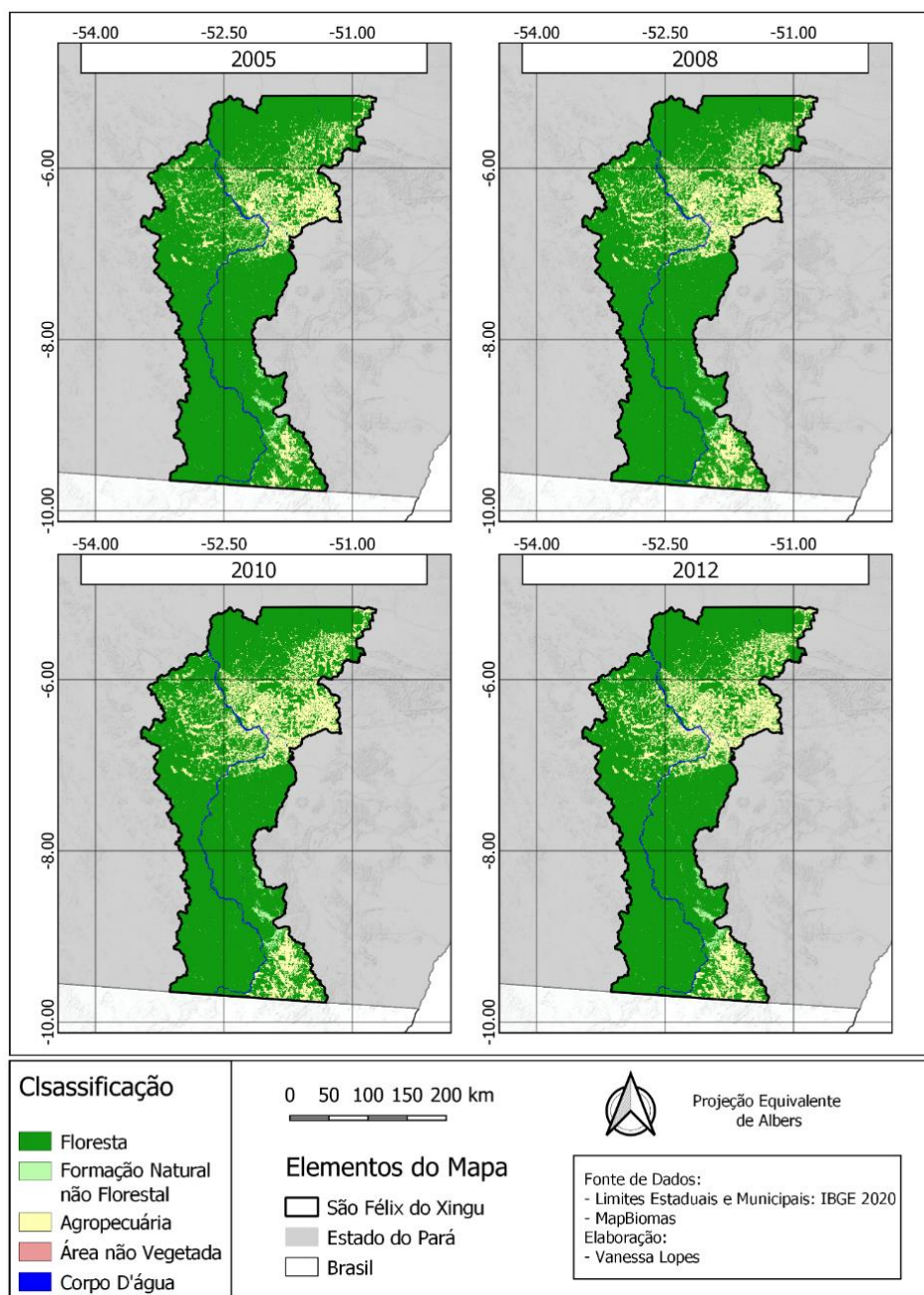


Figura 4. Evolução do uso e ocupação da terra nos anos de 2005 a 2012.

A Figura (5) indica a alteração referente aos anos de 2015 e 2020. Como resultado, tem-se que 1.86% foi de redução de floresta enquanto que a agropecuária teve um avanço de 2.47%.

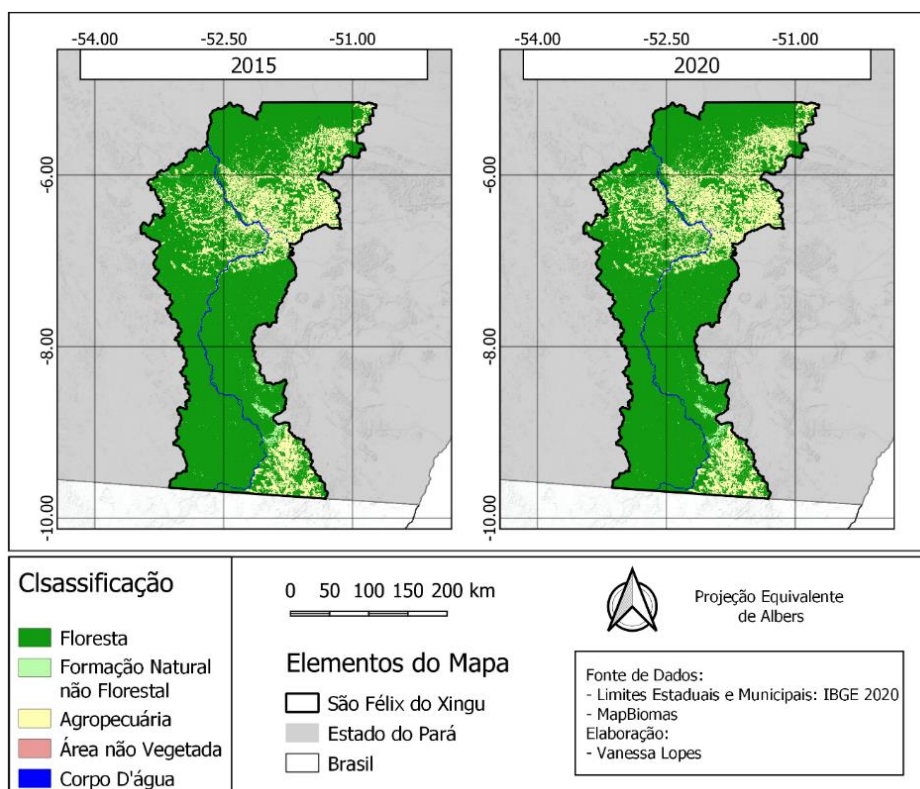


Figura 5. Evolução do uso e ocupação da terra nos anos de 2015 a 2020.

A evolução quantitativa da cobertura solo do município ao longo do tempo é demonstrada na Figura (6). É possível constatar o recuo de floresta para usos antrópicos voltados a atividades agropecuárias, sendo que entre 1985 a 1990 não houveram mudanças bruscas, com o passar dos anos pode-se observar um crescente aumento na agropecuária a partir de 1995 e essa conversão tinha se dado de forma praticamente contínua e elevada, já a partir de 2010 a agropecuária continuou expandindo, mas não de maneira tão elevada.

Como resultado, tem-se que, em sua totalidade, o município teve uma expansão de 1741733.38 ha de áreas destinadas a agropecuária (20.67%) em decorrência da supressão de 1740499.50 ha de áreas de floresta (20.66%). Portanto, é cabível observar que as duas grandezas são praticamente inversamente proporcionais, enquanto uma cresce em detrimento do recuo da outra (Figura 7).

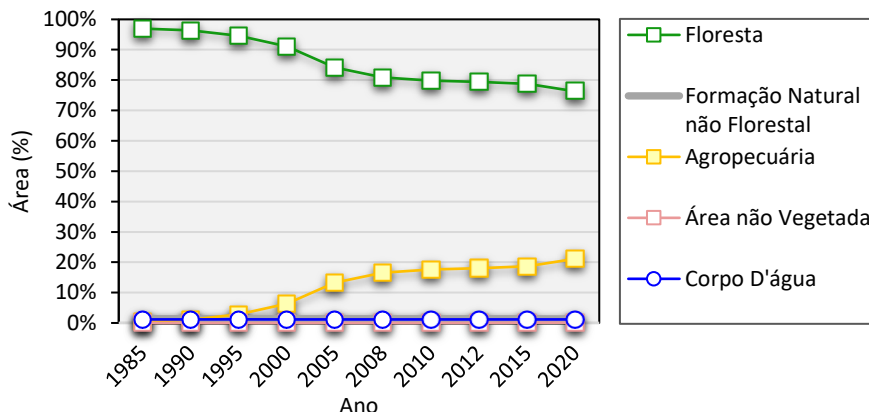


Figura 6. Evolução temporal do uso e cobertura do solo.

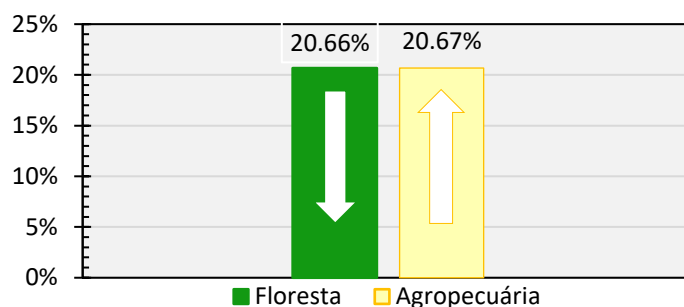


Figura 7. Variação da cobertura e uso do solo em 35 anos.

