

# TECNOLOGIAS AMBIENTAIS INOVADORAS

Volume 2

Organizadores  
**Carine Baggiotto**  
**Rosana de Cassia de Souza Schneider**  
**Eduardo Alexis Lobo Alcayaga**  
**Andreas Köhler**

**Organizadores**

Carine Baggiotto

Rosana de Cassia de Souza Schneider

Eduardo Alexis Lobo Alcayaga

Andreas Köhler

**TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS  
INOVADORAS**

Volume 2

Araraquara

Letraria

2024

# FICHA CATALOGRÁFICA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Tecnologias ambientais inovadoras [livro eletrônico]:  
volume 2 / organização Carine Baggiotto... [et al.]. -  
Araraquara, SP: Letraria, 2024.

PDF.

Vários autores.

Outros organizadores: Rosana de Cassia de Souza  
Schneider, Eduardo Alexis Lobo Alcayaga, Andreas Köhler  
Bibliografia.

ISBN 978-65-5434-114-1

1. Ecologia humana 2. Inovações tecnológicas 3.  
Meio ambiente 4. Tecnologia - Aspectos ambientais I.  
Baggiotto, Carine. II. Schneider, Rosana de Cassia de Souza.  
III. Alcayaga, Eduardo Alexis Lobo. IV. Köhler, Andreas.

25-251881

CDD-304.2

## **Índices para catálogo sistemático:**

1. Meio ambiente : influência do homem : Ecologia 304.2  
Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

# 4° SEMINÁRIO SUL DE INOVAÇÕES EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

## **Comissão organizadora**

Rosana de Cassia de Souza Schneider

Carine Baggiotto

Eduardo Alexis Lobo Alcayaga

Andreas Köhler

Gleison de Souza Celente

Daniela Bes

## **Financiadores**

UNISC

Capes – Processo 88881.710390/2022-1

Fapergs – Processo 24/2551-0001090-4

## **Comitê científico**

Rosana de Cassia de Souza Schneider

Carine Baggiotto

Eduardo Alexis Lobo Alcayaga

Andreas Köhler

Lisianne Benitez

# SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>APRESENTAÇÃO</b>  | <b>9</b>   |
| <b>FEIJÃO-MACOBA (<i>VOANDZEIA SUBTERRANEA THOUARS</i>) COMO ALTERNATIVA ALIMENTAR SUSTENTÁVEL À IMPORTAÇÃO DE FEIJÃO-COMUM (<i>PHASEOLUS VULGARIS</i> L.) EM ANGOLA, ÁFRICA</b><br>Silmo Schüler, Eduardo Alcayaga Lobo                                       | <b>11</b>  |
| <b>OBTENÇÃO DE BIOMATERIAIS (B-TCP E CPP) UTILIZANDO CASCA DE OVO DE GALINHA (<i>GALLUS GALLUS DOMESTICUS</i>) COMO PRECURSOR INICIAL</b><br>Rogério Pires Santos, Raphael Peres Buck, Fabrieli Vargas Flugel  | <b>24</b>  |
| <b>MONITORAMENTO AVANÇADO COM SOFTWARE LIVRE: QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS, SUBTERRÂNEAS E DE CONSUMO HUMANO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL</b><br>Geovan Rodrigues da Silva Carvalho, Vinícius Beppler dos Reis, Pablo Lemos Berned, Manuela Gomes Cardos | <b>35</b>  |
| <b>PANORAMA DOS REGISTROS DE FERTILIZANTES MINERAIS, ORGÂNICOS E BIOFERTILIZANTES NAS DISTINTAS REGIÕES DO BRASIL</b><br>Anderson Moraes da Silva, Annette Droste  | <b>48</b>  |
| <b>PRODUÇÃO DE ENZIMAS AMIOLÍTICAS POR FERMENTAÇÃO SUBMERSA UTILIZANDO FARELO DE TRIGO COMO SUBSTRATO</b><br>Jéssica Mulinari, Leonardo de Lima, Alan Rempel, Luciane Maria Colla  | <b>65</b>  |
| <b>PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DE CEVADA RESIDUAL</b><br>Gabrielle Fusiger Berwian, Arthur de Almeida Rebechi, Emmanuel Elias Scorsato, Luciane Maria Colla   | <b>77</b>  |
| <b>BIOSSORÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES EM ÁGUAS POR BIOMASSAS MICROBIANAS</b><br>Giovana Marchezi, Júlia Lorenzato da Silva, Luciane Maria Colla  | <b>87</b>  |
| <b>AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES DO SOLO: UMA REVISÃO DE LITERATURA</b><br>Júlia Lorenzato da Silva, Giovana Marchezi, Cleomar Reginatto, Luciane Maria Colla  | <b>105</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>AVALIAÇÃO DO PERFIL BIOQUÍMICO POR ESPECTROSCOPIA FTIR DA BIOMASSA DE <i>CHLORELLA</i> SP. CULTIVADA SOB DIFERENTES FERTILIZANTES AGRÍCOLAS À BASE DE NPK</b>  | <b>122</b> |
| Camila Rafaela Rathke, Valeria Louzada Leal Butzke, Lisianne Brittes Benitez, Valeriano Antonio Corbellini, Rosana de Cassia de Souza Schneider   |            |
| <b>CAROTENOIDES MICROBIANOS: EXPLORANDO O POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DA CAATINGA</b>  | <b>139</b> |
| Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro Rodrigues, Fábio Nildo dos Santos, José Adeilson da Silva, Gessica dos Santos Silva, Jefferson Renan Pinheiro Rodrigues, Krause Gonçalves Silveira Albuquerque, Luciane Maria Colla, Tayane de Cássia Dias Mendes Silva, Maria Betânia Melo de Oliveira, Thiago Henrique Napoleão |            |
| <b>INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: TRANSFORMAÇÃO DE RESÍDUOS DE CELULOSE EM ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO COMO ALTERNATIVA RENOVÁVEL</b>  | <b>154</b> |
| José Adeilson da Silva, Elisabete Soares de Santana, Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro Rodrigues, Yhasminie Karine da Silva Xavier, Tayane de Cassia Dias Mendes Silva, Juliana Alves da Silva, Edilayne Eduarda Ferreira Maciel, Fábio Nildo dos Santos, Wesllen David Silva Vila                                  |            |
| <b>CAROTENOIDES NA FORMULAÇÃO DE PROTETORES SOLARES SUSTENTÁVEIS E BIODEGRADÁVEIS</b>   | <b>165</b> |
| José Adeilson da Silva, Elisabete Soares de Santana, Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro Rodrigues, Yhasminie Karine da Silva Xavier, Tayane de Cassia Dias Mendes Silva, Juliana Alves da Silva, Edilayne Eduarda Ferreira Maciel, Fábio Nildo dos Santos, Wesllen David Silva Vila                                  |            |
| <b>TECNOLOGIAS GEOESPACIAIS NO MONITORAMENTO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM LUANDA: DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL</b>   | <b>174</b> |
| Albano Dias Malundo   |            |
| <b>OLHAR AMBIENTAL EM CITIES: SKYLINES: FERRAMENTAS E POSSIBILIDADES</b>  | <b>186</b> |
| Marcelo Vieira Albuquerque, Ana Paula Colavite  |            |
| <b>ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO POR NITRATO EM POÇOS ARTESIANOS NA REGIÃO DE MARINGÁ-PR NO ANO DE 2022</b>   | <b>199</b> |
| Lenonn Teles de Oliveira, Marcela Fernandes Silva, Cláudia Telles Benatti   |            |

|  |            |
|--|------------|
| <b>A DIFUSÃO DO MODELO BET (BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO) COMO EIXO CENTRAL DA EDUCAÇÃO AMBIENTAL</b>  | <b>208</b> |
| Adriana Fanali, Mauro Parolin, Jefferson de Queiroz Crispim  |            |
| <b>ANÁLISE NUTRICIONAL E AMBIENTAL DO LODO DE PISCICULTURA: INVESTIGAÇÃO DOS TEORES DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E ÍNDICE DE GERMINAÇÃO</b>  | <b>221</b> |
| Liciane Oliveira da Rosa, Paula Burin, Amanda Morais Grabin, Isadora Rasesa Silveira, Gabriel Afonso Martins, Luciana Bilhalva Corrêa, Érico Kunde Corrêa, Álvaro Renato Guerra Dias |            |
| <b>CULTIVO DE MICROALGAS EM RACEWAY PONDS: UMA ABORDAGEM PROMISSORA PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA</b>  | <b>233</b> |
| Giséle Alves, Edina Franceschet, Dariane Severgnini, Michele Hoelt, Valéria Louzada Leal Buzke, Adriana Dupont, Tiele Medianeira Rizzetti, Rosana de Cassia Souza Schneider          |            |
| <b>EMPREENDEDORISMO AMBIENTAL PARA GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS PARCERIA GERADOR, UNIVERSIDADE E COOPERATIVA DE CATADORES</b>  | <b>251</b> |
| Milena Mattje Barcelos, Luana Oliveira de Carvalho, Carlos Alberto Mendes Moraes, Feliciane Andrade Brehm  |            |
| <b>MANUFATURA ADITIVA COMO SOLUÇÃO INOVADORA PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS EM LABORATÓRIOS: UM ESTUDO DE CASO COM ADAPTADORES PARA CENTRIFUGAÇÃO DE MICROALGAS</b>                    | <b>261</b> |
| Betina Mariela Barreto, Imar de Souza Soares Junior, Patrik Gustavo Wiesel, Rosana de Cassia de Souza Schneider, Carlos Alexandre Lutterbeck   |            |
| <b>DETERMINAÇÃO DIRETA DE CARBONO NO SOLO POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO: UMA TECNOLOGIA ANALÍTICA LIMPA APLICADA À ANÁLISE DE SOLOS</b>  | <b>274</b> |
| Letiéri da Rosa Freitas, José Guilherme Lenz Abich, Eduarda Luedtke de Avelar, Fernando Gaedke da Costa, Gilson Augusto Helfer, Adilson Ben da Costa                                 |            |
| <b>AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ, RS, BRASIL, UTILIZANDO O ÍNDICE TRÓFICO DE QUALIDADE DA ÁGUA (ITQA)</b>                                     | <b>287</b> |
| Camilla Schulz, Daniela Bes, Claudia Bos Wolff, Leandro Hellebrandt Kruger, João Carlos Dotto, Eduardo Rodrigo Ramos de Santana, Eduardo A. Lobo                                     |            |

- OTIMIZAÇÃO DE CULTIVOS BACTERIANOS PARA A PRODUÇÃO DE BIOINSUMOS SUSTENTÁVEIS NA AGROPECUÁRIA** 305  
Lívia Fraticelli Neves, Ana Carolina Müller, Ângelo Gabriel Kretzmann Rossa, Mauricio Thomas da Silva, Bruno Swarowski, Rogério Mazzardo, Rosana de Cássia de Souza Schneider, Lisianne Brittes Benitez
- ANÁLISE PRELIMINAR DE UM SISTEMA INTEGRANDO SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES** 319  
Gustavo S. Colares, Lenin D. Garcia, Taina Conzatti, Fernanda N. Brum, Jeferson S. Couto, Juliana F. Barbosa, Luana T. Junqueira, Milena Y. Couto, Letícia Mesacasa, Munique Marder, Odorico Konrad
- PROCESSO FOTOSSINTÉTICO DE REMOÇÃO DE CO<sub>2</sub> DO BIOGÁS POR MEIO DE APLICAÇÃO DE MICROALGAS DA ESPÉCIE *Chlorella sorokiniana*** 328  
Fernanda Nicolodi Brum, Munique Marder, Gustavo S. Colares, Romualdo J. C. Wanderley, Joice Mors, Camila N. G. Stacke, Marciana Cechin, Rodrigo da Silveira, Odorico Konrad
- INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: O IMPACTO POSITIVO DOS FERTILIZANTES FLUÍDOS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA** 339  
Adrize Medran Rangel, Eduarda Medran Rangel, Eduardo Franceschette



# APRESENTAÇÃO

A busca por soluções inovadoras para os desafios ambientais tem sido um dos pilares da pesquisa acadêmica e da indústria. Na área de Engenharia Sanitária e Ambiental, diversas iniciativas tecnológicas são desenvolvidas para melhorar a qualidade de vida da população e promover um desenvolvimento sustentável. O 4º Seminário Sul de Inovações em Tecnologias Ambientais foi um espaço de divulgação e intercâmbio dessas inovações, fomentando o avanço do conhecimento e a consolidação de redes colaborativas entre pesquisadores, instituições de ensino superior (IES) e demais setores da sociedade.

Este *e-book* reúne os trabalhos apresentados durante o evento, destacando pesquisas e soluções desenvolvidas na área de Tecnologias Ambientais. Com o tema “Tecnologias ambientais sustentáveis: bioconversão e empreendedorismo ambiental”, o seminário aborda a aplicação de novas tecnologias para a sustentabilidade e sua viabilidade no contexto do mercado e da sociedade.

Ao longo da leitura dos artigos, os leitores terão acesso a estudos que exploram a bioconversão de resíduos, estratégias inovadoras para o uso eficiente dos recursos naturais e iniciativas empreendedoras voltadas à sustentabilidade ambiental. Além disso, o evento contou com palestras internacionais, discussões em mesa-redonda e uma visita técnica, enriquecendo a troca de experiências entre os participantes.

O 4º Seminário Sul de Inovações em Tecnologias Ambientais reafirmou nosso compromisso com a difusão do conhecimento e a criação de um ambiente propício à discussão de soluções ambientais. O evento contou com uma palestra internacional ministrada pelo Dr. Yixing Sui, da University of Greenwich, e uma palestra nacional com a Dra. Rosana C. S. Schneider, da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), ambas abordando o tema “Microalgas + Bioeconomia: oportunidades e desafios na produção e aplicação”. Além disso, foram realizadas apresentações orais de trabalhos científicos e uma mesa-redonda com o tema “Como o empreendedorismo verde está transformando desafios ambientais em oportunidades econômicas?”, que contou com a participação da Dra. Michele Hoeltz, da Inoculatech, da Dra. Jéssica Dias Rodrigues, da Bioconv, e do Dr. Airton Kunz, da Embrapa Suínos e Aves. O evento também incluiu uma visita técnica à Biofábrica da UNISC, guiada pelo Dr. Andreas Kohler, e uma palestra sobre empreendedorismo ambiental com o Dr. Alexandre Dal Molim Wissmann, do TecnoUNISC – Parque Tecnológico da UNISC.

Esperamos que este *e-book* contribua para o avanço das pesquisas e inspire novas iniciativas para a construção de um futuro mais sustentável, assim como, desejamos que, a cada ano, este evento tenha cada vez mais a divulgação de Tecnologias Inovadoras.

Assim, o Seminário Sul de Inovações em Tecnologias Ambientais consolida-se como um espaço de referência para a discussão e divulgação de tecnologias inovadoras. A cada edição, o evento amplia seu alcance e impacto, contribuindo para o avanço da pesquisa e da aplicação de soluções ambientais sustentáveis.

Agradecemos a todos os participantes, palestrantes e organizadores que tornaram este evento possível. Esperamos que este *e-book* inspire novas ideias, colaborações e ações em prol de um futuro mais sustentável.

Boas leituras e que as pesquisas aqui apresentadas possam ajudar a melhorar as realidades!

**Equipe Organizadora do 4º Seminário Sul de Inovações em Tecnologias Ambientais**



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# FEIJÃO-MACOBA (*VOANDZEIA SUBTERRANEA THOUARS*) COMO ALTERNATIVA ALIMENTAR SUSTENTÁVEL À IMPORTAÇÃO DE FEIJÃO-COMUM (*PHASEOLUS VULGARIS L.*) EM ANGOLA, ÁFRICA

*Silmo Schüler<sup>\*1</sup>, Eduardo Alcayaga Lobo<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental. Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC).  
Av. Independência, 2293, Santa Cruz do Sul, RS, 96815-900, Brasil.