O município São Félix do Xingu teve origem a partir da exploração de látex, seringa e caucho. A pecuária, no sistema agricultura-pecuária segundo Claudino, Ferreira e Pocard-Chapuis (2020), até 1969 teve pouca expansão, o município detinha apenas 169 cabeças de gado, mesmo com solos considerados bons. As populações tradicionais que habitavam a região se ocupavam com atividades extrativistas na maioria das vezes, enquanto as atividades agrícolas eram exercidas para sua subsistência.

Na década de 80, a terra na região estava sendo considerada apenas como uma mercadoria de boa fluidez e a ocupação pelas terras tinha mais caráter imobiliário do que produtivo. Neste período, os títulos de terras eram dados de forma proporcional a área desmatada, de certa forma, incentivando o desmatamento (Guerra, 1989; Rebello e Homma 2004; Margulis, 2002).

O fomento de políticas voltadas à infraestrutura como o “Avança Brasil” e o “Programa de Aceleração do Crescimento” no final da década de 1990, em apoio a grandes empresas

produtivas, contribuíram para o crescimento de 780% do rebanho de bovinos entre 1996 a 2003 (Venturieri *et al.*, 2004; Araújo e Becker, 2011). A população residente em zona rural teve uma intensificação de 24136 habitantes entre os anos 2000 a 2010 (IBGE, 2011), e de 2000 a 2008 foi o período de maior progressão de áreas destinadas a atividades agropecuárias, com conversão de aproximadamente 859584.33 ha (Tabela 6).

Em 1998 houve a promulgação da Lei de crimes ambientais, regulamentada atualmente pelo Decreto 6.514 de 22 de julho de 2008. Nos anos posteriores a 2008 foi observado um avanço da agropecuária, mas não de forma tão intensa, essa se dava de maneira menos devastadora a comparar com os anos anteriores. Este resultado pode ter se dado em decorrência da promulgação do decreto regulamentador da Lei de crimes ambientais que “Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências” (Brasil, 2008) e, antes do referido decreto, não existia prenúncio legal de infrações administrativas ambientais (Felippe e Trentini, 2018). 22 de julho de 2008 ficou então conhecido como Marco Legal.

A classificação MapBiomas/SEMAS traz uma cobertura da terra identificando as classes antes e após o Marco Legal, sendo que área consolidada é supressão da vegetação ocorrida antes do Marco Legal, área antropizada não consolidada é a supressão da vegetação ocorrida após o Marco Legal, e remanescente de vegetação nativa é a área de floresta primária existente. A Figura (8) apresenta as mudanças que ocorreram antes e após o Marco Legal.

De acordo com os dados obtidos e apresentados na Figura (9), até o ano de 2020, aproximadamente 6422182.41 ha era de área de remanescente de vegetação nativa (76.26%), 1398420.5 ha correspondente a área consolidada (16.61%), 501775.12 ha era referente a área antropizada não consolidada (5.96%), 98901 ha condiz com corpos d’água (1.17%) e as áreas não observadas confere 11.78 ha (0.00014%).

A floresta, de 1985 a 2008 teve uma redução de aproximadamente 16.05%, concomitantemente, a expansão da agropecuária em 16.09%. Já analisando o pós marco legal, de 2008 a 2020, a floresta reduziu 4.6% ao mesmo tempo em que a agropecuária evoluiu 4.58%.

O decreto 6514 de 22 de julho de 2008 assegura penalidades em âmbito administrativo, civil e penal quando ocorrerem noções ou omissões consideradas lesivas ao meio ambiente, ao impor medidas rígidas quando houver crime ambiental. Assegurando medidas punitivas mais rigorosas de forma a inibir ações que podem contribuir com a degradação ambiental, criminalizando as agressões de qualquer tipo que aconteçam ao meio ambiente. A vista disso, é possível constatar que houve uma considerada redução da supressão de floresta após o sancionamento do decreto, podendo considerar que tal comportamento é reativo as punições.

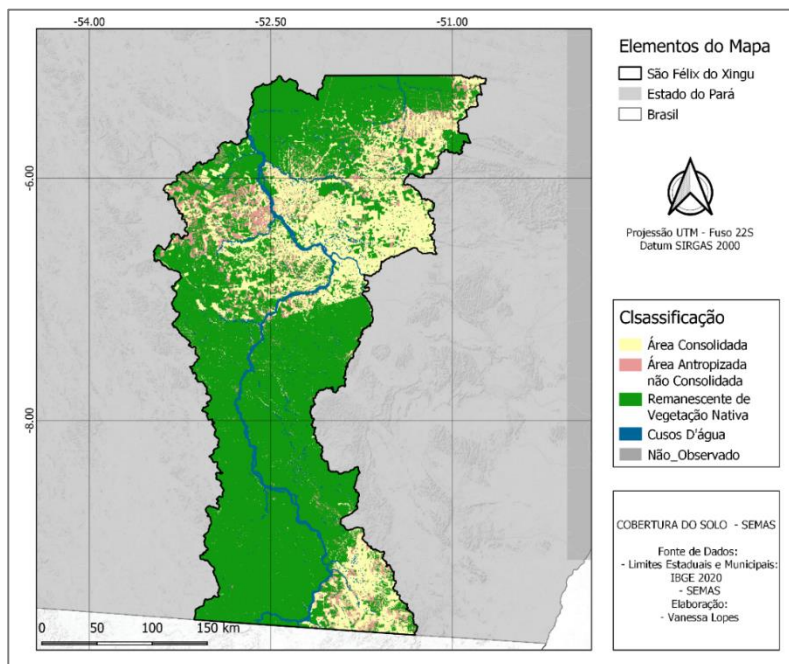


Figura 8. Classificação da cobertura do solo – SEMAS.

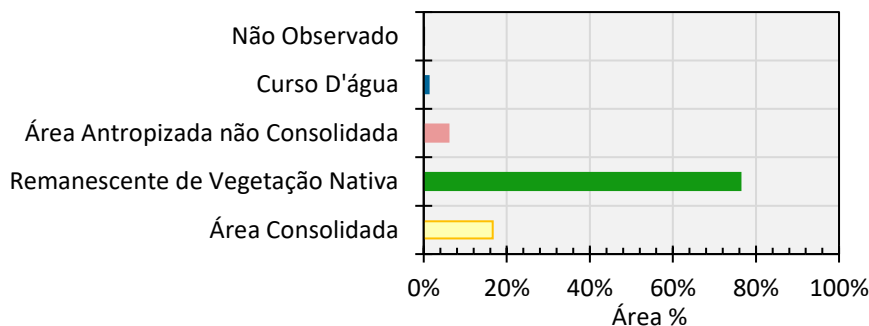


Figura 9. Cobertura do solo em 2020 – SEMAS.

Padilha (2010) destaca a importância de se ter um sistema que visa as responsabilidades ambientais no âmbito administrativo, penal e civil, com caráter reparador e repressivo da degradação ambiental. Para Garvão e Baia (2018), a criação da lei de crimes ambientais que busca punir culpados por lesar o meio ambiente através de ações humanas é vista como uma medida positiva. As multas, de acordo com Ziero e Pereria (2014) são consideravelmente significativas para controlar infrações ambientais e que, quando há aumento em valores das multas, observa-se uma redução no número de infrações em anos subseqüentes a sua aplicação.

Contudo, pode-se afirmar que medidas punitivas tornam-se necessárias para a efetivação do controle a atos ilícitos, bem como as punições para crimes ambientais. Outra medida que contribuiu para minimizar os desmatamentos ilegais após 2008 é o Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) da carne.

O Ministério Público Federal firmou um acordo em 2009 com empresas do ramo, principalmente frigoríficos que atuam no estado do Pará, para que verifiquem se possui desmatamento ilegal nas propriedades com as quais negociam, bem como se essas apresentam embargos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) ou da SEMAS e se existe sobreposição da propriedade com UC, terras indígenas ou se operam com mão de obra análoga ao trabalho escravo. Esses só devem negociar com as propriedades e empreendimentos que estejam em conformidade com as Legislações (Armelin, Burnier e Grossi, 2020).

Dos frigoríficos que firmaram o TAC, 49% desses detém 70% da capacidade de abate, e se todos que firmaram o TAC realmente cumprisse-o, seria ainda mais expressiva a redução de desmatamento ilegal (Barreto *et al.*, 2017). O CAR também tem contribuído para a efetivação do CFB e para diminuição de desmatamento irregular, tendo em vista que os frigoríficos que que firmaram o TAC só devem negociar com propriedades e posses rurais que possuam o CAR.