\*E-mail: silmo.schuler@hotmail.com

# RESUMO

Alimentar e proporcionar segurança alimentar a todas as pessoas do mundo é um grande desafio a ser alcançado com a Agenda 2030 das Nações Unidas, através dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Neste contexto, a pesquisa realizou uma análise comparativa de equivalência nutricional entre o feijão-macoba (*V. subterranea*), planta alimentícia subutilizada de Angola, África, com o feijão-comum (*P. vulgaris*), alimento importado no país, relacionando e quantificando volumes e valores, no intuito de fornecer subsídios para políticas públicas de fomento à produção de alimentos, através do desenvolvimento de um sistema agroalimentar sustentável. As análises bromatológicas entre as cultivares feijão-macoba e o feijão-comum importado por Angola evidenciaram equivalências na concentração de alguns elementos e uma superioridade do cultivar macoba em onze elementos, destacando-se o teor de gorduras, carboidratos e proteínas. Os dados econômicos evidenciaram não haver vantagens econômicas na comercialização destas cultivares, visto que o preço de venda estipulado é o mesmo. Considerando a superioridade da qualidade nutricional do feijão-macoba frente ao feijão comum, a utilização do feijão importado na dieta alimentar de Angola poderia ser substituída pela produção local de cultivar macoba, caracterizando uma agricultura sustentável com geração de renda local. O fomento da produção local poderia, além de aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção, descentralizar a comercialização, reduzindo a especulação financeira e, desta forma, inserindo um maior número de angolanos com poder aquisitivo no mercado consumidor de feijão, contribuindo para a redução da fome do país e a construção de uma soberania alimentar.

**Palavras-chave:** Plantas alimentícias subutilizadas. Feijão-macoba. Alimentos importados. Agricultura sustentável. Angola. África.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O feijão-macoba ou feijão-bambara é uma leguminosa tradicional da África (Fig. 1A, 1B), caracterizada como uma planta alimentícia subutilizada em Angola, porém com alto valor nutricional (Soumare; Diedhiou; Kane, 2022). A planta cresce bem em condições climáticas adversas, garantindo assim uma produção regular (Okonkwo; Opara, 2010). É uma importante leguminosa cultivada na África tropical e subtropical, e a sua resistência à seca e a capacidade de se desenvolver em solos pobres são as razões para esta popularidade (Wassermann; Kruger; Heyns, 1984). As sementes desta

planta se desenvolvem dentro da terra e ela pode ser cultivada mesmo nas regiões áridas e semiáridas do mundo, que mais são devastadas pela desnutrição (Ogbuagu; Okye; Innocent, 2023).

A partir de incursões no período de 2014 a 2020 nas dezoito províncias de Angola (Fig. 2), Schüller, Melo e Lobo (2022) apresentam um resgate sobre a diversidade alimentar angolana, considerando a grande biodiversidade da flora e fauna, com base nos diversos hábitos alimentares que têm sido produzidos ao longo dos séculos, tanto com espécies nativas como espécies exóticas trazidas de outros continentes. Neste contexto, a pesquisa realizou uma análise comparativa de equivalência nutricional entre o feijão-macoba (*V. subterranea*), planta alimentícia subutilizada de Angola, com o feijão-comum (*P. vulgaris*), alimento importado no país, relacionando e quantificando volumes e valores, no intuito de fornecer subsídios para políticas públicas de fomento à produção de alimentos, através do desenvolvimento de um sistema agroalimentar sustentável.



Figura 1. Feijão-macoba (*V. subterranea*). 1A: com casca. 1B: sem casca. Cultivado na Província de Cabinda, Angola.

## 2 METODOLOGIA

O presente estudo *ex-post-facto* apresenta caráter exploratório de natureza quantitativa (Gerhardt; Silveira, 2009). Os dados foram coletados em bancos de dados de agências internacionais como a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2024), Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2024), Tabela Brasileira de Composição de Alimentos do banco de dados da Universidade de São Paulo (USP, 2023), e em bancos de dados de literatura científica, tais como Scopus, Web of Science, Science Direct e Google Acadêmico.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O cultivo do feijão-macoba é citado nas províncias de Cabinda e Huambo (Fig. 2), sendo que sua produção em Angola ainda é pouco expressiva em comparação com outros países africanos, destacando que há um grande potencial para o aumento da produção e consumo, devido à sua rusticidade, adaptabilidade a diferentes condições climáticas e valor nutritivo (Maxted et al., 2004; Schüler, Melo e Lobo, 2022).

A tabela 1 apresenta a composição nutricional do feijão-macoba, na forma de grãos secos, inteiros e crus, e do feijão-comum importado por Angola. A figura 3, por sua vez, apresenta uma análise comparativa da composição nutricional destas cultivares. A análise mostra que há equivalência ( $\pm 10\%$ ) na energia alimentar correspondente a 323 Kcal, proteína com 9,5 g, carboidrato disponível com 33,6 g, cinzas com 3,1 g, magnésio com 174 mg, potássio com 1.160 mg e cobre com 0,76 mg. Já a cultivar macoba apresentou uma composição maior do que o feijão-comum, em relação ao teor de gordura com 5,9 g, fibra dietética total com 28,9 g, tiamina com 0,19 mg, riboflavina com 0,14 mg, niacina com 2,0 mg, ácido graxo saturado com 1,64 g, ácido graxo monossaturado com 0,96 g e ácido graxo poli-insaturado com 1,93 g. Ainda, a cultivar macoba apresentou níveis inferiores para cálcio com 53 mg, ferro com 3,2 mg, fósforo com 267 mg, sódio com 2 mg, zinco com 2,4 mg, vitamina E com 0,23 mg, vitamina B6 com 0,17 mg e vitamina C, com traços de microgramas.

Neste sentido, Brough et al. (1993) relataram que o feijão-macoba contém quantidades suficientes de gorduras, carboidratos e proteínas com proporções relativamente altas de lisina e metionina como porcentagem da proteína, sendo considerado um alimento equilibrado. Ainda, segundo os mesmos autores, o leite vegetal produzido a partir do feijão-macoba é tão, ou mais aceitável, quanto os leites de outras leguminosas comuns, como o feijão e a soja, sendo que uma das principais vantagens do leite produzido a partir desta cultivar é que as sementes brancas proporcionam um leite de cor clara altamente aceitável. Thammarat et al. (2015), por sua vez, estudaram a composição química, as funcionalidades e as propriedades antioxidantes do concentrado proteico da farinha da cultivar macoba, obtendo níveis elevados de proteína de 62,8 a 66,8% e com quantidades elevadas dos aminoácidos essenciais leucina e lisina. Demonstraram, também, que o concentrado fornece peptídeos funcionais com propriedades antioxidantes. Da mesma forma, Nwokolo (1987) investigou a composição química, as funcionalidades e as propriedades antioxidantes da farinha do feijão-macoba e hidrolisados, e demonstrou que a farinha fornece peptídeos funcionais com propriedades antioxidantes.

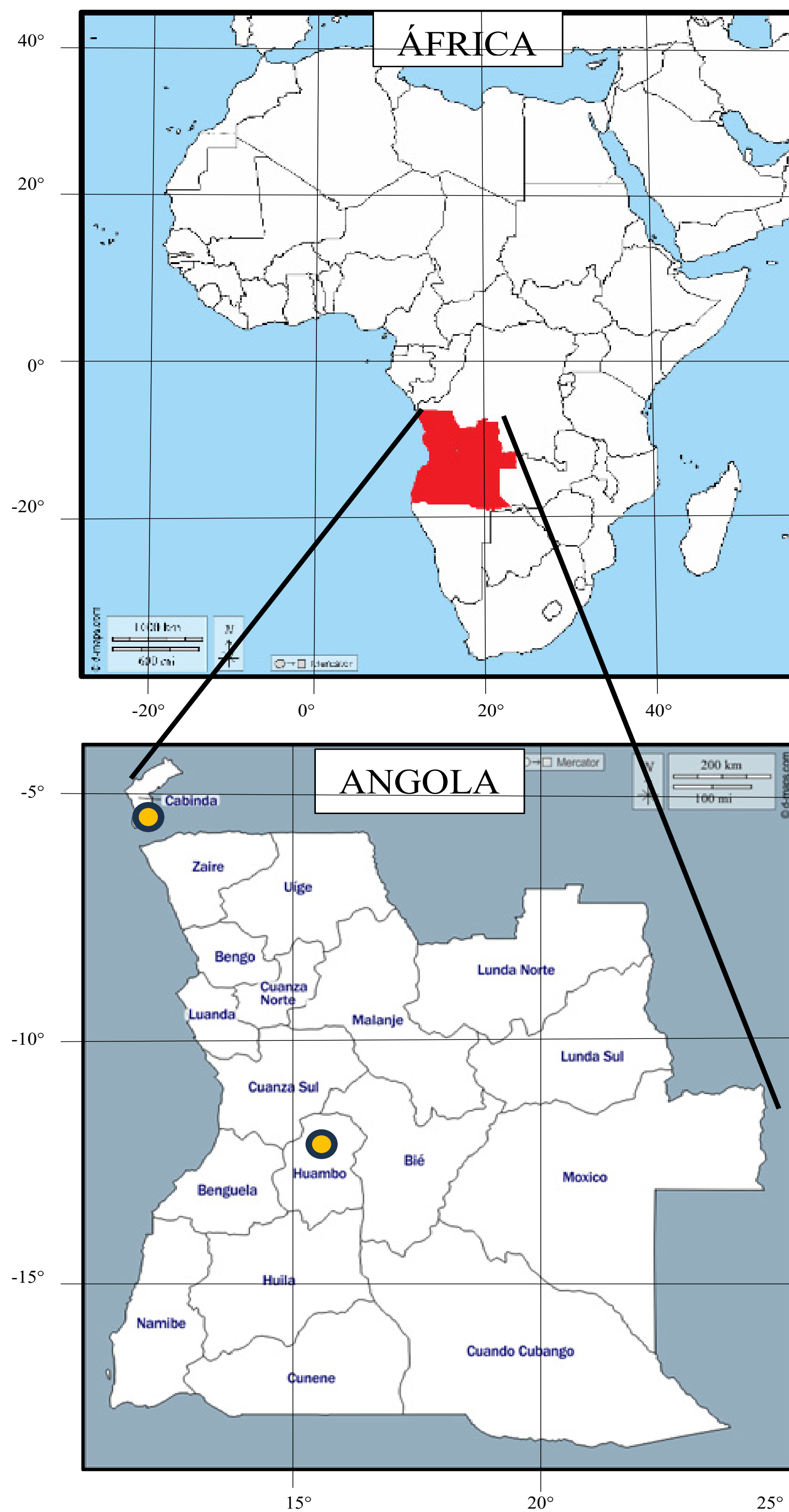


Figura 2. Localização das 18 províncias de Angola no continente africano, com destaque para Cabinda e Huambo, províncias com citações de ocorrência do feijão-macoba. Fonte: elaborado pelos autores a partir de [www.d-maps.com](http://www.d-maps.com).

Tabela 1. Composição nutricional do feijão-macoba e do feijão importado.

| Item | Descrição                         | Feijão-macoba<br>Valor/100g | Feijão-comum<br>Valor/100g |
|------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1    | Energia Alimentar (kcal)          | 323                         | 302                        |
| 2    | Água (g)                          | 9,0                         | 12,7                       |
| 3    | Proteína (g)                      | 19,5                        | 20,2                       |
| 4    | Gordura (g)                       | 5,9                         | 2,37                       |
| 5    | Carboidrato disponível (g)        | 33,6                        | 38,3                       |
| 6    | Fibra dietética total (g)         | 28,9                        | 23,6                       |
| 7    | Cinzas (g)                        | 3,1                         | 2,88                       |
| 8    | Cálcio (mg)                       | 53                          | 99,9                       |
| 9    | Ferro (mg)                        | 3,2                         | 5,53                       |
| 10   | Magnésio (mg)                     | 174                         | 178                        |
| 11   | Fósforo (mg)                      | 267                         | 399                        |
| 12   | Potássio (mg)                     | 1160                        | 1165                       |
| 13   | Sódio (mg)                        | 2                           | 10,3                       |
| 14   | Zinco (mg)                        | 2,40                        | 3,73                       |
| 15   | Cobre (mg)                        | 0,76                        | 0,70                       |
| 16   | Vitamina A RE <sup>1</sup> (mcg)  | tr <sup>3</sup>             | 0,00                       |
| 17   | Vitamina A RAE <sup>2</sup> (mcg) | tr <sup>3</sup>             | 0,00                       |
| 18   | Vitamina D (mcg)                  | 0                           | 0,00                       |
| 19   | Vitamina E (mg)                   | 0,23                        | 0,73                       |
| 20   | Tiamina (mg)                      | 0,19                        | 0,14                       |
| 21   | Riboflavina (mg)                  | 0,14                        | 0,03                       |
| 22   | Niacina (mg)                      | 2,0                         | tr                         |
| 23   | Vitamina B6 (mg)                  | 0,17                        | 0,36                       |
| 24   | Folato equivalente (mcg)          | 100                         | 627                        |



|    |  |      |      |
|----|--|------|------|
| 25 | Vitamina B12 (mcg)                     | 0    | 0,00 |
| 26 | Vitamina C (mg)                        | tr   | 13,2 |
| 27 | Colesterol (mg)                        | 0    | 0    |
| 28 | <b>Ácido</b> graxo saturado (g)        | 1,64 | 0,70 |
| 29 | <b>Ácido</b> graxo monossaturado (g)   | 0,96 | 0,20 |
| 30 | <b>Ácido</b> graxo poli-insaturado (g) | 1,93 | 0,90 |

<sup>1</sup>Retinol Equivalente. <sup>2</sup>Retinol atividade equivalente. <sup>3</sup>tr: traços (símbolo). Fonte: Organizado pelos autores a partir do banco de dados da USP (2023) e Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2024).

Referente a carboidratos, o feijão-macoba apresenta teor levemente menor. Mesmo assim, esta cultivar é uma boa fonte de proteína e carboidratos, tanto para pessoas quanto para animais (Temple; Aliyu, 1992). Nos minerais há equivalência nos teores de magnésio, potássio e cobre, enquanto nas vitaminas a cultivar macoba se destaca com teores superiores em tiamina, riboflavina e niacina e, também, com maiores teores nos ácidos graxos saturados, monossaturados e poli-insaturados. De forma geral, o feijão-macoba apresenta melhores valores nutritivos do que a maioria das outras leguminosas, e a farinha desta cultivar é útil para complementar alimentos ricos em amido, podendo ser utilizada para melhorar a qualidade nutricional dos produtos à base de cereais (Olanipekun; Otunola; Oyelade, 2015).

Cabe destacar que Angola importou, no período de 2013 a 2022, a quantidade de 443.097 toneladas do feijão-comum, com um custo de USD 467.088.000,00, o que equivale a um custo médio de importação por quilograma de USD 1,05 (FAO, 2024). Ressalta-se que a produção angolana de feijão-macoba na safra 2022/2023 foi de 358.209 toneladas (FAO, 2024), sendo que nos mercados e feiras de Angola o feijão produzido localmente é comercializado para os consumidores a USD 2,37 por quilograma (Valev, 2024; Shopsemlim, 2024). Segundo os mesmos autores, é importante ressaltar que, embora o custo médio de importação por quilograma do feijão-comum seja de USD 1,07, nos mercados e feiras de Angola ele é comercializado para os consumidores também por USD 2,37, evidenciando que a cadeia de comercialização do feijão aplica uma remarcação elevada de 122% sobre o custo do feijão importado, inflacionando o mercado interno e dificultando o acesso ao alimento para uma camada maior da população, que sofre de desnutrição por falta de recursos financeiros. Mais de 80% da população angolana tem prevalência de insegurança alimentar, moderada ou grave (FAO, 2023).

Além disso, o preço do quilograma do feijão em Angola é superior ao de outros países como Quênia, Costa do Marfim, Nigéria e Camarões, onde o feijão é comercializado a USD 1,47 ao consumidor (Valev, 2024).

Considerando o fato de não haver vantagens econômicas na comercialização destas cultivares, uma vez que o preço de venda estipulado é o mesmo, e considerando a qualidade nutricional do feijão-macoba frente ao feijão comum, devido ao conteúdo de proteínas, carboidratos, gorduras, fibras, vitaminas e minerais, a utilização do feijão importado na dieta alimentar de Angola poderia ser substituída pela produção local da cultivar macoba, caracterizando uma agricultura sustentável com geração de renda local. O fomento da produção local poderia, além de aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção, descentralizar a comercialização reduzindo a especulação financeira e, desta forma, inserindo um maior número de angolanos com poder aquisitivo no mercado consumidor de feijão.