Atualmente, as propriedades e empreendimentos devem estar inscritos no CAR, pois é um instrumento fundamental para se ter controle das informações sobre a realidade ambiental de áreas rurais, sendo possível analisar de maneira fidedigna a situação de APP, Reserva Legal, uso restrito, áreas consolidadas e remanescente de vegetação nativa. Tudo visando auxílio no diagnóstico, na gestão, no controle e na prevenção da degradação ambiental (Roitman *et al.*, 2018, Ramos *et al.*, 2020).

Qualquer prática de supressão de vegetação dependerá de antecipada inscrição no CAR. Para agricultores familiar, o desmatamento em APP e Reserva Legal depende também de declaração a entidade ambiental competente e inscrição no CAR (Ramos *et al.*, 2020). Alguns dados apresentados na mesa de debate realizada em Belém do Pará organizada pela SEMAS no dia 24 de maio de 2022 em alusão aos dez anos do Código Florestal com a participação de representante da secretaria, do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), Ministério Público do Pará (MPPA), Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), The Nature Conservancy (TNC) e da Ordem dos Advogados do Brasil – Seção Pará (OAB-PA) corroboram a esta pesquisa, pois, conforme relatado, a partir de 2009 os empreendimentos só podiam comercializar seus produtos depois de feito o cadastro na secretaria, e que em São Félix Do Xingu, à medida que aumentava o número de imóveis rurais cadastrados na secretaria, a taxa de desmatamento diminuía.

A vista disso, pode-se considerar que políticas públicas voltadas a eliminação de atividades irregulares e o CAR tem contribuído com a redução do desmatamento ilegal no município, e os

dados do projeto MapBiomias tem muito a contribuir para se conhecer a realidade ambiental da cobertura do solo da região.

Comparativo entre cobertura do solo MapBiomias/SEMAs e SICAR/PA

A análise comparativa dos imóveis rurais aprovados no SICAR/PA com os dados da classificação MapBiomias/SEMAs gerou três mapas, um de pequenas propriedades correspondente ao Grupo A (Figura 11), um de médias propriedades correspondentes ao Grupo B (Figura 12) e outro de grandes propriedades correspondente ao Grupo C (Figura 13).

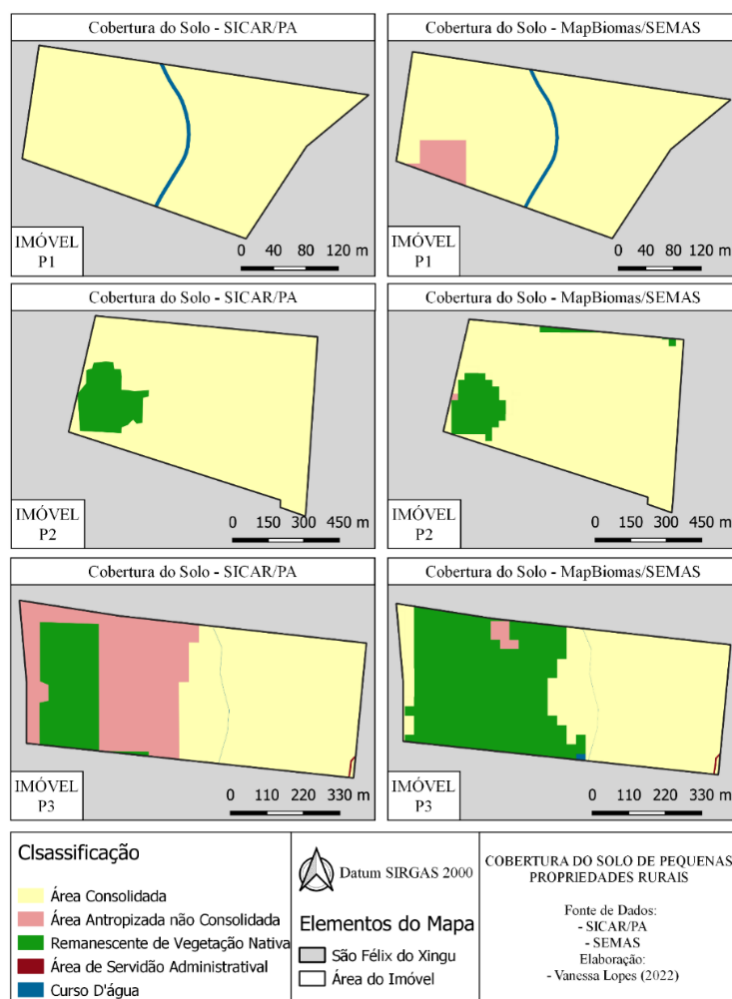


Figura 11. Cobertura do solo de pequenas propriedades.

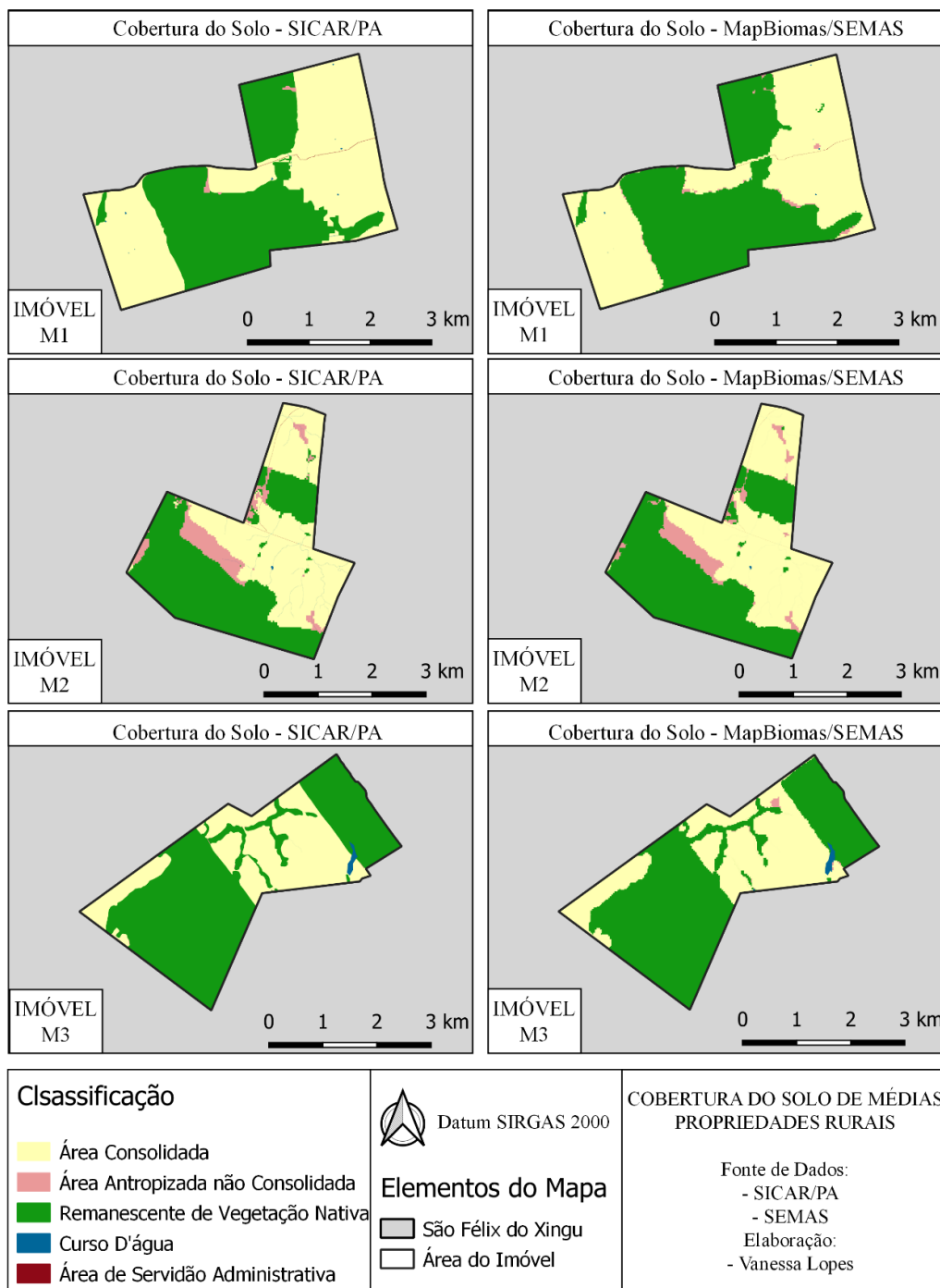


Figura 12. Cobertura do solo de médias propriedades.