Figura 3. Análise comparativa da equivalência nutricional entre o feijão-macoba e o feijão-comum importado por Angola. Barras azuis horizontais: feijão-macoba. Fonte: Organizado pelos autores a partir do banco de dados da USP (2023) e Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2024)

De fato, o feijão-macoba está entre as espécies agrícolas alimentícias subutilizadas que poderia ter um impacto positivo na segurança alimentar global, por meio de programas de melhoramentos sistêmicos e multidimensionais organizados e bem coordenados (Muhammad et al., 2020). Ainda, segundo os mesmos autores, o desenvolvimento de culturas subutilizadas, com os seus recursos genéticos e características benéficas, poderá resolver os desafios da segurança alimentar e nutricional, oferecendo um sistema agrícola heterogêneo que inclui recursos alimentares adicionais importantes. Entretanto, esta cultura ainda é subutilizada, pouco conhecida e quase ignorada pela investigação científica e entidades financiadoras (Soumare; Diedhiou; Kane, 2022). Já conforme Tan et al. (2020), o feijão-macoba tem o potencial de contribuir positivamente para a segurança alimentar e nutricional, fornecendo soluções para a sustentabilidade ambiental, diversificação dos sistemas agroalimentares, maior sustentabilidade alimentar e planetária e inclusão socioeconômica.

Segundo Ribeiro (2014), a segurança alimentar e nutricional como estratégia para desenvolver sistemas agroalimentares locais mais resilientes vem sendo utilizada em muitos países nas últimas décadas, com estímulo à produção local de alimentos, com vistas a reduzir ou eliminar a dependência de importação de alimentos e evasão de recursos financeiros, ajudando na redução da fome do país e na construção de uma soberania alimentar.

## 4 CONCLUSÕES

As análises bromatológicas entre as cultivares feijão-macoba e o feijão-comum importado por Angola evidenciaram equivalências na concentração de alguns elementos e uma superioridade do cultivar macoba em onze elementos. Os dados econômicos evidenciaram que, entre os anos de 2013 e 2022, Angola importou 443.097 toneladas do feijão-comum, com um custo de USD 467.088.000,00, e um custo médio de importação por quilograma de USD 1,05, sendo comercializado para os consumidores a USD 2,37 por quilograma, mesmo preço que o feijão-macoba produzido localmente, que na safra 2022/2023 atingiu 358.209 toneladas.

Evidenciado o fato de não haver vantagens econômicas na comercialização destas cultivares, visto que o preço de venda estipulado é o mesmo, e considerando a superioridade da qualidade nutricional do feijão-macoba frente ao feijão comum, a utilização do feijão importado na dieta alimentar de Angola poderia ser substituída pela produção local da cultivar macoba, caracterizando uma agricultura sustentável,

fomentando uma produção local e competitiva e, ainda, com um custo econômico muito menor do que a importação de alimentos. Assim, a descentralização da comercialização atual poderá reduzir a especulação financeira e inserir um maior número de angolanos com poder aquisitivo no mercado consumidor de feijão.

Também, há a necessidade de aprofundar a investigação científica e tecnológica para o fortalecimento de sistemas e estruturas de produção de alimentos com espécies subutilizadas ou negligenciadas, como uma solução sustentável para a escassez de alimentos, insegurança alimentar e nutricional, desnutrição, sustentabilidade ambiental e manutenção dos sistemas ecossistêmicos associados em Angola.

---

## MACOBA BEANS (*VOANDZEIA SUBTERRANEA THOUARS*) AS A SUSTAINABLE FOOD ALTERNATIVE TO IMPORTING COMMON BEANS (*PHASEOLUS VULGARIS L.*) IN ANGOLA, AFRICA

**ABSTRACT:** Feeding and providing food security for all people in the world is a major challenge to be achieved with the United Nations 2030 Agenda, through the Sustainable Development Goals (SDGs). In this context, the investigation carried out a comparative analysis of nutritional equivalence between macoba beans (*V. subterranea*), an underutilized food plant in Angola, Africa, with common beans (*P. vulgaris*), a food imported into the country, relating and quantifying volumes and values, with the aim of providing subsidies for public policies to promote food production, through the development of a sustainable agri-food system. Bromatological analyzes between the macoba bean cultivars and the common bean imported by Angola showed equivalences in the concentration of some elements, and a superiority of the macoba cultivar in eleven elements, highlighting the content of fats, carbohydrates and proteins. Economic data showed that there are no economic advantages in the commercialization of these cultivars, since the stipulated sales price is the same, and considering the superior nutritional quality of macoba beans compared to common beans, the use of imported beans in the Angolan diet could be replaced by local production of the macoba cultivar, characterizing sustainable agriculture with local income generation. Promoting local production could, in addition to increasing productivity and reducing production costs,

decentralize marketing by reducing financial speculation and, in this way, insert a greater number of Angolans with purchasing power into the bean consumer market, contributing to the reduction of hunger in the country and the construction of food sovereignty.

**Keywords:** Underutilized food plants. Macoba beans. Imported foods. Sustainable Agriculture. Angola. Africa.

---

## REFERÊNCIAS

Brough, S., Azam-Ali, S. & Taylor, A. (1993). The potential of bambara groundnut (*Vigna subterranea*) in vegetable milk production and basic protein functionality systems. *Food chemistry*, 47(3), 277-283.

FAO. (2024). *FAOSTAT*. Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação. Retirado de <https://www.fao.org/faostat/en/#data>

FAO, A., ECA e WPF. (2023). *Africa - Regional Overview of Food Security and Nutrition 2023: Statistics and Trends*. FAO. Retirado de <https://doi.org/10.4060/cc8743en>

Gerhardt, T. E. & Silveira, D. T. (2009). *Métodos de pesquisa*. Universidade Aberta do Brasil - UAB/UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 120.

Maxted, N., Mabuza-Diamini, P., Moss, H., Padulosi, S., Jarvis, A. & Guarino, L. (2004). An ecogeographic study African vigna.

Muhammad, I., Rafii, M. Y., Ramlee, S. I., Nazli, M. H., Harun, A. R., Oladosu, Y., . . . Sani Haliru, B. (2020). Exploration of bambara groundnut (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.), an underutilized crop, to aid global food security: Varietal improvement, genetic diversity and processing. *Agronomy*, 10(6), 766.

Nwokolo, E. (1987). A nutritional assessment of African yam bean *Sphenostylis stenocarpa* (Hochst ex A. Rich) Harms, and bambara groundnut *Voandzeia subterranea* L. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 41(2), 123-129.

Ogbuagu, A. S., Okoye, N. N. & Innocent, C. L. (2023). *Vigna subterranean* (Bambara groundnut), a possible weapon in fighting the malnutrition war in the arid and sub-arid regions. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 17(3), 242-249.

Okonkwo, S. I. & Opara, M. F. (2010). The analysis of Bambara nut (*Voandzeia subterranea* (L.) Thouars) for sustainability in Africa [Article]. *Research Journal of Applied Sciences*, 5(6), 394–396. <https://doi.org/10.3923/rjasci.2010.394.396>

Olanipekun, B., Otunola, E. & Oyelade, O. (2015). Effect of fermentation on antinutritional factors and in vitro protein digestibility of Bambara nut (*Voandzeia subterranean* L.). *Food Sci. Qual. Manag*, 39.

Ribeiro, M. M. (2014). Abastecimento municipal de alimentos e estratégias de segurança alimentar e nutricional em Liberdade–MG.

Schüler, S., Melo, N. A. D. & Lobo, E. A. (2022). *Alimentos do ambiente rural de Angola: produção e preparo* (Vol. 1). Editora Dialética.

Shopsemlim. (2024). *Mercados sem limites*. Retirado de <https://www.shopsemlim.com/loja/feijao-preto-1kg/>

Soumare, A., Diedhiou, A. G. & Kane, A. (2022). Bambara groundnut: a neglected and underutilized climate-resilient crop with great potential to alleviate food insecurity in sub-Saharan Africa. *Journal of Crop Improvement*, 36(5), 747–767.

Tan, X. L., Azam-Ali, S., Von Goh, E., Mustafa, M., Chai, H. H., Ho, W. K., . . . Massawe, F. (2020). Bambara Groundnut: An Underutilized Leguminous Crop for Global Food Security and Nutrition [Review]. *Frontiers in Nutrition*, 7, 16, Article 601496. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.601496>

Temple, V. J. & Aliyu, R. (1992). Proximate composition of the cream colored decorticated seed of bambara groundnut (*Voandzeia subterranea* L. Thouars). *Bioscience Research Communication*, 6.

Thammarat, K., Leena, N., Punnanee, S. & Soottawat, B. (2015). Functional and antioxidative properties of Bambara groundnut (*Voandzeia subterranea*) protein hydrolysates. *International Food Research Journal*, 22(4), 1584.

USDA. (2024). *Agricultural Research Service*. U.S. Department of Agriculture. Retirado de <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/?query=>

USP. (2023). *Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA)*. Food Research Center (FoRC). Universidade de São Paulo USP. Retirado de <http://www.fcf.usp.br/tbca>

Valev, N. (2024). *Global Product Prices*. Retirado de [https://pt.globalproductprices.com/Angola/beans\\_prices/](https://pt.globalproductprices.com/Angola/beans_prices/)

Wassermann, V. D., Kruger, A. J. & Heyns, G. (1984). The response of bambara groundnut (*voandzeia subterranea*) and pigeon pea (*cajanus cajan*) to applications of lime, p and k [Article]. *South African Journal of Plant and Soil*, 1(1), 4-8. <https://doi.org/10.1080/02571862.1984.10634100>



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# OBTENÇÃO DE BIOMATERIAIS (B-TCP E CPP) UTILIZANDO CASCA DE OVO DE GALINHA (*GALLUS GALLUS DOMESTICUS*) COMO PRECURSOR INICIAL

*Rogério Pires Santo\*, Raphael Peres Buck, Fabrieli Vargas Flugel*

---

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul Rio-grandense - IFSul, CEP 96785-130,  
Camaquã, Brasil.

\*E-mail: [rogeriosantos@ifsul.edu.br](mailto:rogeriosantos@ifsul.edu.br)



# RESUMO

O presente artigo aborda o desenvolvimento de uma rota de baixo custo para a produção de  $\beta$ -TCP, utilizando cascas de ovos como matéria-prima, visando a valorização de resíduos e a promoção da economia circular. O processo experimental incluiu a coleta, trituração, fervura e secagem das cascas, seguidas de uma reação química para obtenção do  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  e subsequente formação de  $\beta$ -TCP (Beta Trifosfato de Cálcio) e CPP (Pirofosfato de Cálcio). O material resultante passou por tratamentos térmicos e foi analisado por difração de raios X, revelando uma composição final de 17,2% de  $\beta$ -TCP, 81,5% de CPP e 1,3% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Esses resultados demonstram a viabilidade do método proposto, contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico no campo dos biomateriais.

**Palavras-chave:** Biomateriais. Fosfato de cálcio. Ortopedia. Reciclagem.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Um grande número de cirurgias ortopédicas é realizado anualmente em todo o planeta. Estima-se que tenham ocorrido 22,3 milhões de procedimentos em 2017, tendo chegado a aproximadamente 28,3 milhões em 2022 (Barbosa, Nunes Júnior & Ferraz, 2023).

Os materiais sintéticos que mais se assemelham ao tecido ósseo são as cerâmicas de fosfato de cálcio (Shackelford, 2008). As cerâmicas de fosfato de cálcio são os substitutos ósseos, biomateriais sintéticos mais usados e eficazes (Guillaume, 2017).

O  $\beta$ -TCP é um biomaterial cerâmico utilizado tanto na odontologia, quanto na medicina (Chung, Kim & Chung, 2019). Outrossim, uma fonte útil de carbonato de cálcio é a casca de ovo de galinha (*Gallus gallus domesticus*). Estima-se a geração anual de 5,92 milhões de toneladas de casca de ovos em todo planeta (Vieira, Pinho, Pinheiro & Silva, 2017).

Os fosfatos de cálcio são biocerâmicas com diferentes composições amplamente estudadas na área de biomateriais. O pirofosfato de cálcio ( $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ) é um fosfato condensado, obtido por condensação e polimerização dos grupos  $\text{PO}_4^{3-}$ . O CPP, uma forma de fosfato de cálcio, tem potencial para ser usado como enxerto ósseo. A síntese de CPP puro é desafiadora devido às suas três formas polimórficas ( $\beta$ -CPP,  $\alpha$ -CPP e

$\gamma$ -CPP), sendo a fase  $\beta$ -CPP a mais interessante para enxertos ósseos. O aumento da longevidade em todo o mundo tem suas vantagens, porém também fez com que as doenças relacionadas ao sistema ósseo se tornassem um problema de saúde pública (Guastaldi & Aparecida, 2010). Os biomateriais são os materiais utilizados para substituir e regenerar o tecido ósseo. Esses materiais precisam apresentar um conjunto de características físicas, químicas e biológicas que possibilitem o bom desempenho da função desejada e estimulem uma resposta adequada dos tecidos vivos.

Atualmente, os compostos de cálcio fosfato estão em destaque como biomateriais primários em pesquisa e aplicação para restaurar e renovar tecidos ósseos, devido às suas características únicas: similaridade com a estrutura mineral dos ossos, dentes e tecidos calcificados; ótima compatibilidade com o organismo; capacidade bioativa; inexistência de substâncias tóxicas; taxas de decomposição variáveis; e osteocondutividade, que estimula o crescimento ósseo na superfície ou poros (Chung, Kim & Chung, 2019).

Na área ortopédica, as biocerâmicas são utilizadas para tratar lesões nos ossos, reconstruir perdas ósseas e prevenir a osteoporose. Já na traumatologia, esses materiais são empregados no reparo de fraturas, no alongamento ósseo, na reconstrução de ossos perdidos e na estabilização de implantes (Tadic & Epple, 2004). Na odontologia, as biocerâmicas são aplicadas para tratar a perda de estruturas dentárias devido a cáries ou fraturas, recuperar o esmalte dentário danificado por ácidos ou por processos de clareamento e para a remineralização do esmalte dental (Chung, Kim & Chung, 2019).

As biocerâmicas são materiais cerâmicos projetados para uso em ambientes biológicos, especialmente em contato direto com tecidos humanos. Devido à sua elevada biocompatibilidade e capacidade de interagir favoravelmente com o organismo, esses materiais são amplamente utilizados na fabricação de implantes ortopédicos, odontológicos e dispositivos para regeneração de tecidos. Entre os exemplos mais notáveis de biocerâmicas estão a hidroxiapatita (HA), a alumina e a zircônia, que apresentam propriedades únicas que só são possíveis para aplicações biomédicas (Hench & Jones, 2015).

Os cimentos à base de fosfato de cálcio são maleáveis e podem ser ajustados conforme a necessidade no momento da aplicação, podendo ser introduzidos através de métodos pouco invasivos ou combinados com diferentes medicamentos para atingir um efeito terapêutico preciso e concentrado (Guillaume, 2017).

Diversos métodos e fontes de cálcio foram utilizados para sintetizar o pó de CPP. No entanto, as fontes de cálcio de alta pureza são caras, o que tem levado ao uso de alternativas, como resíduos de casca de ovo (Corrêa & Holanda, 2016).

Apesar das vantagens, o desenvolvimento e a aplicação de biocerâmicas ainda enfrentam desafios. Um dos principais obstáculos é a fragilidade causada por alguns desses materiais, o que pode limitar sua aplicação em locais que exigem alta resistência ao impacto. Além disso, questões de integração e longevidade dos implantes continuam sendo áreas ativas de pesquisa (Vallet-Regí et al., 2006).

As biocerâmicas são amplamente utilizadas na medicina regenerativa, especialmente para peças e substituição de tecidos ósseos. Elas podem ser periódicas em três categorias principais: bioinertes, bioativas e reabsorvíveis, sendo as últimas de particular interesse devido à sua capacidade de se degradarem gradualmente e serem extraídas por tecido ósseo natural (Hench & Jones, 2015). O fosfato tricálcico beta ( $\beta$ -TCP) e o fosfato de cálcio poroso (CPP) são exemplos de biocerâmicas reabsorvíveis, que se destacam por suas propriedades osteocondutivas e pela habilidade de suportar o crescimento de células ósseas (Dorozhkin, 2010).

Tanto o  $\beta$ -TCP quanto o CPP são conhecidos por suas propriedades osteocondutivas, ou seja, sua capacidade de suportar o crescimento de osso ao longo de sua estrutura. Quando implantados, esses materiais interagem com o ambiente biológico para facilitar a formação de hidroxiapatita, o principal mineral encontrado nos ossos (Bose, Roy & Bandyopadhyay, 2012). A bioatividade desses materiais é um fator crítico para promover a regeneração óssea em ambientes.

No entanto, um dos principais desafios no uso de biocerâmicas como  $\beta$ -TCP e CPP está relacionado ao controle preciso de suas taxas de manipulação e resistência mecânica. Em locais onde ocorre alta resistência mecânica, a fragilidade derivada dessas cerâmicas pode ser um problema (Daculsi et al., 1989). Apesar disso, avanços recentes, como a adição de polímeros e a combinação com outros compostos, mostraram melhorias significativas na resistência e no controle da manipulação (Zhang et al., 2017).

Biocerâmicas baseadas em  $\beta$ -TCP e CPP representam uma área promissora na engenharia de tecidos ósseos devido à sua biocompatibilidade e capacidade de suportar a regeneração óssea. Embora ainda existam desafios relacionados à resistência mecânica e às taxas de manuseio, os avanços contínuos no dano desses materiais estão aprimorando suas aplicações em ambientes clínicos (Habracken et al., 2016).

O fosfato tricálcico beta ( $\beta$ -TCP) é uma forma cristalina de fosfato de cálcio que tem se mostrado altamente eficiente em aplicações biomédicas devido à sua capacidade de ser bioabsorvível. A principal característica do  $\beta$ -TCP é que ele se degrada gradualmente no corpo humano, sendo substituído por osso natural ao longo do tempo. Esse processo é favorecido por sua estrutura porosa, que permite a infiltração de células osteogênicas e a vascularização, elementos essenciais para a regeneração óssea (Yuan et al., 2010).

Além disso, a composição química do  $\beta$ -TCP favorece a formação de hidroxiapatita, o principal componente mineral do osso humano, o que o torna um material osteocondutivo ideal para implantes ósseos (Dorozhkin, 2010). A capacidade de modulação de sua taxa de manipulação também é um ponto forte, uma vez que pode ser controlada por variações no processo de sinterização e na composição do material (Kondo et al., 2006). Estudos recentes têm modificados explorados de  $\beta$ -TCP com polímeros biodegradáveis, como o ácido polilático (PLA), para melhorar sua resistência mecânica e ajustar sua taxa de bioabsorção (Zhang et al., 2017).

O fosfato de cálcio poroso (CPP) é um material biocerâmico que imita a estrutura do osso esponjoso, o que o torna especialmente eficaz na promoção da osteointegração. Sua elevada porosidade facilita a infiltração de células osteogênicas e a troca de nutrientes e oxigênio, promovendo o crescimento ósseo (Habibovic et al., 2006). A porosidade do CPP também desempenha um papel crucial em sua taxa de manipulação: quanto maior a porosidade, mais rápida a sua reação

Tanto o  $\beta$ -TCP quanto o CPP possuem propriedades osteocondutivas, o que significa que eles servem como suporte para o crescimento ósseo. A osteocondutividade é uma propriedade crucial em materiais biomédicos usados para a regeneração óssea, pois permite que as células ósseas cresçam ao longo da superfície do implante, integrando-se completamente ao osso natural do paciente (Bose, Roy & Bandyopadhyay, 2012).

Além da osteocondutividade, a bioatividade desses materiais é de grande importância. A bioatividade refere-se à capacidade de um material de formar uma camada de hidroxiapatita na sua superfície quando em contato com fluidos corporais, facilitando a ligação entre o implante e o osso adjacente (Dorozhkin, 2010). O  $\beta$ -TCP e o CPP são altamente bioativos e têm sido amplamente utilizados em aplicações de engenharia de tecidos ósseos por causa dessa propriedade. No entanto, a sua fragilidade também, uma característica comum em cerâmicas, pode limitar seu uso em locais que exijam alta resistência mecânica (Daculsi et al., 1989).

As biocerâmicas baseadas em  $\beta$ -TCP e CPP são materiais promissores na engenharia de tecidos ósseos devido às suas propriedades osteocondutivas, bioabsorvíveis e bioativas. Enquanto o  $\beta$ -TCP é amplamente utilizado por sua capacidade de promover a formação de hidroxiapatita e regeneração óssea controlada, o CPP destaca-se por sua estrutura porosa e osteointegração aprimorada. Embora desafios como a fragilidade mecânica ainda precisem ser superados, os avanços recentes, como a modificação da porosidade e a combinação com polímeros biodegradáveis, aumentaram o potencial desses materiais em aplicações clínicas (Hench & Jones, 2015; Zhang et al., 2017).

O presente projeto busca desenvolver uma rota de baixo custo para produção de  $\beta$ -TCP e CPP, valorizando a utilização de resíduos e a proposição de economia circular, com foco no desenvolvimento científico, tecnológico e iniciação científica de estudantes do ensino técnico, a partir da adaptação de metodologia proposta por Gomes, Di Lello, Campos & Sampaio (2012).

## 2 METODOLOGIA

Foram separados o equivalente a 200 g de cascas de ovos de galinha (*Gallus gallus domesticus*) obtidas do consumo doméstico. Todas totalmente limpas, com cor branca e livre de corpos estranhos em sua superfície. Após a coleta da matéria-prima, as cascas dos ovos foram levadas a um triturador doméstico com 100 mL de água corrente para iniciar o processamento por 30 s.

Após a etapa de trituração, as cascas dos ovos foram peneiradas e levadas à fervura, com água destilada, durante 15 min. Após a fervura, a matéria-prima foi lavada com álcool 70% e levada para estufa para secagem por 24 h a 50 °C.

Finalizada a secagem, a matéria-prima foi armazenada em recipiente de plástico esterilizado. As seguintes reações representam os sistemas estudados termodinamicamente para o ataque do carbonato de cálcio, presente na casca de ovo, por  $\text{HNO}_3$ :  $\text{CaCO}_3 + 2\text{HNO}_3 (\text{aq}) \rightarrow \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 (\text{aq}) + \text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$ .

Em um béquer contendo 250 mL da solução de  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  obtida na reação entre  $\text{HNO}_3$  e carbonato de cálcio proveniente da casca de ovos, foram adicionados lentamente 19,03 g de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  sob agitação e temperatura constante (50 °C).

A reação foi processada por um período de 1 h sem controle de pH. Ao término da reação, obteve-se um precipitado branco, sendo posteriormente lavado com água deionizada, filtrado a vácuo e levado à estufa para secagem a 100 °C por 24 h. Este material foi levado a tratamento térmico a 900 °C durante 2 h, conforme Figura 1.

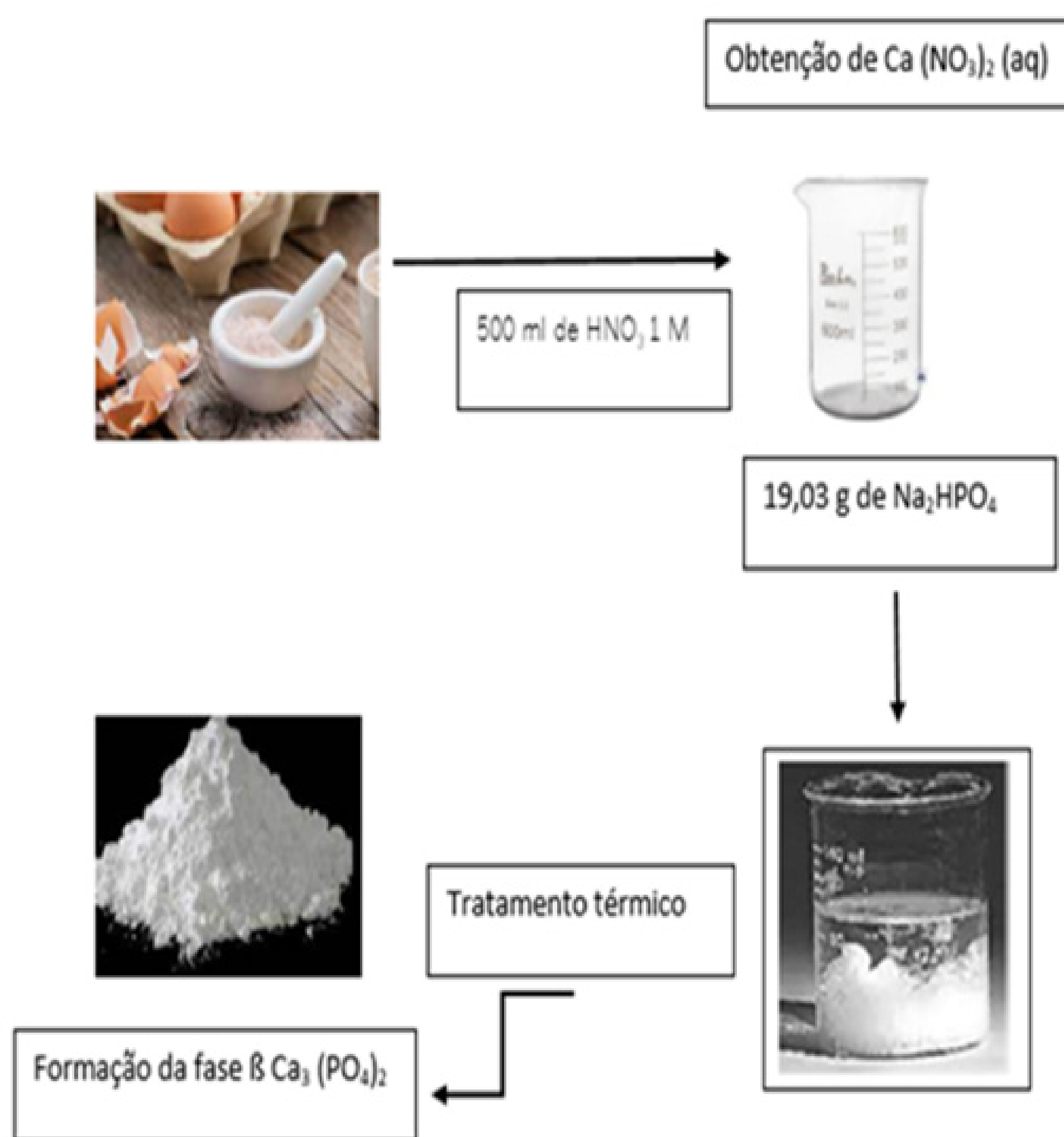


Figura 1. Fases da metodologia desenvolvida na presente pesquisa.

A análise por difração de raios X (DRX) foi realizada em um difratômetro de raios X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. A amostra em pó foi analisada no intervalo angular de  $5$  a  $90^\circ 2\theta$  em passo de  $0.05^\circ/1\text{s}$  utilizando-se fendas de divergência e anti espalhamento de  $1^\circ$  e  $0.2 \text{ mm}$  no detector.

Na amostra em pó, o material pulverizado ou desagregado é depositado em um porta-amostra específico para pó, procurando-se preservar a desorientação das partículas onde todos os minerais ou estruturas cristalinas são analisados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos mostraram-se promissores, com a geração de um composto rico em  $\beta$ -TCP e CPP (17,2% e 81,5% respectivamente), como pode-se observar na Figura 2. No entanto, houve a geração de um pequeno percentual de Hidróxido de Cálcio (1,3%), o que não compromete os resultados. De acordo com Almeida (2018), o aumento do pH do meio

pelo hidróxido de cálcio ativa a fosfatase alcalina, iniciando o processo de mineralização. Quando em contato com fluidos teciduais, o hidróxido de cálcio se divide em íons cálcio e hidroxila. Esses íons cálcio, ao interagirem com o tecido conjuntivo, causam necrose e liberam dióxido de carbono. Em conjunto com o hidróxido de cálcio, formam-se cristais de calcita (carbonato de cálcio) que servem como núcleo de calcificação.

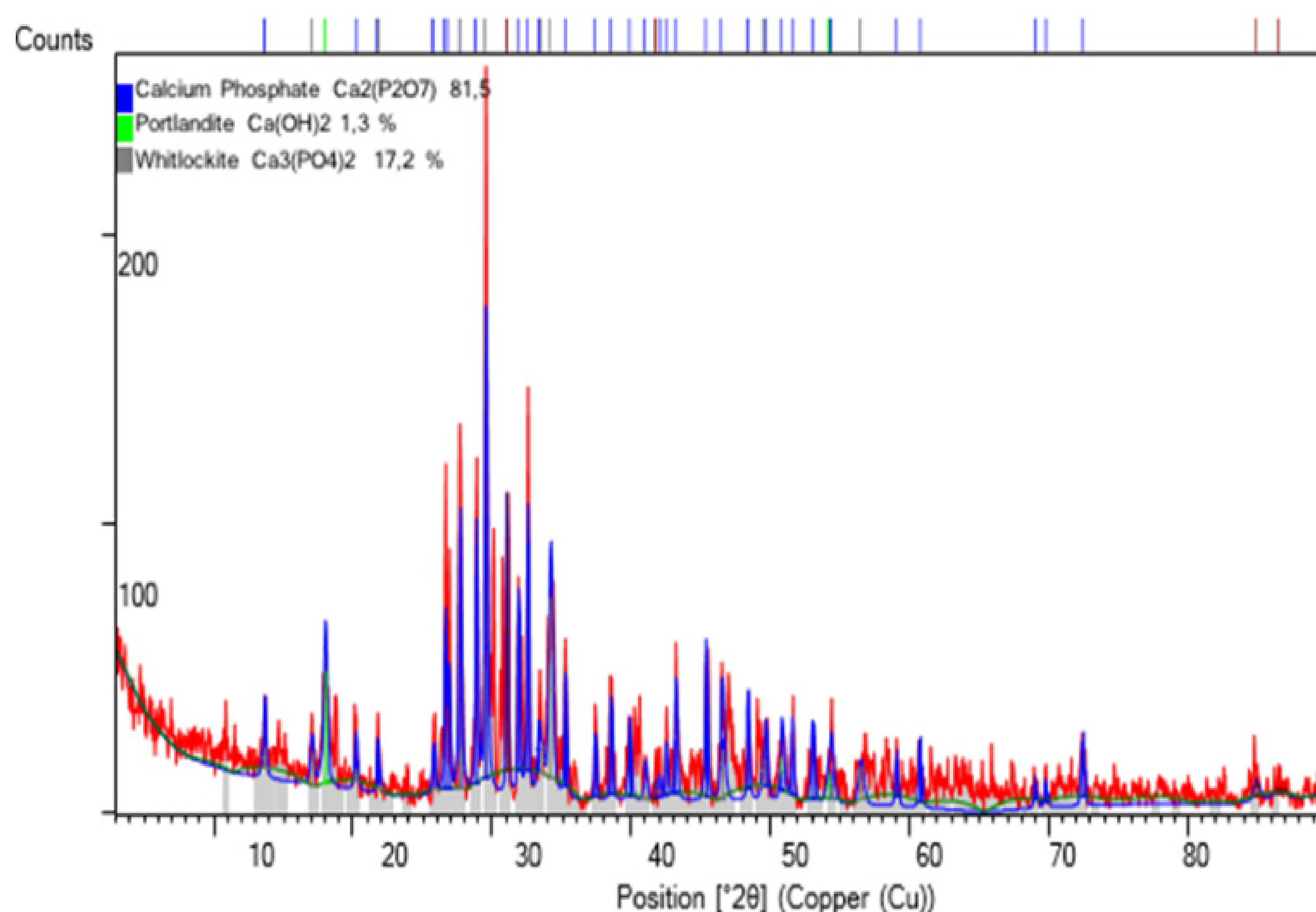


Figura 2. Análise de DRX.

A alcalinidade do meio estimula a secreção de fibronectina pelo tecido conjuntivo, que, juntamente com os cristais de calcita, promove a formação de colágeno tipo I, induzindo a mineralização.

A alcalinidade do meio tem um papel crucial na biologia dos tecidos, especialmente no tecido conjuntivo. Esse ambiente básico estimula a coordenação da fibronectina, uma glicoproteína que desempenha papel fundamental na adesão e organização celular (Murray et al., 2020). A fibronectina, em conjunto com os cristais de calcita, atua diretamente na promoção da formação de colágeno tipo I, que é o tipo predominante no tecido ósseo. Esse processo de interação entre a fibronectina e os cristais de calcita induz a mineralização, essencial para a formação e manutenção de estruturas ósseas e cartilaginosas.

## 4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que há viabilidade técnica para obtenção de  $\beta$ -TCP e CPP, por via úmida, utilizando cascas de ovos, contribuindo para a destinação correta de resíduos industriais e favorecendo a economia circular, gerando sustentabilidade para diferentes setores: indústria química, farmacêutica e alimentícia.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia-IFSUL, que, por meio do Edital IFSUL/PROPEP 08/2023, proporcionou fomento financeiro para execução desta pesquisa.