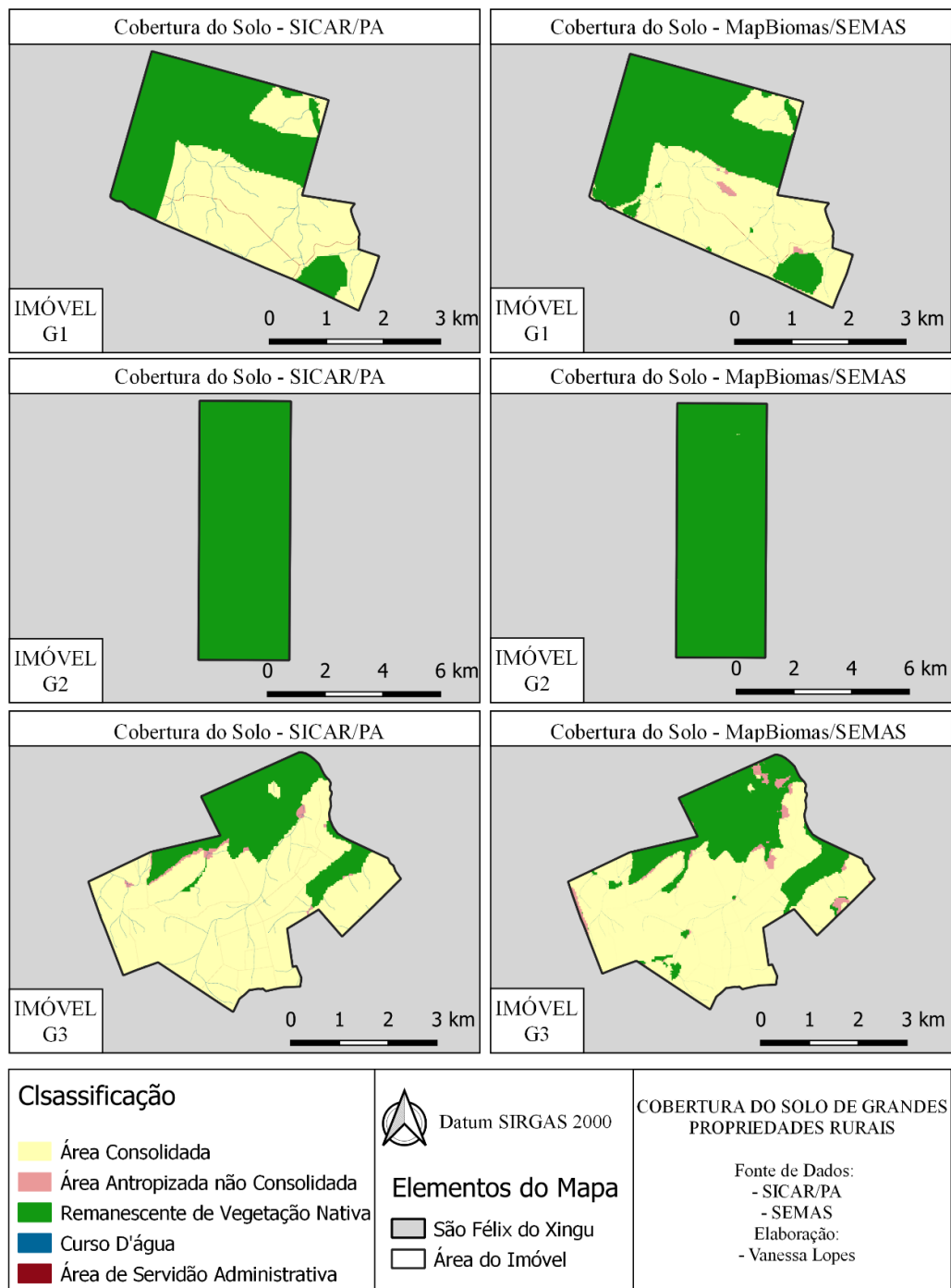


Figura 13. Cobertura do solo de grandes propriedades.

Comparação da cobertura do solo de pequenas propriedades rurais

A partir dos dados obtidos do Grupo A, foi possível verificar que a classe de área consolidada para o imóvel P1 teve uma variação de 5.02%, isso porque na cobertura do solo MapBiomias/SEMAs existe uma área antropizada não consolidada correspondente a essa porcentagem, enquanto na cobertura do solo SICAR/PA não consta área antropizada não consolidada (Figura 14).

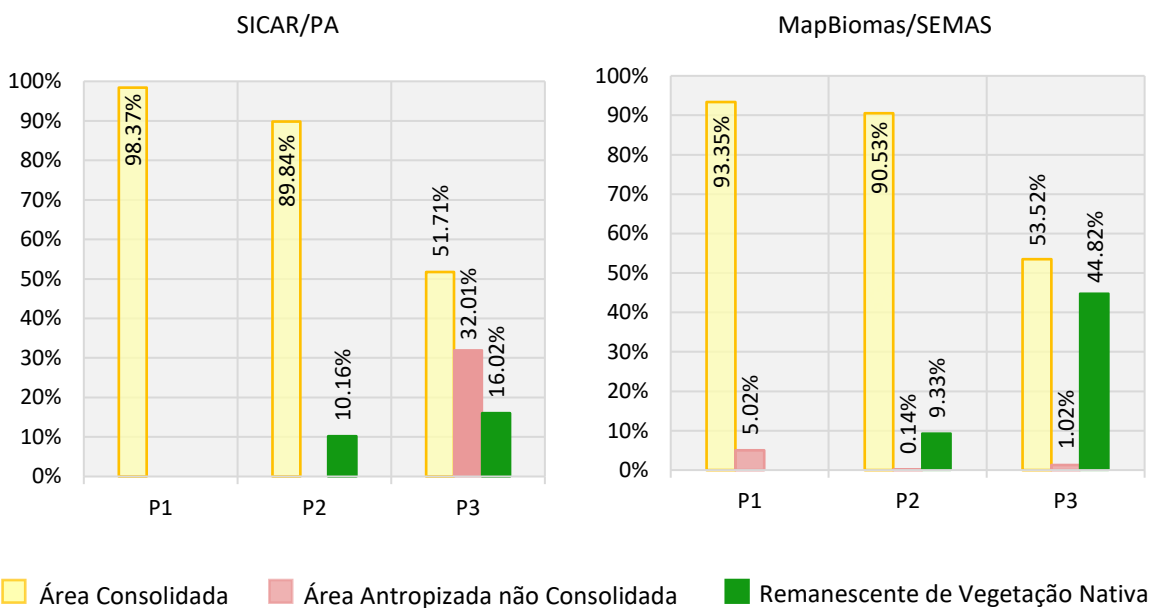


Figura 14. Comparação da cobertura do solo de pequenas propriedades.

A cobertura do solo do imóvel P2 foi aproximadamente igual para as duas classificações, com variação de 0.69% para área consolidada e 0.83% de remanescente de vegetação nativa. Outra diferença foi que na cobertura do solo MapBiomias/SEMAs identificou-se área antropizada não consolidada menor que 0.2%.

A diferença na classificação do imóvel P3 foi bem mais expressiva, pois na classificação do SICAR/PA 32.01% foi identificado como área antropizada não consolidada e na classificação da MapBiomias/SEMAs possui 1.27% de área antropizada não consolidada, consequentemente, a remanescente de vegetação nativa do SICAR/PA é 16.02% e MapBiomias/SEMAs é de 44.82%. A área consolidada para ambas as classificações não obteve uma diferença tão significativa, pois observou-se uma variação de 1.81%.

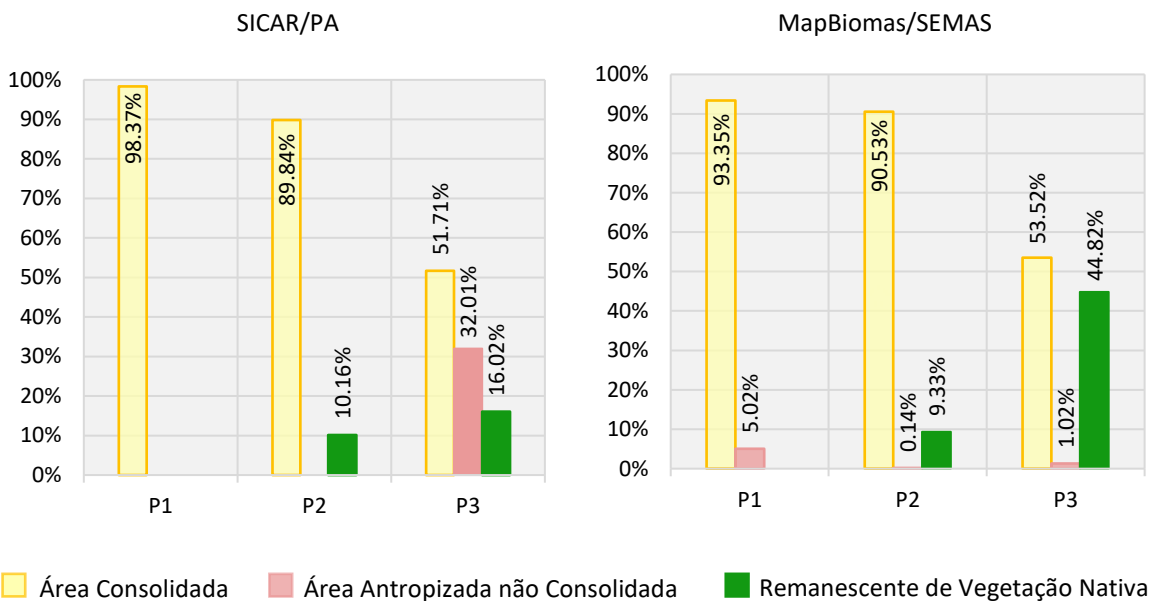


Figura 14. Comparação da cobertura do solo de pequenas propriedades.