---

## OBTAINING BIOMATERIALS ( $\beta$ -TCP AND CPP) USING CHICKEN EGG SHELL (*GALLUS GALLUS DOMESTICUS*) AS INITIAL PRECURSOR

**ABSTRACT:** This article addresses the development of a low-cost route for the production of  $\beta$ -TCP, using eggshells as raw material, aiming at the valorization of waste and the promotion of the circular economy. The experimental process included the collection, grinding, boiling and drying of the eggshells, followed by a chemical reaction to obtain  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  and subsequent formation of  $\beta$ -TCP (Calcium Beta Triphosphate) and CPP (Calcium Pyrophosphate). The resulting material underwent heat treatments and was analyzed by X-ray diffraction, revealing a final composition of 17.2%  $\beta$ -TCP, 81.5% CPP and 1.3%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . These results demonstrate the feasibility of the proposed method, contributing to the scientific and technological development in the field of biomaterials.

**Keywords:** Biomaterials; Calcium Phosphate; Orthopedics; Recycling.

---



# REFERÊNCIAS

- Almeida, T. F. (2018). *Síntese e caracterização de biocimento de fosfato de cálcio usando resíduo de mármore*. Tese de Doutorado, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.
- Barbosa, A. A., Nunes Júnior, S. A. & Ferraz, A. V. (2023). Um estudo da bioatividade, hemocompatibilidade e propriedades antimicrobianas de um composto de óxido de zinco e fosfato de cálcio para regeneração óssea. *Cerâmica*, 69(390), 93–98.
- Bose, S., Roy, M. & Bandyopadhyay, A. (2012). Avanços recentes em andaimes de engenharia de tecido ósseo. *Tendências em Biotecnologia*, 30(10), 546–554.
- Chung, H., Kim, S., and Chung, S. H. (2019). Clinical outcome of beta-tricalcium phosphate use for bone defects after operative treatment of benign tumors. *Clinical Orthopaedic Surgery*, 233–236.
- Corrêa, T. H. A. & Holanda, J. N. F. (2016). Calcium pyrophosphate powder derived from avian eggshell waste. *Cerâmica*, 62(363), 278–280.
- Daculsi, G., LeGeros, R. Z., Nery, E., et al. (1989). Transformação de cerâmicas bifásicas de fosfato de cálcio in vivo: caracterização ultraestrutural e físico-química. *Journal of Biomedical Materials Research*, 23(8), 883–894.
- Dorozhkin, S. V. (2010). Biocerâmicas de ortofosfatos de cálcio. *Biomateriais*, 31(7), 1465–1485.
- Gomes, L. C., Di Lello, B. C., Campos, J. B., Sampaio, M. (2012). Síntese e caracterização de fosfatos de cálcio a partir da casca de ovo de galinha. *Cerâmica*, 58, 448–450.
- Guastaldi, A. C. & Aparecida, A. H. (2010). Fosfatos de cálcio de interesse biológico: importância como biomateriais, propriedades e métodos de obtenção de recobrimentos. *Química Nova*, 33(6), 1352–1358.
- Guillaume, B. (2017). Filling bone defects with  $\beta$ -tcp in maxillofacial surgery: A review. *Morphologie*, 101, 113–119.
- Habibovic, P. et al. (2006). Potencial osteoindutivo de biomateriais. *Biomateriais*, 27(36), 6303–6310.

Habraken, W. J. et al. (2016). Fosfatos de cálcio em aplicações biomédicas: materiais para o futuro? *Materials Today*, 19(2), 69–87.

Hench, L. L. & Jones, J. R. (2015). Vidros bioativos: fronteiras e desafios. *Fronteiras em bioengenharia e biotecnologia*, 3, 194.

Kondo, N. et al. (2006). Formação óssea por hidroxiapatita porosa e  $\beta$ -TCP. *Journal of Biomedical Materials Research Parte A*, 78A(2), 370–377.

Murray, R., Henson, C., Wallace, A. (2020). *Revista de Biologia Molecular*, 430(2). <https://doi.org/10/j.jmb>.

Shackelford, J. F. (2008). *Ciência dos materiais*. 6th ed. São Paulo: Pearson.

Tadic, D. & Epple, M. (2004). Uma caracterização físico-química completa de 14 materiais de substituição óssea à base de fosfato de cálcio em comparação ao osso natural. *Biomateriais*, 25(6), 987–994.

Vallet-Regí, M., Ruiz-González, M., Izquierdo-Barba, I. & Gonzalez-Calbet, J. (2006). Revisiting silica based ordered mesoporous materials: medical applications. *Journal of Materials Chemistry – J MATER CHEM*, 16.

Vieira, L. A. F., Pinho, M. D., Pinheiro, I. P., Da Silva, S. N. (2023). Obtenção de óxido de cálcio a partir da casca de ovo de galinha. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 3(8), 1159–1166. 10.18540/jcecvl3iss8pp1159-1166. Recuperado de <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/2419>

Yuan, H., Fernandes, H., Habibovic, P., et al. (2010). Cerâmica osteoindutora como uma alternativa sintética ao enxerto ósseo autólogo. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(31), 13614–13619.

Zhang, J. et al. (2017). Compósitos de ácido polilático/fosfato de cálcio para regeneração óssea: mecanismos e aplicações. *Materiais*, 10(8), 911.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# MONITORAMENTO AVANÇADO COM *SOFTWARE* LIVRE: QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS, SUBTERRÂNEAS E DE CONSUMO HUMANO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

*Geovan Rodrigues da Silva Carvalho<sup>\*1</sup>, Vinícius Beppler dos Reis<sup>1</sup>,  
Pablo Lemos Berned<sup>2</sup>, Manuela Gomes Cardos<sup>2</sup>*

---

1 Aluno Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Cerro Largo, RS. Rua Dr. João Sebastiany, 376, Centro, 97900-000 - RS

2 Professor adjunto da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS - *campus* Cerro Largo, - RS).  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo. Rua Major Antônio Cardoso, 590. Centro,  
CEP: 97900000 - Cerro Largo, RS - Brasil

\*E-mail: [geovenrodrigues@hotmail.com](mailto:geovenrodrigues@hotmail.com)

# RESUMO

A qualidade da água é determinada por parâmetros físicos, químicos e biológicos que classificam sua segurança para os seres humanos. Este trabalho visa apresentar um sistema *online*, de livre acesso e de fácil uso, cujo objetivo é informar a qualidade da água em locais e datas específicas, explicando cada parâmetro de maneira acessível. Os testes preliminares indicam que o sistema alerta sobre os efeitos na saúde e no meio ambiente quando os padrões de qualidade não são atendidos. Para alcançar esses objetivos, compilamos dados de pesquisas, trabalhos científicos e relatórios de instituições públicas e privadas, com base nas legislações vigentes. A metodologia foca na criação de um protocolo para a inserção contínua de dados no sistema, que será atualizado conforme novas informações sejam disponibilizadas pelas instituições de recursos hídricos do Rio Grande do Sul.

**Palavras-chave:** Monitoramento Hídrico. Parâmetros de Qualidade. Interface Acessível.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A boa qualidade da água é crucial para promover a saúde humana e sustentar o ecossistema. Ele proporciona água potável segura para consumo, suporte essencial à irrigação agrícola, vitalidade para indústrias diversas, oportunidades de recreação e turismo, além de servir como habitat primordial para a vida selvagem (Tundisi, 2006; Lord, 2001; Bertol & De Azevedo, 2016). A manutenção da qualidade da água não só protege a saúde pública, reduzindo doenças relacionadas à água contaminada, mas também preserva a biodiversidade aquática e terrestre, garantindo um ambiente equilibrado e sustentável para as gerações presentes e futuras (De Resende, 2002; Andrietti, 2016; De Almeida, 2010; Rangecroft et al., 2023).

### 1.1 SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA QUALIDADE HÍDRICA

Considerando as diversas aplicações da água de alta qualidade, evidencia-se a importância desta característica para o meio ambiente como um todo. Isto a torna de extrema relevância socioambiental, exigindo um ordenamento baseado em critérios específicos que considerem as características intrínsecas dos recursos hídricos (Hídricos, 2012; De Mello Luchini, 2000; Xavier & Ronca, 2007; Pinhatti; Ross & Del Prette, 1998). A gestão eficaz dos recursos hídricos é fundamental para assegurar a sustentabilidade

e a conservação ambiental, beneficiando tanto a sociedade quanto os ecossistemas naturais (Tundisi, 2006; Rangecroft et al., 2023; Andrietti, 2016). Portanto, é essencial implementar práticas e políticas que garantam a qualidade e a disponibilidade da água (Pineda & Schäfer, 1987).

Neste contexto, foi implementado o projeto em execução na Universidade Federal da Fronteira Sul, *Campus Cerro Largo*, intitulado “Desenvolvimento de um sistema *online* para monitoramento e análise da qualidade das águas superficiais, subterrâneas e de consumo humano no Estado do Rio Grande do Sul”. Este projeto, financiado pelo EDITAL FAPERGS 10/2021 AUXÍLIO RECÉM-DOCTOR ou RECÉM-CONTRATADO – ARD/ARC, tem como objetivo fornecer informações abrangentes e precisas ao público sobre o estado da qualidade das águas, utilizando dados hidroquímicos e hidrogeológicos para apoiar a gestão e a preservação dos recursos hídricos do estado do Rio Grande do Sul.

## 1.2 ESTRATÉGIA DE EXTENSÃO PARA DIVULGAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Todas essas informações estão acessíveis ao público por meio de um sistema *online* de acesso irrestrito, que contribui para a comunidade científica. Esse sistema possibilita a utilização de dados para análises e pesquisas, fornecendo uma visão detalhada sobre a qualidade da água nos municípios do estado. Pesquisadores, empresas e instituições podem inserir dados no sistema, mediante comunicação prévia ao administrador, que realiza os ajustes necessários. O sistema otimiza a gestão e a avaliação da qualidade hídrica, promovendo a colaboração e a transparência. O lançamento preliminar do sistema ocorreu no último bimestre de 2023, representando um avanço significativo na disponibilização de dados sobre recursos hídricos.

No âmbito das atividades realizadas no projeto, foi implementado um trabalho de extensão com a meta específica de disseminar informações sobre a definição, os efeitos na saúde e os impactos ambientais associados a um parâmetro específico da qualidade da água. O trabalho é estruturado para fornecer dados e análises detalhadas, apresentados em uma linguagem técnica acessível ao público geral. A iniciativa visa aumentar a conscientização e a compreensão sobre a influência desse parâmetro na saúde humana e no meio ambiente, facilitando a aplicação de conhecimentos técnicos por parte da comunidade.

No Brasil, segundo dados do DATASUS, as doenças relacionadas a deficiências no saneamento ambiental resultaram em 3,4 milhões de internações no país, em um período de 4 anos. Serviços adequados de saneamento ambiental poderiam ter prevenido 80% dos

casos de febre tifóide e paratifóide, 60% a 70% dos casos de tracoma e esquistossomose e de 40% a 50% das doenças diarréicas e outras parasitoses (Brasil, 2023).

Devido à crescente carga de contaminantes resultante da poluição hídrica, os sistemas de tratamento devem ser projetados para remover uma variedade cada vez maior de substâncias (Cartaxo et al., 2020; Santos, 2015; Leite et al., 2010; Grosseli, 2016). A ineficácia no tratamento ou a contaminação da rede de distribuição pode resultar na presença de patógenos e poluentes na água consumida. Isso representa um risco substancial à saúde pública, destacando a necessidade de garantir a eficiência dos processos de tratamento para a segurança da água potável (Da Silva Malheiros et al., 2009; Maciel Filho, 1997; Leal, 2012).

Estudos como os de Siqueira & Kruse e Tundisi, Porto & Porto (2008) demonstram que a presença de agrotóxicos no meio ambiente está correlacionada com efeitos adversos significativos à saúde humana, incluindo a manifestação de doenças crônicas resultantes da exposição prolongada e contínua. Para citar um exemplo, a atrazina, agrotóxico intensivamente utilizado no Brasil para o cultivo de milho e cana-de-açúcar, tem sido relacionada à ocorrência de partos prematuros, deformidades nos genitais masculinos em recém-nascidos e alteração em moléculas de MicroRNA, as quais são capazes de induzir a doença de Parkinson (Stayner et al., 2017; Li et al., 2019; Agopian et al., 2013).

Quase metade da população brasileira não possui acesso a qualquer sistema de esgotamento sanitário, o que significa que aproximadamente 100 milhões de pessoas utilizam medidas alternativas para lidar com seus dejetos, seja através de uma fossa ou jogando o esgoto diretamente em rios, conforme o diagnóstico do SNIS (2023, p. 20).

Nos municípios sem sistema público de abastecimento de água, os serviços são prestados por meio de soluções alternativas, como poços, cisternas, chafarizes, caminhões-pipa, entre outros. Essas soluções, embora frequentemente eficazes em curto prazo, enfrentam desafios relacionados à manutenção e à qualidade da água distribuída. Além disso, a ausência de supervisão técnica pode gerar impactos na saúde pública e no meio ambiente, ressaltando a importância de estratégias adequadas para atendimento dessas localidades.

A má qualidade das águas que recebem esta carga de esgoto coloca toda a população em situação de sério risco de contaminação. Essa consideração está equiparada com as ideias de Agopian et al. (2013), Da Silva Malheiros et al. (2009), Li et al. (2019), Cartaxo et al. (2020), e Grosseli (2016) cujos estudos estabelecem que os sistemas de tratamento

com má qualidade hídrica não possuem capacidade de tratar nem mesmo monitorar uma série de contaminantes presentes em dejetos, como vírus, cistos de protozoários, fármacos e microplásticos, por exemplo.

Em conformidade com esses estudos que promovem melhorias na qualidade da água, pesquisas como as de Belotti (2020), Silva (2011), Bevilacqua et al. (2014) e Aragão et al. (2012) sintetizam os desafios e as soluções para a gestão da água. Esses autores destacam que o acesso desigual à água potável globalmente, a distribuição irregular da disponibilidade hídrica nas regiões do Brasil e a escassez de água em áreas específicas ou durante períodos determinados representam desafios significativos.

Esses trabalhos ainda enfatizam que a falta de recursos financeiros para investimentos municipais agrava esses problemas. Libânio et al. (2005, p. 222) defende que “A disponibilidade hídrica não deve ser a única variável explicativa do desenvolvimento regional no país. As reservas hídricas, se medidas exclusivamente em termos quantitativos, não dizem muito quanto à disponibilidade, mas somente, quanto à potencialidade”. Portanto, medidas que impliquem na conscientização da população são fundamentais para assegurar a sustentabilidade e a segurança hídrica para todas as populações afetadas.

De forma a criar mecanismos para a divulgação de informação sobre a qualidade da água para consumo humano, no ano de 2005 foi instituído o Decreto Federal nº 5.440 que, dentre outras providências, define quais os parâmetros de qualidade que devem ser informados ao consumidor (Da água, 2010; Frazão et al., 2011; Fortes et al., 2020). De acordo com o documento, a informação sobre a qualidade da água deverá ser precisa, clara, correta, ostensiva e de fácil compreensão, especialmente quanto aos aspectos que impliquem situações de perda da potabilidade ou de risco à saúde.

Considerando-se o caráter de subsistência que a água possui, os riscos à saúde que estão associados à ingestão de contaminantes e ainda que as políticas públicas para a gestão dos recursos hídricos são elaboradas de acordo com a necessidade do bem-estar da população, a divulgação dos dados de forma clara e objetiva é fundamental para os avanços necessários (Da água, 2010; Agopian et al., 2013; SNIS, 2019; Stayner et al., 2017; Leal, 2012; Belotti, 2020).

Frente ao cenário apresentado, o presente trabalho justifica-se por propor a criação de um meio exclusivo, inédito e de livre acesso para divulgação de dados da qualidade das águas subterrâneas, superficiais e de consumo humano. A criação de uma ferramenta de pesquisa como a proposta auxiliará no avanço das pesquisas sobre qualidade das águas,

no desenvolvimento de tecnologias de tratamento da água que atuem nos problemas concretos existentes e na melhoria da gestão dos recursos hídricos, além de ser uma excelente ferramenta educacional.