Comparação da cobertura do solo de pequenas propriedades rurais

A partir dos dados obtidos do Grupo A, foi possível verificar que a classe de área consolidada para o imóvel P1 teve uma variação de 5.02%, isso porque na cobertura do solo MapBiomias/SEMAS existe uma área antropizada não consolidada correspondente a essa porcentagem, enquanto na cobertura do solo SICAR/PA não consta área antropizada não consolidada (Figura 14).

A cobertura do solo do imóvel P2 foi aproximadamente igual para as duas classificações, com variação de 0.69% para área consolidada e 0.83% de remanescente de vegetação nativa. Outra diferença foi que na cobertura do solo MapBiomias/SEMAS identificou-se área antropizada não consolidada menor que 0.2%.

A diferença na classificação do imóvel P3 foi bem mais expressiva, pois na classificação do SICAR/PA 32.01% foi identificado como área antropizada não consolidada e na classificação da MapBiomias/SEMAS possui 1.27% de área antropizada não consolidada, conseqüentemente, a remanescente de vegetação nativa do SICAR/PA é 16.02% e MapBiomias/SEMAS é de 44.82%. A área consolidada para ambas as classificações não obteve uma diferença tão significativa, pois observou-se uma variação de 1.81%.

Comparação da cobertura do solo de médias propriedades rurais

A comparação das classificações do Grupo B teve variação menor na cobertura e uso do solo se comparadas com o Grupo A (Figura 12). De acordo com dados de área expresso na Figura (15), não houveram diferenças bruscas entre as classes do SICAR/PA e do MapBiomias/SEMAS, visto que, a diferença entre todas as classes dos três imóveis analisados foi menor que 3.5 %.

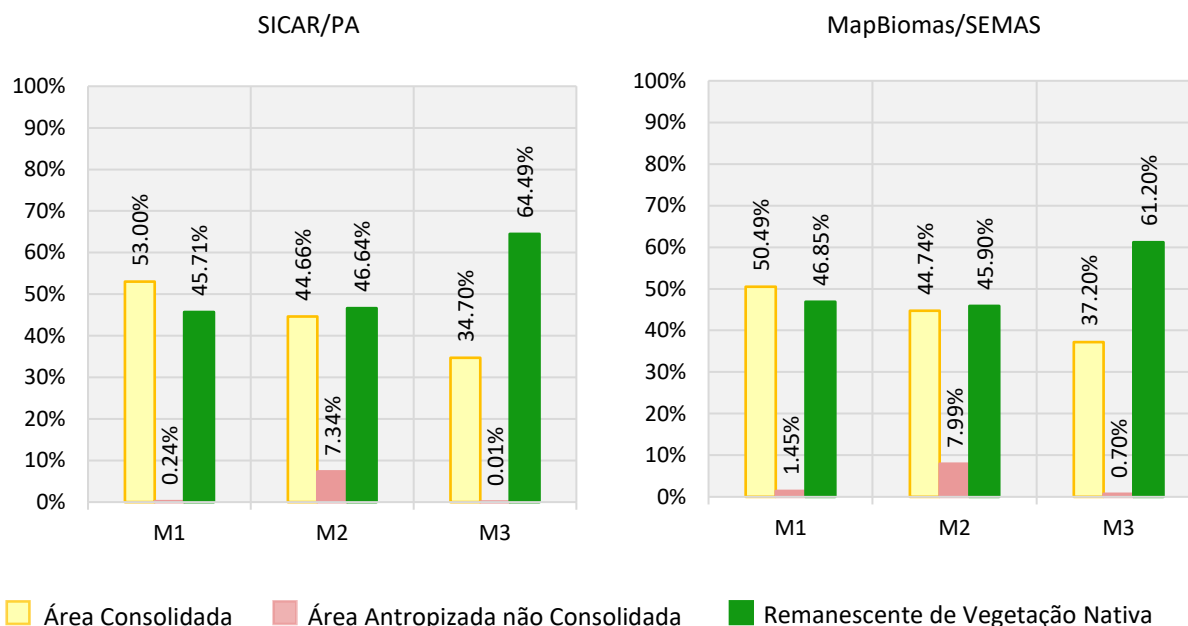


Figura 15. Comparação da cobertura do solo de médias propriedades.

O imóvel M1 teve variação de 2.51% em área consolidada, 1.21% em área antropizada não consolidada e 1.14% em remanescente de vegetação nativa.

O imóvel M2 teve diferença de 0.08%, 0.65% e 0.74% para as classes de área consolidada, área antropizada não consolidada e remanescente de vegetação nativa, respectivamente. Com base nesses resultados, é o imóvel com menor variação na cobertura do solo entre as duas classificações.

O imóvel que teve uma maior diferença entre SICAR/PA e MabBiomias/SEMAS foi o M3, atingindo uma diferença de 3.29% na remanescente de vegetação nativa.

Comparação da cobertura do solo de grandes propriedades rurais

A cobertura da terra analisada no Grupo C comportou-se de forma parecida com a análise do Grupo B (Figura 13). O imóvel G1 teve uma variação menor que 1.2% para todas as áreas analisadas, sendo correspondente a 1.12% em área consolidada, 1.09% em área antropizada não consolidada e 0.03% em remanescente de vegetação nativa (Figura 16).

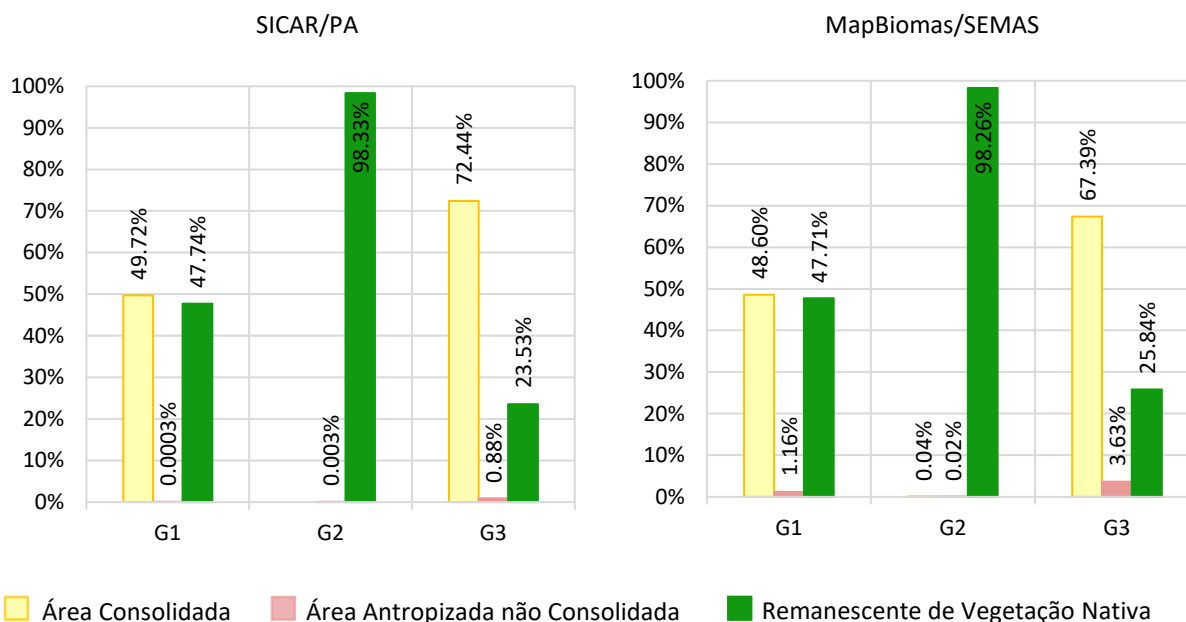


Figura 16. Comparação da cobertura do solo de grandes propriedades.

A classificação do imóvel G2 teve diferença de 0.04%, 0.17% e 0.07%, em área consolidada, área antropizada não consolidada e remanescente de vegetação nativa, nessa ordem. Configurando variação menor que 0.2% para todas as áreas, conforme mostrado a Figura 16.

Porém, o imóvel G3 apresentou uma disparidade maior se comparado aos outros imóveis do mesmo grupo, dado que a área consolidada, área antropizada não consolidada e remanescente de vegetação nativa tiveram uma discrepância de 5,05%, 2.75% e 2.31%, respectivamente.

Diagnóstico da análise da cobertura do solo no CAR

O interesse em informar e compreender a qualidade dos mapas faz com que a avaliação da exatidão desses dados se torne uma necessidade, para que estes se tornem consistentes e transparentes (Olofsson *et al.*, 2014).

Portanto, após a comparação de áreas foi verificado a precisão da classificação MapBiomias/SEMAS em relação a classificação SICAR/PA por meio da exatidão global e coeficiente Kappa.

Tratando-se da exatidão global, a porcentagem de acerto foi maior para o Grupo B e Grupo C do que para o Grupo A, conforme mostrado na tabela (7).

Tabela 7. Exatidão global

Grupo	Módulos Fiscais	Exatidão Global
A	Até 4	85.23%
B	Superior a 4 até 15	96.71%
C	Superior a 15	97.21%

Isso significa que, se uma amostra da classificação MapBiomias/SEMAS for escolhida ao acaso, a probabilidade de estar correta é de 85.23% para imóveis do Grupo A, 96.71% para imóveis do Grupo B e 97.21% para imóveis do Grupo C.

Como é possível constatar, nenhum grupo obteve uma porcentagem de concordância exata entre as classes. O Grupo A teve um nível de concordância considerável, enquanto o Grupo B e Grupo C tiveram um índice de concordância quase perfeita (Figura 17).

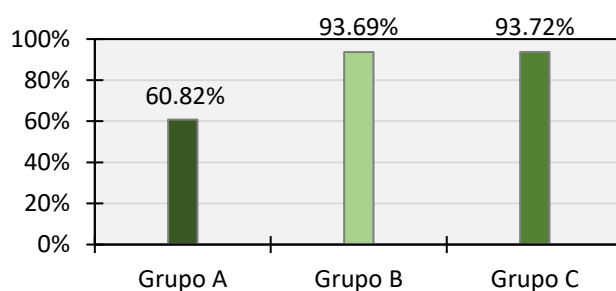


Figura 17. Porcentagem do coeficiente Kappa.

A análise e validação da cobertura do solo de imóveis rurais do SICAR/PA se dá em coordenadas de terreno com imagens de alta resolução, sendo possível observar mais detalhes que a cobertura MapBiomias/SEMAS em que a resolução espacial é de 30m x 30m, objetos ou elementos que forem menores que 30m x 30m não são representados na imagem. Essas diferenças de resolução colaboram para maiores discordâncias na cobertura do solo.

A classificação fornecida pelo projeto MapBiomias é construída de maneira automatizada destinada a uma análise em menor escala, a cada versão os dados podem ser modificados (Gonçalves e Ribeiro, 2021).

Escalas cartográficas apresentam uma razão entre o comprimento no mapa e o mundo real sendo a escala igual a área do mapa dividida pela área real. Escalas maiores expressam um nível de detalhes maior e uma escala menor irá apresentar menos detalhes (Menezes e Coelho, 1999). Os dados MapBiomias são indicados para análise com escala cartográfica de 1:100000 e que apesar de ser possível utilizar escala de 1:50000, não é o recomendado (Souza *et al.*, 2020).

Esse é um fator que contribuiu para as discordâncias na classificação da cobertura do solo, principalmente para o Grupo A que, por se tratar de uma escala maior, apresenta maior nível de detalhamento da cobertura do solo. Os imóveis do Grupo B e C abrangem uma escala de análise menor, indo ao encontro da recomendação do MapBiomias. Portanto, pode-se observar que quanto menor é a escala, maior é o nível de concordância entre as classificações.

Essas discordâncias entre a cobertura do solo SICAR/PA e MapBiomias/SEMAS podem interferir diretamente na área de reserva legal e na área de uso alternativo do solo dos imóveis rurais. O imóvel P3 pertencente ao Grupo A, por exemplo, foi o que teve maior discordância entre remanescente de vegetação nativa e área antropizada não consolidada. Como se trata de um imóvel menor que 4 módulos fiscais, a área de Reserva Legal segundo o CFB, é a área que era composta por floresta até 22 de julho de 2008.

No entanto, na cobertura do solo SICAR/PA toda a área antropizada não consolidada equivalente a 32.01% da área do imóvel deverá ser recuperada ou compensada pelo proprietário/posseiro para atingir a área obrigatória de Reserva legal, enquanto que na cobertura do solo MapBiomias/SEMAS a área a ser recuperada para atingir a Reserva Legal seria de aproximadamente 1.27% da área do imóvel, neste caso específico não teria tanta diferença de área de uso alternativo do solo, visto que se teve boa concordância de área consolidada nas duas classificações.

O imóvel P1 possui área antropizada não consolidada que deverá ser recuperada ou compensada para atingir o mínimo obrigatório de reserva legal segundo a cobertura do solo MapBiomias/SEMAS, diminuindo a área de uso alternativo do solo no imóvel. A área de uso alternativo do solo SICAR/PA é maior, tendo em vista que a área total do imóvel foi classificada como consolidada, e, se tratando de imóvel menor que 4 módulos fiscais, este não é obrigado a atingir um mínimo de reserva legal.

Para os imóveis do Grupo B e C as discordâncias na classificação não alteram a porcentagem mínima de área de reserva legal exigida por Lei, pois esses são obrigados a possuir de 50% a 80%

de área total destinada a reserva legal. Com base nesses dados pode-se concluir que a cobertura do solo MapBiomias/SEMAS está refletindo melhor e com menos discordâncias o que é visto na cobertura do solo SICAR/PA para imóveis acima de 4 módulos fiscais.

Contudo, vale ressaltar também que a cobertura do solo MapBiomias/SEMAS serve como base, mas não substitui o emprego de uma análise mais detalhada tanto para maior escala quanto para menor escala, ou seja, para pequenas, médias e grandes propriedades rurais, visto que ela faz uma análise da transição entre dois anos, neste caso, 2008 e 2020. Portanto, hipoteticamente, caso uma determinada área em 2008 tenha sido classificada como remanescente de vegetação nativa, em 2011 tenha ocorrido supressão dessa vegetação e em 2016 essa área começou a se regenerar, na classificação, essa área pode ser categorizada como remanescente de vegetação nativa ainda, conforme mostrado na tabela de atributos do vetor de classificação da cobertura do solo MapBiomias/SEMAS.

Conclusão

Tendo em vista os aspectos observados, a análise multitemporal da cobertura e uso da terra realizada nesta pesquisa através de dados disponibilizados pelo projeto MapBiomias foi primordial e suficiente para entender a dinâmica da cobertura da terra no território de São Félix do Xingu.

Como foi possível constatar, as medidas adotadas pelo governo, como a TAC da carne, o decreto 6514 e o CAR tiveram impactos positivos que acarretaram na diminuição da supressão de vegetação nativa que vinha ocorrendo devido a expansão de atividades agropecuárias na região.

Constatou-se então nesta pesquisa que os dados do MapBiomias são relativamente importantes para obter conhecimento da cobertura do solo das regiões do Brasil e podem auxiliar no monitoramento ambiental. E que quanto mais o governo investir e intensificar políticas voltadas a combater o desflorestamento, mais notada será a diminuição de crimes cometidos contra o meio ambiente.

A comparação entre as duas fontes de dados de cobertura do solo forneceu resultados satisfatórios, podendo-se concluir a confiabilidade dos dados do MapBiomias/SEMAS para auxiliar na análise da cobertura do solo de imóveis rurais superior a 4 módulos.

Demonstrar a realidade ambiental dos imóveis rurais através de mapeamento de cobertura da terra mediante utilização de sensoriamento remoto e geoprocessamento é um aspecto importante no CAR para atingir os objetivos de controle, monitoramento, planejamento ambiental, planejamento econômico e combate ao desmatamento garantindo uma adequada gestão ambiental.

Levando-se em consideração os aspectos apresentados, conclui-se que os objetivos propostos nesta pesquisa foram alcançados, embora a dificuldade em encontrar trabalhos com a mesma linha de pesquisa para embasar as discussões dos resultados.

Finalizando, esta pesquisa é importante para mostrar a relevância dos dados do MapBiomias para auxiliar na delimitação da cobertura do solo de imóveis rurais a serem declarados no CAR, sendo uma ferramenta fundamental para ajudar a implementação do CAR.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se fazer uma análise multitemporal anual com a base de dados MapBiomias de acordo com as classes de cobertura do solo conceituadas no CFB e posteriormente fazer-se a comparação com a cobertura do solo de imóveis rurais aprovados no SICAR/PA, para obter uma avaliação mais precisa do nível de concordância entre as coberturas do solo, eliminando situações hipotéticas como foi mencionado na etapa de resultados e discussões.

Referências bibliográficas:

- Arana, J., García, M. A., González, J. M. P. (2016) *Ad hoc* procedure for optimising agreement between observational records. *Annals Of Psychology*. Murcia – España, **32**(2), 589-595. Acesso em: 13 de junho de 2023. Disponível em: <https://www.redalyc.org/home.oa>
- Araújo, M. L. de., Becker, Bertha K. (2011) Amazônia: geopolítica na virada do III Milênio. *Ateliê Geográfico*, Goiânia – Go, **5**(1), 269-275. Acesso em: 17 de junho de 2023. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/atelie/article/view/13835>
- Armelin, M. J. C., Burnier, P. C., Grossi, N. T. B. R. (2020) Tac da carne no Pará e compromisso público da pecuária: a importância da rastreabilidade da carne na redução dos desmatamentos na Amazônia. *Amigos Da Terra (ADT) – Revista Amazônia Brasileira*. 38 pp. Acesso em: 09 de julho de 2023. Disponível em: <https://amigosdaterra.org.br/estudos-e-publicacoes/page/2/>
- Barreto, P., Pereira, R., Brandão, A., Baima, S. (2017) Os frigoríficos vão ajudar a zerar o desmatamento da Amazônia. *Imazon & Icv*, Belém – Pa. 162 pp. Acesso em: 20 de outubro de 2023. Disponível em: <https://imazon.org.br/publicacoes/os-frigorificos-vao-ajudar-o-desmatamento-da-amazonia/>
- Braga, D. P. P. (2015) *Sistemas Agroflorestais Com Cacau Para Recuperação De Áreas Degradadas, Em São Félix Do Xingu – Pa*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Em Ciências – Escola Superior De Agricultura Luiz De Queiroz, Universidade De São Paulo, Piracicaba. 211 pp. Acesso em: 14 de agosto de 2023. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002700461>
- Brasil (2000) *Casa Civil Lei Nº 9985, De 18 De Julho De 2000*. Institui O Sistema Nacional De Unidades De Conservação Da Natureza – Snuc. Brasília. Acesso em: 15 de janeiro de 2023. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil03/leis/l9985.htm>
- Brasil (2008) *Decreto Nº 6.514, De 22 De Julho De 2008*. Dispõe Sobre As Infrações E Sanções Administrativas Ao Meio Ambiente, Estabelece O Processo Administrativo Federal Para Apuração Destas Infrações, E Dá Outras Providências. Brasília. Acesso em: 16 de março de 2023. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil03/ato2007-2010/2008/decreto/d6514.htm>