## 2 METODOLOGIA

O estudo foca no desenvolvimento de duas metas operacionais, das dez, a serem implementadas ao longo de 24 meses: Meta 1 – Pesquisa detalhada e inserção de informações sobre parâmetros de qualidade da água, incluindo definição, impacto na saúde humana em caso de ingestão e efeito ambiental em caso de contaminação; Meta 2 – Adequação e integração dos dados coletados no sistema desenvolvido, com ajustes na linguagem para melhor atender ao público-alvo. Estes critérios encontram-se nos grifos de Fortes (2020, p. 21):

Como atribuições da vigilância, destaca-se a divulgação permanente e contínua das informações sobre a qualidade da água para consumo e os riscos à saúde associados, regulada pelo Decreto Federal de nº 5.440/2005 que disciplina os instrumentos para divulgação da informação ao consumidor sobre a qualidade da água para consumo humano. A sistematização e divulgação dos dados de qualidade da água à população consumidora é um dos níveis de ação de procedimentos de vigilância e, segundo a Organização Pan-Americana da Saúde (Opas), tem um grau de complexidade maior e depende do sucesso das demais etapas, como a de monitoramento.

Foram conduzidas reuniões semanais para definir os parâmetros de qualidade da água a serem analisados e a forma de apresentação desses parâmetros, garantindo acessibilidade e compreensão para toda a população. Com base nas definições estabelecidas pelos colaboradores do projeto, os textos a serem implementados no *software* foram revisados pela coordenadora do projeto, em conjunto com dois professores especializados nas áreas de linguística e química.

Para organização das mais diferentes etapas do projeto, foi utilizado o sistema Planilhas Excel, com o qual foi possível a adição contínua dos dados e das definições com toda a equipe do projeto. Vale mencionar ainda que, para a obtenção dos dados quantitativos, após a criação do *website*, está sendo considerada a quantidade de acessos ao *site*, além da avaliação do público para com o *site*.



Com a obtenção dos dados, junto à definição dos parâmetros, o próximo passo foi o desenvolvimento do *software online*, o qual encontra-se concluído, porém, sem acesso ao público em geral, pois a adição dos dados está em andamento e em constante análises.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados quantitativos do projeto mostram um progresso significativo nas metas estabelecidas. A Meta 1, que envolveu a pesquisa e inserção de informações sobre os parâmetros de qualidade da água, foi bem-sucedida. Foram identificados e detalhados 10 parâmetros principais, abrangendo definição, impacto na saúde humana e efeito ambiental. Para a Meta 2, a integração e adequação dos dados ao sistema foram realizadas em 80% e a linguagem foi ajustada em 70% dos conteúdos para melhor atender ao público-alvo.

Durante o processo, foram conduzidas 24 reuniões semanais para a definição e revisão dos parâmetros de qualidade da água. Os textos foram revisados pela coordenadora e por especialistas nas áreas de linguística e química, resultando em 35 textos técnicos ajustados e aprovados.

Para a organização das etapas do projeto, foram utilizadas planilhas do Excel para a adição contínua de dados e definições. A planilha exibida na Figura 1 mostra o campo de interação para dados no desenvolvimento do *site* e execução do objetivo do projeto. Através desses dados obtidos, será possível realizar a pesquisa da qualidade da água no estado do Rio Grande do Sul.

O desenvolvimento do *software* está 90% concluído, com a adição de dados em andamento e revisões contínuas, como mostra a figura 2, a qual apresenta a interface do *site* “Qualidade das águas do Rio Grande do Sul”, cuja proposta é oferecer uma interface simples e de fácil uso que, além disso, facilite a compreensão da população sobre a qualidade da água. No que diz respeito aos parâmetros, 10 foram definidos e implementados, com 8 em fase de integração completa. O *website* ainda não está acessível ao público geral, aguardando a finalização da adição de dados e análises contínuas. Os próximos passos incluem a divulgação nas escolas básicas para cumprir as metas estabelecidas, como também, promover a popularização da ciência relacionada.

| PLANILHA DE INFORMAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS |  |  |  |  |  |   |   |
|--|--|--|--|--|--|---|---|
| PARÂMETRO  | Definição  | Definição ao usuário   | Fonte  | Efeito ao meio ambiente* (em caso de presença do parâmetro com valor acima do permitido)   | Fonte  | Efeito à saúde (em caso de ingestão com valor acima do permitido) | Fonte   |
| <b>METAIS</b>  |  |  |  |  |  |   |   |
| Alumínio<br><br>*Observação: entende-se como alumínio total.       | O alumínio é um metal que ocorre naturalmente e é comumente usado em água e tratamento de águas residuais como alúmen ou sulfato de alumínio | O alumínio é um elemento químico, metálico, encontrado na natureza em minerais, como a bauxita. É utilizado no tratamento de águas, na forma do composto sulfato de alumínio (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) ou | E. Roberts Alley - Water Quality Control Handbook. 2ª edição; J.D.LEE - Química inorgânica não tão concisa ; | Concentrações superiores a 1,5 mg / L constituem um perigo de toxicidade no ambiente marinho e níveis abaixo de 200 g / L representam um risco mínimo. | Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 23ª edição. | Suspeita-se que o alumínio contribua para a doença de Alzheimer.  | E. Roberts Alley - Water Quality Control Handbook. 2ª edição. |

Figura 1. Parâmetros da qualidade da água do Rio Grande do Sul, 2024.

O sistema de consulta de dados oferece funcionalidades avançadas para filtragem, permitindo a segmentação por tipo de água, classificação e uso. Adicionalmente, é possível realizar buscas específicas por município, curso hídrico ou bacia hidrográfica, condicionado à presença de dados no banco do sistema. Esses filtros aprimoram a análise e a acessibilidade das informações detalhadas sobre a qualidade da água, otimizando a obtenção de dados relevantes para avaliações técnicas e pesquisas especializadas.

Com o lançamento previsto para dezembro de 2024, o *site* tem a expectativa de aprimorar o monitoramento da qualidade da água e apoiar a educação básica. A plataforma visa promover a conscientização precoce sobre a importância da preservação dos corpos hídricos, dado que a degradação da qualidade da água pode resultar em doenças que afetam tanto a saúde pública quanto o equilíbrio ecológico. A integração de informações técnicas e educativas visa reforçar a necessidade de cuidados ambientais contínuos.

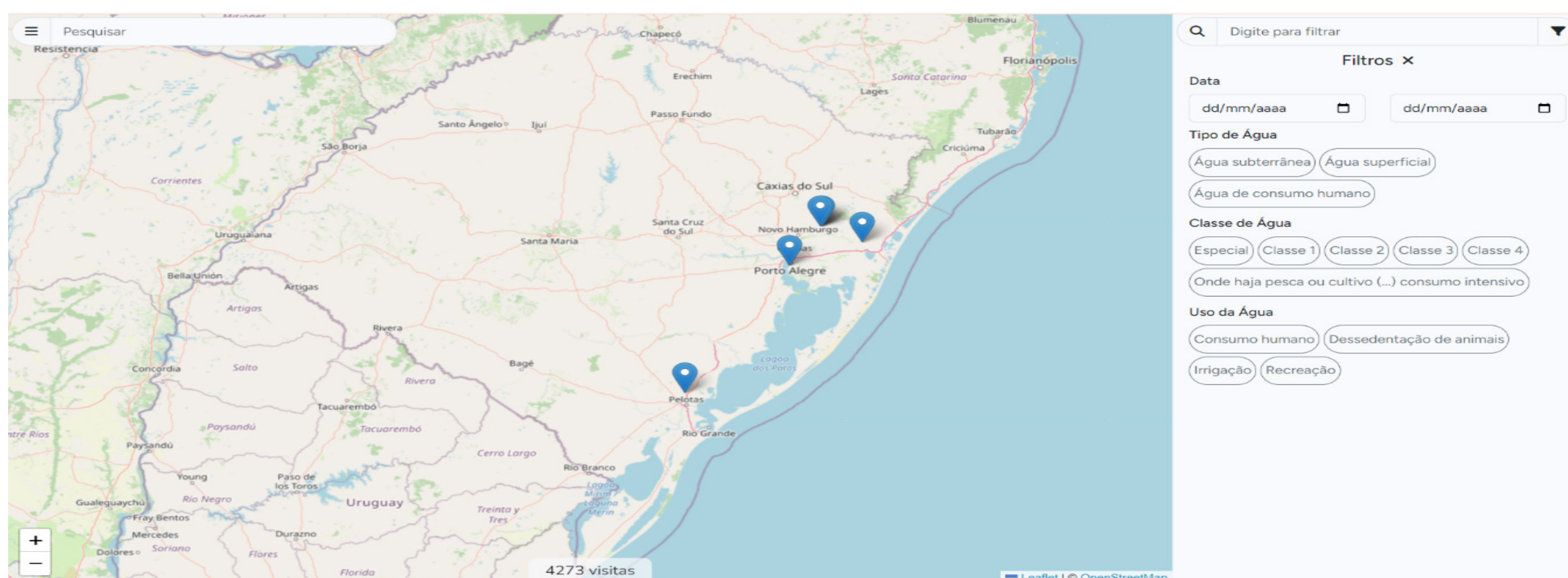


Figura 2. Interface do *site* “Qualidade das águas do Rio Grande do Sul”, Brasil, 2024

Além disso, o *software* proporciona suporte e fundamentação para futuras pesquisas sobre a qualidade da água, permitindo a avaliação de variações nos valores de parâmetros estabelecidos pela legislação vigente. A plataforma também possibilita a identificação de contaminantes emergentes que ainda não estão regulamentados. O *site* se destaca como uma ferramenta inovadora, com os testes preliminares realizados nos laboratórios de computação avançada do Departamento de Informática da UFFS tendo obtido resultados satisfatórios.

## 4 CONCLUSÕES

Com base nesses resultados, foi possível concluir que o *site* se configura como uma ferramenta valiosa para a comunidade científica e de educação básica, fornecendo dados atualizados sobre a qualidade da água e possibilitando a descoberta de novos contaminantes. Dessa forma, o *site* poderá servir como base para o desenvolvimento de novas pesquisas e a proposição de valores limites para substâncias ainda não regulamentadas. Esses resultados refletem o progresso alcançado conforme as etapas definidas na metodologia e oferecem uma visão clara do estado atual do projeto. A avaliação do impacto do *site* será realizada após seu lançamento, por meio da análise de métricas de uso, como o número de acessos, e do *feedback* dos usuários.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) o apoio financeiro e institucional prestado ao projeto, que foi fundamental para a realização desta pesquisa sobre a qualidade das águas subterrâneas, superficiais e de consumo humano no estado do Rio Grande do Sul. O projeto foi viabilizado pelo edital FAPERGS 10/2021 e possibilitou o desenvolvimento de análises preliminares que integram este trabalho, além de fomentar o avanço científico na área de monitoramento e gestão de recursos hídricos.

---

# ADVANCED MONITORING WITH FREE SOFTWARE: QUALITY OF SURFACE, UNDERGROUND AND HUMAN CONSUMPTION WATER IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL

**ABSTRACT:** Water quality is determined by physical, chemical and biological parameters that classify its safety for humans. This work aims to present an online system, freely accessible and easy to use, whose purpose is to report on water quality at specific locations and dates, explaining each parameter in an accessible way. Preliminary tests indicate that the system warns of the effects on health and the environment when quality standards are not met. To achieve these objectives, we compiled data from research, scientific papers and reports from public and private institutions, based on current legislation. The methodology focuses on creating a protocol for continuously entering data into the system, which will be updated as new information becomes available from Rio Grande do Sul's water resources institutions.

**Keywords:** Water Monitoring, Quality Parameters, Accessible Interface.

---

## REFERÊNCIAS

Agopian, A. J., Lupo, P. J., Canfield, M. A. & Langlois, P. H. (2013). Case-control study of maternal residential atrazine exposure and male genital malformations. *American Journal of Medical Genetics, Part A*, 161(5), 977-982.

Andrietti, G. et al. (2016). Índices de qualidade da água e de estado trófico do rio Caiabi, MT. *Revista Ambiente & Água*, 11, 162-175.

Aragão, A. A. V. de et al. (2012) *Avaliação do Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano no município de Buíque -Pernambuco*. Tese de Doutorado.

Belotti, L. et al. (2020). Vigilância da qualidade da água para consumo humano: potencialidades e limitações com relação à fluoretação segundo os trabalhadores. *Saúde em Debate*, 43, 51-62.

Bertol, O. J., De Azevedo, M. L. (2016). Manejo e conservação do solo e da água. *Alimentação saudável e sustentabilidade ambiental nas escolas do Paraná*, 19.

Bevilacqua, P. D. et al. (2014). Vigilância da qualidade da água para consumo humano no âmbito municipal: contornos, desafios e possibilidades. *Saúde e Sociedade*, 23, 467-483.

Brasil. (2023). *Diagnóstico Temático – Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral*. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Brasília. Recuperado de <https://www.snis.gov.br>.

Cartaxo, A. da S. B. et al. (2020). Contaminantes emergentes presentes em águas destinadas ao consumo humano: ocorrência, implicações e tecnologias de tratamento. *Brazilian Journal of development*, 6(8), 61814-61827.

Da Água, Portal do Tratamento. (2010). Qualidade da água.

Da Silva Malheiros, P. et al. (2009). Contaminação bacteriológica de águas subterrâneas da região oeste de Santa Catarina, Brasil. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, 68(2), 305-308.

De Almeida, O. A. (2010). *Qualidade da água de irrigação*. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura.

De Mello Luchini, A. (2000). Os desafios à implementação do sistema de gestão dos recursos hídricos estabelecido pela Lei nº 9.433/97. *Revista de Administração Pública*, 34(1), 123-143.

De Resende, A. V. (2002). *Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato*.

Fortes, A. C. C., Barrocas, P. R. G., Kligerman, D. C. (2020). A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso. *Saúde em Debate*, 43, 20-34.

Frazão, P., Peres, M. A. & Cury, J. A. (2011). Qualidade da água para consumo humano e concentração de fluoreto. *Revista de saúde pública*, 45, 964-973.

Grosseli, G. M. (2016). *Contaminantes emergentes em estações de tratamento de esgoto aeróbia e anaeróbia*.

Hídricos, Recursos. (2012). *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4*.

Leal, A. C. (2012). Planejamento ambiental de bacias hidrográficas como instrumento para o gerenciamento de recursos hídricos. *Entre-lugar*, 3(6), 65-84.

Leite, G. de S., Afonso, R. J. de C. F. & Aquino, S. F. de. (2010). Caracterização de contaminantes presentes em sistemas de tratamento de esgotos, por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas tandem em alta resolução. *Química nova*, 33, 734-738.

Libânio, P. A. C., Chernicharo, C. A. de L. & Nascimento, N. de O. (2005). A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10, 219-228.

Li, B. et al. (2019). Identificação de miRNA-7 como um regulador do eixo fator neurotrófico derivado do cérebro/ $\alpha$ -sinucleína na doença de Parkinson induzida por atrazina por perfil de microRNA de sangue periférico e cérebro. *Chemosphere*, 233, 542-548.

Lord, S. (2001). *A ética do uso da água doce: um levantamento*.

Maciel Filho, A. A. et al. (1997). Interfaces da gestão de recursos hídricos e saúde pública. *Interfaces da gestão de recursos hídricos. Desafios da lei de águas*, 396-420.

Pineda, M. D. & Schäfer, A. Adequação de critérios e métodos de avaliação da qualidade de águas superficiais baseada no estudo ecológico do rio Gravataí, Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência e Cultura*, 39, 198-206, 1987.

Pinhatti, A. L. (1998). *Aspectos conceituais da gestão de recursos hídricos e sua aplicação no caso das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, SP*. Tese de Doutorado. [sn].

Porto, M. F. A., Porto, R. L. L. (2008). Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos avançados*, 22, 43-60.

Rangecroft, S. et al. (19 jul. 2023). Unravelling and understanding local perceptions of water quality in the Santa basin, Peru. *Journal of Hydrology*.

Ross, J. L. S. & Del Prette, M. E. (1998). Recursos hídricos e as bacias hidrográficas: âncoras do planejamento e gestão ambiental. *Revista do Departamento de Geografia*, 12, 89-121.

Santos, C. M. (2015). *Uso de cascas de laranja como adsorvente de contaminantes no tratamento de água*.

Siqueira, S. L. de & Kruse, M. H. L. (2008). Agrotóxicos e saúde humana: contribuição dos profissionais do campo da saúde. *Revista da Escola de Enfermagem da USP*, 42, 584-590.