- Brasil (2012) *Decreto Nº 7830, De 17 De Outubro De 2012*. Dispõe Sobre O Sistema De Cadastro Ambiental Rural, O Cadastro Ambiental Rural, Estabelece Normas De Caráter Geral Aos Programas De Regularização Ambiental, De Que Trata A Lei Nº 12.651, De 25 De Maio De 2012, E Dá Outras Providências. Brasília. Acesso em: 17 de junho de 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/decreto/d7830.htm
- Brasil (2014) *Instrução Normativa Nº 02, 06 De maio De 2014*. Ministério Do Meio Ambiente. Dispõe Sobre Os Procedimentos Para A Integração, Execução E Compatibilização Do Sistema De Cadastro Ambiental Rural-Sicar/Pa E Define Os Procedimentos Gerais Do Cadastro Ambiental Rural-Car. Brasília. Acesso em: 13 de outubro de 2023. Disponível em: https://www.car.gov.br/leis/IN_CAR.pdf
- Brasil (2012) *Lei Nº 12.651, De 25 De Maio De 2012*. Dispõe Sobre A Proteção Da Vegetação Nativa. Brasília. Acesso em: 24 de outubro de 2023. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil03/ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>
- Brasil (1993) *Lei Nº 8.629, De 25 De Fevereiro De 1993*. Dispõe Sobre A Regulamentação Dos Dispositivos Constitucionais Relativos À Reforma Agrária, Previstos No Capítulo III, Título VII, Da Constituição Federal. Brasília. Acesso em: 24 de janeiro de 2023. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil03/leis/l8629.htm>
- Brasil (2021) *Cadastro Nacional De Unidades De Conservação*. Brasília. Ministério Do Meio Ambiente. Departamento De Áreas Protegidas. Acesso em: 15 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs.html>
- Claudino, L. S. D., Ferreira, L. A., Pocard-Chapuis, R. J. M. (2020) Evolução dos sistemas agrários na microrregião de São Félix do Xingu (amazônia brasileira): história e questões para pensar o desenvolvimento territorial. *Revista Desarrollo Local Sostenible*, Espanha, **13**(36). 23 pp. Acesso em: 15 de setembro de 2023. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/671>
- Cohen, J. (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational And Psychological Measurement*, New York, **20**(1), 37-46. <http://dx.doi.org/10.1177/001316446002000104>
- D'Amico, A. R. (Org.), Coutinho, E. De O. (Org.), Moraes, L. F. P. De (Org.) (2018) *Roteiro Metodológico Para Elaboração E Revisão De Planos De Manejo Das Unidades De Conservação Federais*. Brasília: Icmbio. Acesso em: 15 de janeiro de 2023. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/downloads/roteiro_metodologico_elaboracao_revisao_plano_manejo_ucs.pdf
- Embrapa (2018) Territorial. Satélites De Monitoramento. Campinas. Acesso em: 26 de maio de 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>.
- Embrapa (2016) Código Florestal: Adequação Ambiental Da Paisagem Rural. Acesso em: 26 de outubro de 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/codigo-florestal/entenda-o-codigo-florestal>
- FAPESPA, Fundação Amazônia De Amparo A Estudos E Pesquisas Do Pará (2021) Boletim Agropecuário Do Pará 2021. Belém. Acesso em 06 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/noticia/fapespa-lanca-o-boletim-agropecuário-do-para-2021>
- Felippe, D. De Trentini, F. (2018) O conceito de área rural consolidada no código florestal de 2012: principais controvérsias. *Revista De Direito Agrário Agroambiental*, Salvador, **4**(1), 77-93. Acesso em: 07 de junho de 2023. Disponível em: https://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/documentacao_e_divulgacao/doc_biblioteca/bibli_servicos_produtos/bibli_boletim/bibli_bol_2006/rev-dir-agra-amb_v.4_n.1.05.pdf
- Flores, É. C., Soriano, J. A. H. (2019) Análisis de concordancia mediante coeficiente de kappa de Cohen para la elaboración de un instrumento de categorización de entrevistas biográfico-narrativas. *Educación: Aportaciones Metodológicas*, Puebla, 50 pp. Acesso em: 14 de junho de 2023. Disponível em: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcp/v79n1/art08.pdf>
- FUNAI, Fundação Nacional do Índio (2024) Sistema Indigenista de Informação. Acesso em: 05 de abril de 2024. Disponível em: http://sii.funai.gov.br/funai_sii/informacoes_indigenas/visao/visao_terras_indigenas_lista.wsp

- Garvão, R. F., Baia, S. A. L. Do N. (2018) Legislação ambiental: um histórico de desafios e conquistas para as políticas Públicas Brasileiras. *Nova Revista Amazônica*, 6(2), 93-102, <http://dx.doi.org/10.18542/nra.v6i2.6193>
- Gonçalves, V. P., Ribeiro, E. A. W. (2021) Obtenção de série histórica da evolução da classe floresta plantada a partir dos dados de uso e cobertura do solo da coleção 5 do projeto mappiomas. *Revista Metodologias E Aprendizado*, [S/L], 4, 99-105. <http://dx.doi.org/10.21166/metapre.v4i.1491>
- Guerra, G. A. D. Emmi. (1989) A oligarquia do tocantins e o domínio dos castanhais. *Cad. Dif. Tecnol.*, Brasília, 6(1), 157-163. Acesso em: 20 de maio de 2023. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/9151/5191>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2011) *Censo Demográfico 2010, Área Territorial Brasileira. Rio De Janeiro*. Acesso em: 13 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/sao-felix-do-xingu/panorama>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019) *Acesso De Uso De Dados Geoespaciais. N. 14. Rio De Janeiro*. (Manuais Técnicos Em Geociências, 7) Acesso em: 13 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=2101675&view=detalhes>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021) *Área Territorial Brasileira. Rio De Janeiro*. Acesso em: 13 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/sao-felix-do-xingu/panorama>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2011) *Censo Demográfico 2010*. Acesso em: 13 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/sao-felix-do-xingu/panorama>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022) Diretoria De Pesquisas. Coordenação De População E Indicadores Sociais., Estimativas Da População Residente Com Data De Referência 1o De Julho De 2021. Acesso em: 13 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/sao-felix-do-xingu/panorama>
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2013) *Manual Técnico De Uso Da Terra*. 3. Ed. Rio De Janeiro. 171 P. (Manuais Técnicos Em Geociências, 7). Acesso em: 14 de janeiro de 2023 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra.html>
- INPE, Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. (2021) Projeto De Monitoramento Do Desmatamento Na Amazônia Legal (Prodes) São José Dos Campos: INPE. 2021. Acesso em: 06 de novembro de 2023. Disponível em: http://terrabrazilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates
- Lopes, V. C., Miziara, F., Baumann, L. R. F., Parente, L. L., Jr, F. L. G. (2019) *Uma abordagem temporal para o espaço rural goiano por meio da aplicação de métodos estatísticos à interpretação visual de imagens landsat – 1985 – 2017*. In: INPE, Santos – Sp. Acesso em 27 de outubro de 2023. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/10.01.18.58/doc/97700.pdf>
- Luiz, A. J. B., Epiphanyo, J. C. N. (2001) *Amostragem por pontos em imagens de sensoriamento remoto para estimativa de área plantada por município*. In: INPE, Foz Do Iguaçu. Acesso em: 25 de novembro de 2023. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1024989>
- Macedo, M. R. A. (2009) *Uso De Geotecnologias Na Identificação E Mapeamento Dos Atores Do Desmatamento Na Frente Pioneira De São Félix Do Xingu - Pa*. Orientadora: Laura Angélica Ferreira. 2009. 111 F. Dissertação de Mestrado Acadêmico. Pós-Graduação Em Agriculturas Familiares E Desenvolvimento Sustentável. Núcleo De Ciências Agrárias E Desenvolvimento Rural, Universidade Federal Do Pará, Belém. Acesso em: 07 de janeiro de 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/handle/2011/13047>
- Margulis, S. (2002) Quem são os agentes dos desmatamentos na amazônia e por que eles desmatam?. *Word Bank Internal Paper*. Acesso em: 05 de março de 2023. Disponível em: <https://ida.org.br/artigos/desmatagentes.pdf>
- Mastella, A. F. M. (2017) *Avaliação Da Acurácia Temática Para Classificação De Imagens De Satélite: Estudo De Caso No Município De Nova Veneza/Sc*. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharel Em Geografia) - Centro De Filosofia E Ciências Humanas – Cfh. Universidade Federal De Santa Catarina – Ufsc, Florianópolis. 92 pp.

- Menezes, P. M. L. De, Coelho, A. L. C. N. (1999) Escala: Estudo De Conceitos E Aplicações. Ufrj. Acesso em: 10 de junho de 2023. Disponível em: <http://www.geocart.igeo.ufrj.br/index.php?r=site/producaocientifica&id=20>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., Wulder, M. A. (2014) Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing Of Environment*, **148**, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Padilha, N. S. (2010) *Fundamentos Constitucionais Do Direito Ambiental Brasileiro*. [S/L], 452 pp. Campus Jurídico.
- Pará (2014) *Instrução Normativa Nº 07, 19 de Novembro de 2014*. Dispõe Sobre Os Procedimentos E Critérios Para Autuação, Embargo E Divulgação Decorrentes Das Infrações Relativas Ao Desmatamento Ilegal. Acesso em: 03 de janeiro de 2023. Disponível em: <https://monitoramento.semas.pa.gov.br/ldi/> .
- Ramos, P. D. P., Jacobson, T. K., Ávila, M. L., Ribeiro, M. J. (2020) Aspectos legais do cadastro ambiental rural (car), programa de regularização ambiental (pra) e projeto de recomposição de áreas degradadas e alteradas (prada) na lei 12.651, sua contextualização em mato grosso e atuação do projeto de regularização ambiental e diagnóstico dos sistemas agrários (radis). *Revista De Pesquisa Em Políticas Públicas*, 2020. Acesso em: 11 de setembro de 2023. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rp3/article/view/34165>
- Rebello, F. K., Homma, A. K. O. (2004) Fronteira agrícola, uso da terra, tecnologia e margem intensiva: o caso do estado do pará – *Anais do Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural*. Ribeirão Preto, São Paulo, **43**, 29 pp. Acesso em 23 de setembro de 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/82544/1/552.pdf>
- Roitman, I. Vieira, L. C. G., Jacobson, T. K. B., Bustamante, M. M. C., Marcondes, N. J. S., Cury, K., Estevam, L. S., Ribeiro, R. J. C., Ribeiro, V., Stabile, M. C. C., Filho, R. J. M., Ávila, M. L. (2018) Rural environmental registry: an innovative model for land-use and environmental policies. *Land Use Policy*, **76**, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.037>
- Sacramento, B. H. Sousa, J. A. P., Costa, H. F., Amorim, A. T., Lopes, E. R. N., Lourenço, R. W. (2019) Análise de métricas de paisagem e influências do uso do solo e cobertura vegetal em fragmentos florestais da mata atlântica. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, Santos – Sp. Acesso em 05 de julho de 2023. 4 pp. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.13.17.44/doc/97511.pdf>
- SEMAS, Secretaria Estadual De Meio Ambiente E Sustentabilidade (2021) *Manual De Procedimentos: Módulo De Análise Do Car – Sicar/Pa / Pará*. Belém. 21 pp. Acesso em 21 de julho de 2023. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/publicacoes/manuais/>
- SEMAS, Secretaria Estadual De Meio Ambiente E Sustentabilidade (2021) *Manual De Procedimentos: Geoprocessamento / Pará*. Belém. 21 pp. Acesso em 21 de julho de 2023. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/publicacoes/manuais/>
- Soares E. A. M. G., Moraes, R. M. (2018) Fusion Of Online Assessment Methods For Gynecological Examination Training: A Feasibility Study. *Tendências Em Matemática Aplicada E Computacional*, **19**(3), 423-436.
- Souza, C. M., Jr., Z. Shimbo, J., Rosa, M. R., Parente, L. L., A. Alencar, A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M., G. Ferreira, L., Souza-Filho, P. W. M., de Oliveira, S. W., Rocha, W. F., Fonseca, A. V., Marques, C. B., Diniz, C. G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E. R., Vélez-Martin, E., Azevedo, T. (2020) Reconstructing Three Decades Of Land Use And Land Cover Changes In Brazilian Biomes Wuth Landsat Archive And Earth Engine. *Remote Sensing*, **12**(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Venturieri, A., Aguiar, A. P. D., Monteiro, A. M. V., Carneiro, A., Alves, D., Câmara, G., Vieira, I. C., Veiga, I., Escada, I., Veiga, J., Gavina, J., Thales, M., Oliveira, M., Fearnside, P., Araújo, R., Kampel, S. A., Carneiro, T. G. (2004) Dinâmica territorial da frente de ocupação de são félix do xingu-iriri: subsídios para o desenho de políticas emergenciais de contenção do desmatamento. secretaria de políticas e programas de pesquisa e desenvolvimento: rede geoma, Ministério Da Ciência E Tecnologia (Mct), Brasília – Df. 18 pp.
- Ziero, J. G., Pereira, D. de A. (2014) Infrações ambientais e a reputação do regulador: análise em dados de painel para o brasil. *Estudos Econômicos*, São Paulo, **44**(1), 69-103.

La Revista AIDIS Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica agradece a los siguientes revisores su valioso apoyo en el proceso de evaluación 2024 (1 de diciembre de 2023 al 1 de diciembre de 2024):

Alexandre Bach Trevisan, Brasil
Alexandre Troian, Brasil
Alfredo Ribeiro Neto, Brasil
Alice Rocha de Souza, Brasil
Aline Flávia Nunes Remígio Antunes, Brasil
Aline Meiguins, Brasil
Aline Renee Coscione, Brasil
Amanda Finger, Brasil
Ana Alejandrina Castro Rodríguez, México
Ana Barbara De Araújo Nunes, Brasil
André Bezerra dos Santos, Brasil
Antônio Alves Dias Neto, Brasil
Armando Borges de Castilhos Junior, Brasil
Armando González Sánchez, México
Arthur Couto Neves, Brasil
Claudia Gutiérrez Antonio, México
Cleverson Vitorio Andreoli, Brasil
Darci Barnech Campani, Brasil
Debora Dias Costa Moreira, Brasil
Diógenes Hernández, Chile
Edson Baltazar Estrada Arriaga, México
Elaine Regina Lopes Tiburtius, Brasil
Emanuel Júnior Silva Soares, Brasil
Eric Pascal Houbbron, México
Evangelina Ramírez Lara, México
Francianne Vieira Mourão, Brasil
Francisca Nara da Conceição Moreira, Brasil
Francisco Alejandro Alcántara Boza, Perú.
Francisco Cervantes, México
Gloria Moreno Rodríguez, México
Herminia Alejandra Hernández Ortega, México
Ivan Moreno, México
J. Ixbalank Torres Zúñiga, México
Jaime Guillermo Plazas Tuttle, Colombia
José Arturo Olguín Rojas, México
José Avidán Bravo Jácome, México
José Luis Olivares Romero, México
José Wagner Alves Garrido, Brasil
Juan Gabriel Garcia Maldonado, México
Julio Cesar Bizarreta Ortega, Brasil
Karol Karla García Aguirre, México
Kelma Maria Nobre Vitorino, Brasil
Lidia Rangel Blanco, México
Lorena Jorquera, Chile
Luciana Rezende Alves de Oliveira, Brasil
Luis Amado Sánchez Alcalde, México
Luis Carlos González Márquez, México
Ma. Araceli Correa Murrieta, México
Magno José Alves, Brasil
Marcel Szanto Narea, Chile
Marcelo Mendes Pedroza, Brasil
Marcelo Montaña, Brasil
Marcos Adami, Brasil
Margarita Navarrete Montesinos, México
Maria Myrna Solís Oba, México
Mauricio Alves da Motta Sobrinho, Brasil
Mercedes Esperanza Ramírez Camperos, México
Michael Barbosa Viana, Brasil
Michael Lima Silva, Brasil
Miguel Ángel Vital Jácome, México
Murilo Guilherme de Melo Neto, Brasil
Nelia Henriques Callado, Brasil
Oscar González Barceló, México
Pamela Romina Bernabeu, Argentina
Pasiano Rivas García, México
Patricia Torres-Lozada, Colombia
Quetzalcoatl Cruz Hernández Escobedo, México
Raphael Corrêa Medeiros, Brasil
Renata Mendes Luna, Brasil
Rita de Cassia Pompeu de Sousa, Brasil
Robson Barizon, Brasil
Rolando Chamy, Chile
Ruth Gabriela Ulloa Mercado, México
Sharon Benilde Villegas Rodríguez, México
Sofía Esperanza Garrido Hoyos, México
Tânia Galavote, Brasil
Tatiane Cristina Dal Bosco, Brasil
Thâmara Martins Ismael de Sousa, Brasil
Thyago Nobrega Silveira, Brasil
Viviana Maria Zanta, Brasil
Yannice Tatiane da Costa Santos, Brasil