Silva, J. C. da. (2011). *Análise da cobertura e qualidade da água para consumo humano e sua associação com o índice de desenvolvimento humano (IDH) em municípios do Rio Grande do Sul, no período de 2007 a 2010*.

Stayner, L. T., Almberg, K., Jones, R., Graber, J., Pedersen, M. & Turyk, M. (jan. 2017). Atrazine and nitrate in drinking water and the risk of preterm delivery and low birth weight in four Midwestern states. *Environmental Research*, 152, 294-303.

Tundisi, J. G. (2006). Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. *Revista USP*, 70, 24-35.

Tundisi, J. G. (2008). Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *Estudos avançados*, 22, 7-16.

Xavier, A. L. dos S. & Ronca, J. L. C. (2007). *A contribuição dos Comitês da Bacia Estadual e Federal à gestão das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, em São Paulo: ações mais relevantes, perspectivas e desafios (1993-2006)*.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# PANORAMA DOS REGISTROS DE FERTILIZANTES MINERAIS, ORGÂNICOS E BIOFERTILIZANTES NAS DISTINTAS REGIÕES DO BRASIL

*Anderson Moraes da Silva<sup>\*1</sup>, Annette Droste<sup>2</sup>*

---

1 Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental, Universidade Feevale, CEP 93525-07, Novo Hamburgo/RS, Brasil.

2 Doutora em Genética e Biologia Molecular, professora no Programa de Pós-Graduação em Ambiental, Universidade Feevale, CEP 93525-07, Novo Hamburgo/RS, Brasil.

\*E-mail: andersonmoraes522@gmail.com



# RESUMO

Com o aumento da população mundial, a necessidade da expansão de colheitas é crucial para garantir a segurança alimentar e, para isso, é fundamental o uso de insumos, como os fertilizantes. O Brasil é o quarto consumidor de fertilizantes em nível global e importa cerca de 80% da quantidade de fertilizantes usados na agricultura. Com isso, a economia nacional fica vulnerável às mudanças do mercado externo. Diante disso, o objetivo desse estudo foi construir um panorama da diversidade de fertilizantes minerais, orgânicos e biofertilizantes nacionais e importados registrados nas distintas regiões do Brasil, visando a identificar o *status* do cenário nacional na busca de soluções baseadas na natureza, eficientes e sustentáveis para a agricultura do país. Foram consultados os registros disponíveis no Ministério da Agricultura e Pecuária, no qual observa-se que o Brasil possui 75.019 fertilizantes minerais nacionais e 5.990 fertilizantes minerais importados. Embora exista grande variedade de produtos, a produção em larga escala é insuficiente para abastecer o mercado interno e isso pode ocorrer devido às limitações de reservas naturais dos elementos de nitrogênio, fósforo e potássio no território brasileiro. Além disso, questões tributárias e logísticas também podem contribuir para o cenário atual. Como alternativa ao uso de fertilizantes minerais, os fertilizantes orgânicos surgem como uma opção mais sustentável e, no Brasil, existem 12.012 fertilizantes orgânicos nacionais e 869 fertilizantes orgânicos importados. Os benefícios dos fertilizantes orgânicos já são bem conhecidos por aumentar as colheitas de diversas culturas de interesse econômico e por favorecer a atividade dos microrganismos do solo. No entanto, em comparação aos fertilizantes minerais, os fertilizantes orgânicos apresentam baixas concentrações de nutrientes. Outra alternativa sustentável que contribui para a redução do consumo de fertilizantes minerais são os biofertilizantes, que ainda possuem um número restrito de registros reconhecidos no Brasil, sendo 15 biofertilizantes nacionais e apenas três biofertilizantes importados. Portanto, há necessidade da produção de novos produtos de alta qualidade e com preço competitivo para viabilizar a redução do uso de fertilizantes minerais e contribuir para o Brasil produzir alimentos de forma mais sustentável, garantindo a segurança alimentar e tornando-se referência global em agricultura sustentável.

**Palavras-chave:** Insumos agrícolas. Agricultura sustentável. Segurança alimentar. Desenvolvimento econômico.

# 1 INTRODUÇÃO

Há estimativas de que a população mundial aumentará para 9,7 bilhões até 2050 (ONU, 2022), o que torna necessário o aumento da produção de alimentos para garantir a segurança alimentar e, para isso, o setor agrícola faz uso de diferentes tecnologias, entre elas o uso de insumos químicos e biológicos, como os fertilizantes (Ogino et al., 2021).

Atualmente, o Brasil é consumidor de cerca de 8% da produção de fertilizantes em nível global, ocupando a quarta posição de consumo, sucedendo a China, a Índia e os Estados Unidos. As culturas de maior destaque no uso de fertilizantes no país são a soja, o milho e a cana-de-açúcar, responsáveis por 73% do consumo. Porém, a produção interna de fertilizantes tem sido insuficiente para suprir a necessidade agrícola do país, sendo necessária a importação de mais de 80% do total de consumo, deixando o Brasil com alta dependência do mercado externo, dominado por poucos fornecedores (Brasil, 2022). Essa subordinação deixa a economia brasileira, que é fortemente apoiada no agronegócio, vulnerável às oscilações do mercado internacional de fertilizantes (Ogino et al., 2021; Brasil, 2022).

Diante disso, foi criado o Plano Nacional dos Fertilizantes (PNF) (Brasil, 2022) cujo objetivo é aumentar a autonomia brasileira por meio do desenvolvimento de tecnologias, produtos e processos inovadores, com matéria-prima local, de forma sustentável e considerando as peculiaridades do clima tropical e subtropical. Destacam-se as diretrizes do PNF: (a) “possibilitar a competição de diferentes fontes e origens de matérias-primas, fertilizantes e nutrientes a serem ofertados à agropecuária nacional...”; (b) “estimular e promover a capacitação de recursos humanos para atuar nas áreas de pesquisa, desenvolvimento, mineração, produção, transformação e outras relacionadas à nutrição de plantas, contribuindo com a competitividade do Brasil no setor”; (c) “difundir e estimular a adoção de boas práticas de produção de fertilizantes e boas práticas agropecuárias na exploração sustentável do ecossistema e menor impacto ambiental, diversificando e promovendo o desenvolvimento de novas fontes de nutrientes para a agropecuária” (Brasil, 2022).

Entre os diferentes tipos de fertilizantes, estão os minerais, os orgânicos e os biofertilizantes. Os fertilizantes minerais são “produtos de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintética, obtidos por processo físico, químico ou físico-químico, fornecedores de um ou mais nutrientes de plantas” (Brasil, 2020a). Os fertilizantes orgânicos são “produtos de natureza fundamentalmente orgânica, obtidos por processo

físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecidos ou não de nutrientes minerais” (Brasil, 2020a). Os biofertilizantes são “produtos que contêm princípio ativo ou agente orgânico, isentos de substâncias agrotóxicas, capazes de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade, sem ter em conta o seu valor hormonal ou estimulante” (Brasil, 2020a).

O objetivo do estudo foi construir um panorama da diversidade de fertilizantes minerais, orgânicos e biofertilizantes nacionais e importados registrados nas distintas regiões do Brasil, visando a identificar o *status* do cenário nacional na busca de soluções baseadas na natureza, eficientes e sustentáveis para a agricultura do país.

## 2 METODOLOGIA

Foram consultados os dados disponíveis no Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) (Brasil, 2024) sobre os fertilizantes minerais, orgânicos e biofertilizantes, considerando a atividade de importador e produtor, aqui denominados como produtos importados e nacionais. Não foram incluídas as características adicionais. Foram considerados os produtos registrados até o dia 30 de setembro de 2024 (Fig. 1).

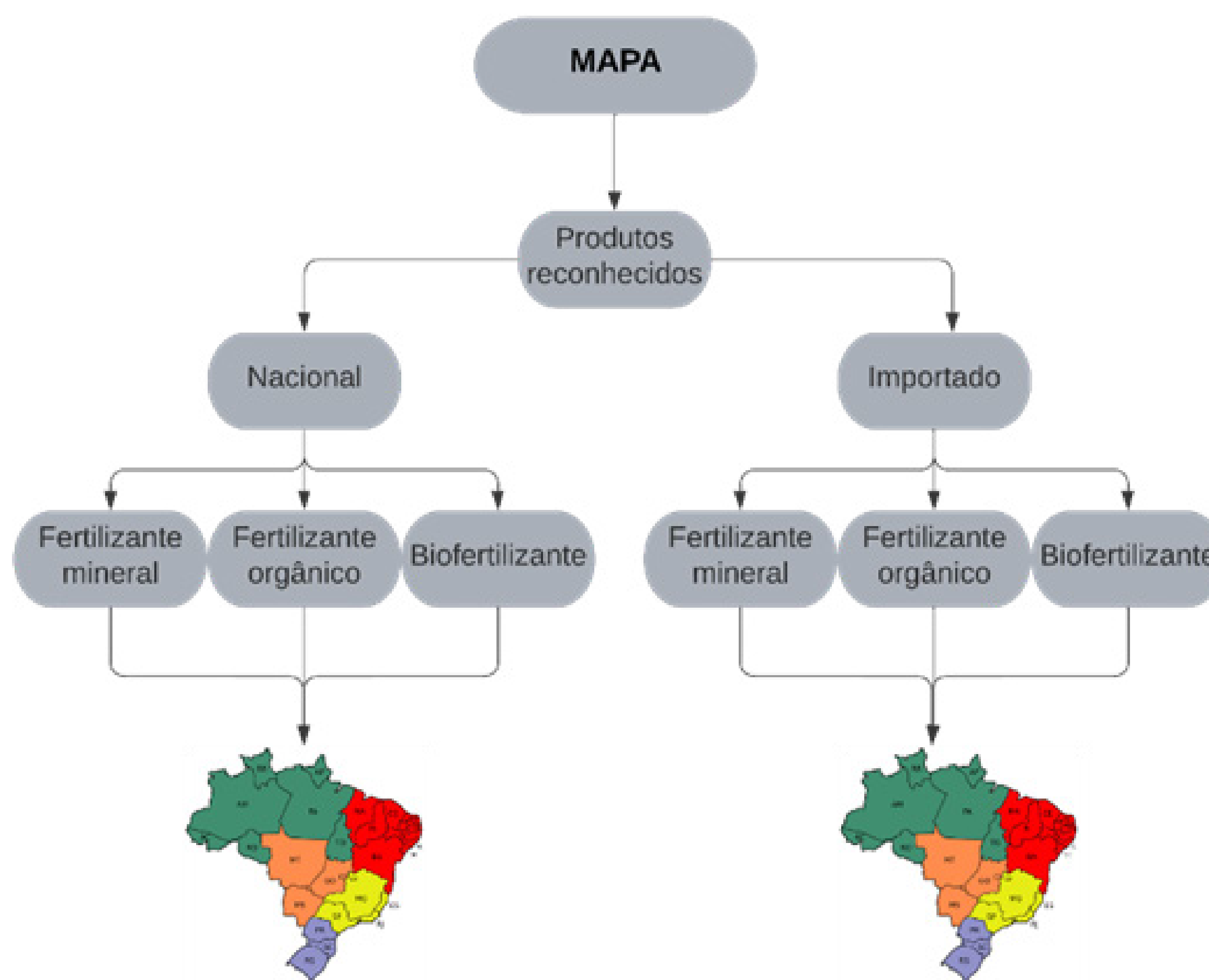


Figura 1. Fluxograma da metodologia do estudo. Fonte: Autores, 2024.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Brasil, existem 75.019 fertilizantes minerais nacionais (FMN) registrados, sendo a maioria reconhecida nas regiões Sudeste (33.161), Sul (18.933) e Centro-Oeste (15.491). Os fertilizantes minerais importados (FMI) somam 5.990 produtos, com 2.709 no Sudeste, 1.395 no Sul e 728 no Centro-Oeste (Fig. 2).

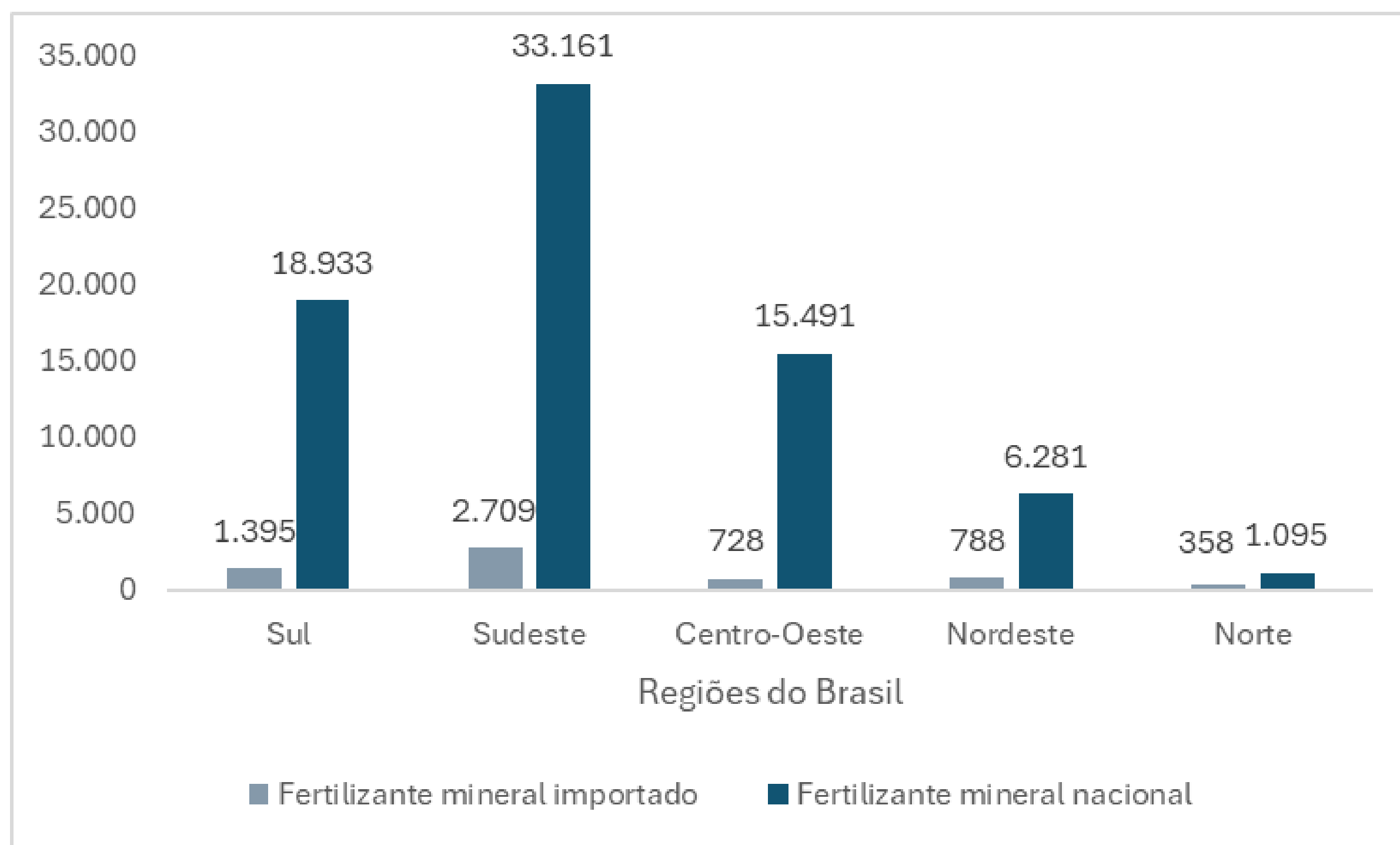
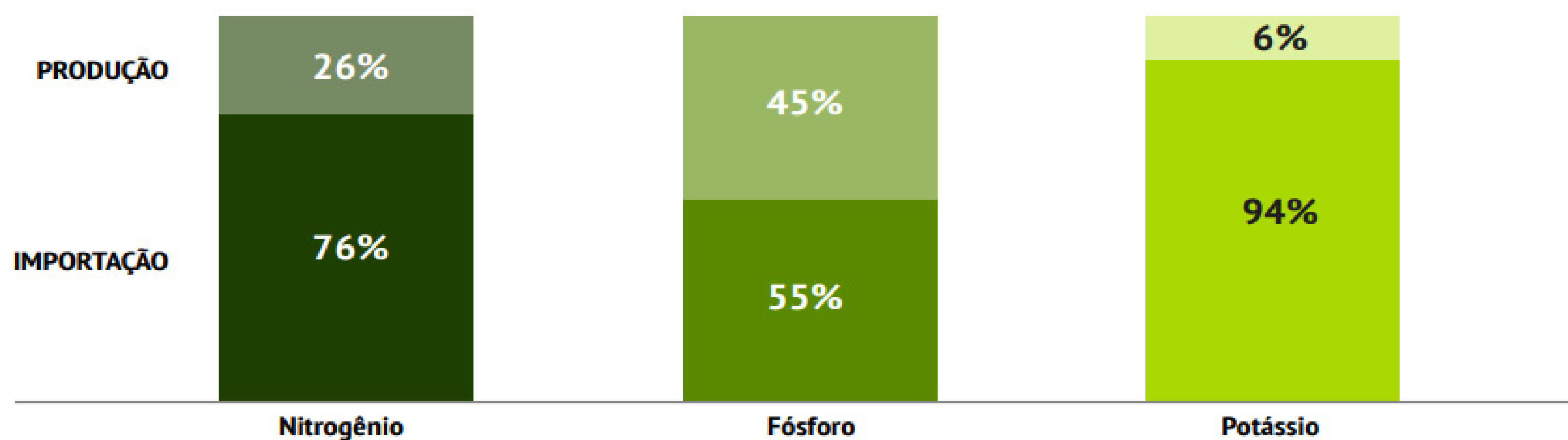


Figura 2. Fertilizantes minerais registrados no MAPA até 30 de setembro de 2024. Fonte: Autores, 2024.

Considerando as cinco regiões brasileiras, é notório o expressivo número de FMN reconhecidos pelo MAPA. No entanto, um dos maiores desafios é manter o mercado nacional estável na produção em larga escala de fertilizantes minerais, considerando que o Brasil é restrito em fontes naturais de nitrogênio, fósforo e potássio (Fig. 3). Além disso, existem gargalos para a redução da dependência da importação de fertilizantes, como dificuldades logísticas, questões tributárias, defasagem tecnológica e concentração de mercado (Brasil, 2020).



Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Figura 3. Disponibilidade comercial dos elementos nitrogênio, fósforo e potássio no Brasil. Fonte: Brasil, 2020b.

Historicamente, os fertilizantes minerais têm sido usados em grande escala para aumentar a produtividade das colheitas, aumentando a biomassa da parte aérea e das raízes de culturas economicamente importantes (Belford; Klepper; Rickman, 1987; Geisseler; Lazicki; Scow, 2016; Silva et al., 2019; Velimirovic; Jovovic; Przulj, 2021). No entanto, o seu uso desenfreado pode causar impactos negativos ao meio ambiente, como alteração na comunidade microbiana (Keyhani et al., 2024), redução da matéria orgânica que contribui para deterioração física e química dos solos (Koković et al., 2022) e poluição das águas (Rivers et al., 1996). Além disso, os fertilizantes minerais dependem de recursos não renováveis (Ulrich; Frossard, 2014). Os sistemas de produção de alimentos contribuem de maneira significativa para a emissão de gases de efeito estufa (Yoro; Daramola, 2020). Diante disso, questiona-se sobre o alto consumo de fertilizantes minerais que 1) prejudicam os recursos naturais, 2) apresentam alto custo de produção, 3) demandam recursos não renováveis e 4) possuem alta dependência do mercado externo.

A implementação de práticas sustentáveis na agricultura é fundamental e, por isso, tem-se observado o aumento no uso de adubos orgânicos, que são valorizados pelos reconhecidos benefícios no aumento da produtividade de diversas culturas agrícolas, influenciados pela melhoria das características químicas, físicas e biológicas do solo (Borges, 2021). Além disso, o uso de adubos orgânicos é uma alternativa para a redução do consumo de fertilizantes minerais e da dependência do mercado estrangeiro (Brasil, 2022).

No Brasil, existem 12.012 fertilizantes orgânicos nacionais (FON) registrados no MAPA, sendo as regiões Sudeste e Sul as líderes no número de registros, com 8.149 e 2.998 produtos, respectivamente. Os fertilizantes orgânicos importados (FOI) somam 869 produtos, os quais possuem maior número de registros nas regiões Sudeste e Sul, com 601 e 152 produtos, respectivamente (Fig.4).

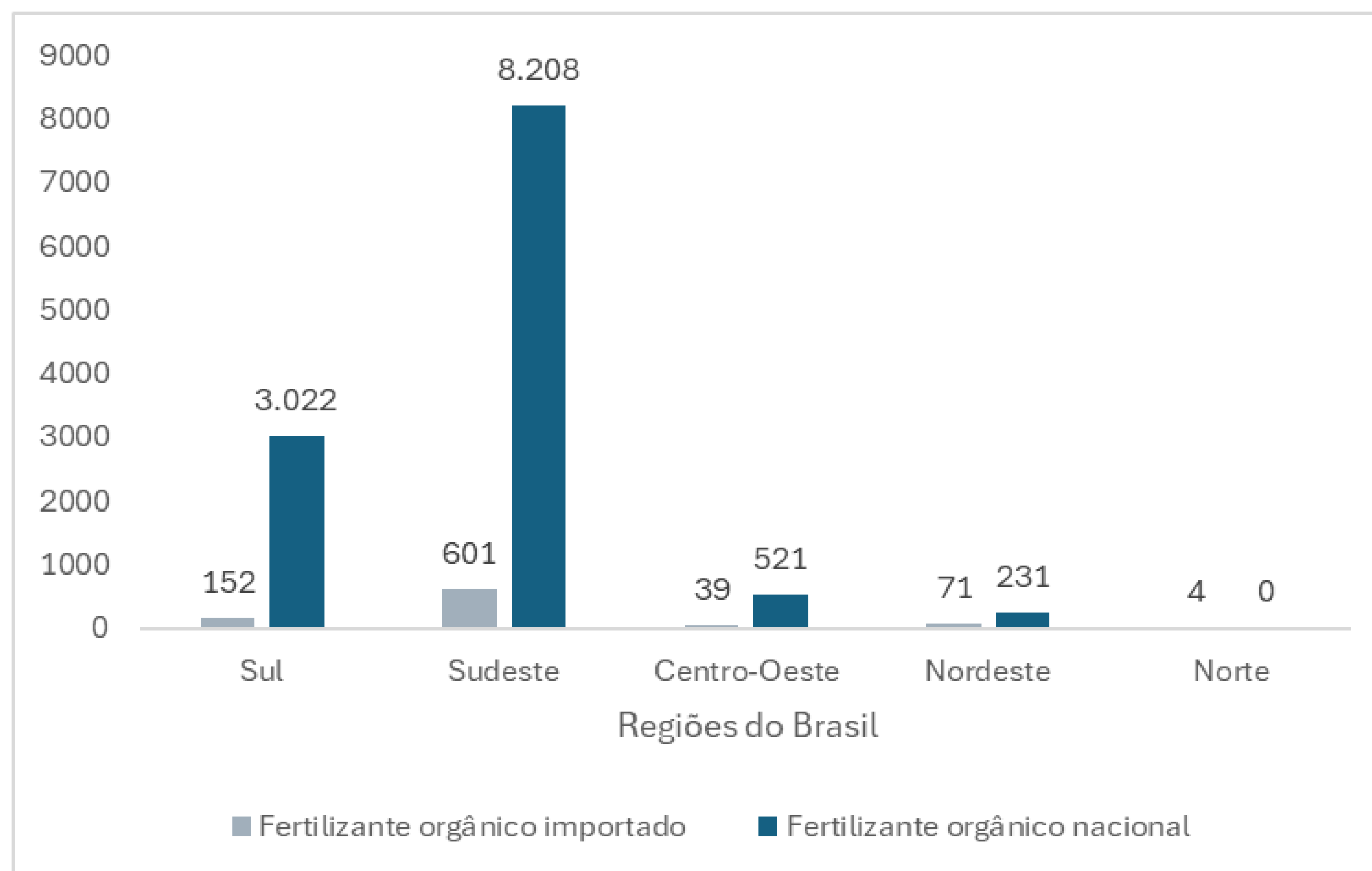


Figura 4. Fertilizantes orgânicos registrados no MAPA até 30 de setembro de 2024. Fonte: Autores, 2024.

São conhecidos os benefícios do uso de fertilizantes orgânicos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Liang et al., 2022; He et al., 2023), melhorar as propriedades físico-químicas do solo (Bronick & Lal, 2005; Aluoch et al., 2022), aumentar o teor de nutrientes do solo e melhorar a diversidade da comunidade microbiana, aumentando os microrganismos benéficos do solo e reduzindo a abundância de microrganismos nocivos (Gu et al., 2019; Han, Dong & Zhang, 2021; Li et al., 2022; Pu et al., 2022). Estes compostos aumentam a eficiência do uso de nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Wang et al., 2017), contribuindo para a produtividade de culturas agrícolas (Chen et al., 2021), na horticultura, em culturas como *Fragaria ananassa* (Li et al., 2022; ), *Solanum lycopersicum* (Canfora et al., 2015), *Spinacia oleracea* (Vico et al., 2020), na fruticultura, em *Ananas comosus* (Liang et al., 2022; Cai et al., 2023; Jin et al., 2023) e em plantas ornamentais como *Anthurium andreanum* (Chang et al., 2010), *Calendula officinalis* (Shaabani et al., 2022), *Helianthus annuus* (Cheng et al., 2023), *Rosa centifolia* (Noh; Azhari; Mohamad, 2015).

Portanto, há grande diversidade de produtos fertilizantes orgânicos no mercado nacional e os seus benefícios já são amplamente conhecidos. No entanto, os fertilizantes orgânicos quando comparados com os fertilizantes minerais apresentam menores teores de nutrientes e a sua disponibilização para as plantas ocorre gradualmente. Contudo, essa característica assegura maior disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo e podem ser aproveitados de maneira mais eficiente pela planta (Borges, 2021). Além disso, deve-se considerar que a produção de fertilizantes orgânicos é uma possibilidade para o reaproveitamento de resíduos orgânicos que, quando descartados irregularmente,

impactam o ambiente e causam riscos à biota e à saúde humana (Batista et al., 2019). Os fertilizantes orgânicos são importantes para a Economia Circular que se baseia em três princípios principais: (a) “eliminação de resíduos e poluição”, (b) “circulação de produtos e materiais em sua forma de maior valor” e (c) “regeneração do ambiente natural” (Papamichael et al., 2023).

Os biofertilizantes também são uma alternativa sustentável para a agricultura, reduzindo o uso de fertilizantes minerais (Olanrewaju, Glick & Babalola, 2017). No Brasil, existe um número bem menor de registros de biofertilizantes se comparados com os registros de fertilizantes orgânicos (Fig. 3 e Fig. 4). Ao todo, são 15 biofertilizantes nacionais (BN) e apenas três biofertilizantes importados (BI). O maior número de registros de BN está nas regiões Sudeste e Sul, com 11 e três produtos, respectivamente. Já os BI possuem um registro em cada uma das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Fig. 4).

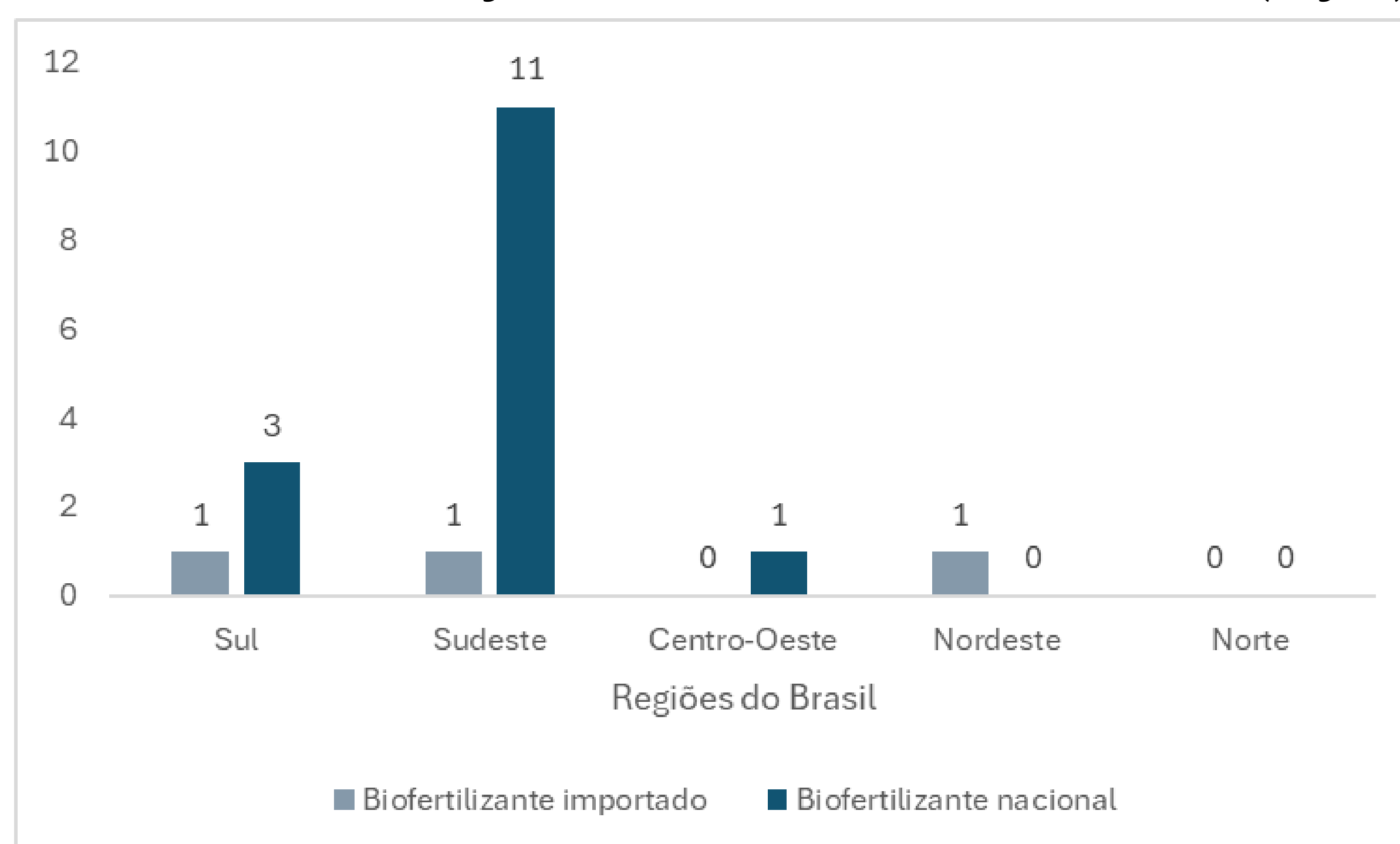


Figura 5. Biofertilizantes registrados no MAPA até 30 de setembro de 2024. Fonte: Autores, 2024.

Os biofertilizantes desempenham um papel importante na nutrição, crescimento e produtividade de plantas, contribuindo para a redução de estresses abióticos e favorecendo os microrganismos do solo, além de contribuírem contra o ataque de patógenos (García-Fraile, Menéndez & Rivas, 2015; Fu et al., 2017; Bomfim et al., 2021; Mahmud et al., 2021; Zhu et al., 2022; Wei et al., 2023; Zhao et al., 2024). Os biofertilizantes apresentam-se como uma alternativa adequada para a diminuição do uso dos fertilizantes minerais, podendo ser utilizados de maneira exclusiva ou em consórcio e, nesse caso, sendo possível o aumento do rendimento das colheitas em 10-40% e substituir em torno de 25-30% dos fertilizantes minerais (Pal et al., 2015).

No mercado nacional, ainda existe um número restrito de biofertilizantes e, portanto, há necessidade da fabricação desses produtos com alta qualidade e custo competitivo com fertilizantes minerais para garantir a sustentabilidade do mercado, com vistas à redução da aplicação de fertilizantes minerais. Os biofertilizantes contribuem para a promoção da agricultura sustentável que foi reconhecida pela Organização das Nações Unidas como crucial para alcançar os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), podendo desempenhar um papel importante no alcance dos ODS, incluindo o ODS 1 (Erradicação da Pobreza), ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis), ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ODS 14 (Vida na Água) e ODS 15 (Vida Terrestre) (Organização das Nações Unidas, 2015).

Diante do exposto, o uso de fertilizantes é de extrema importância para garantir o aumento da produtividade e a segurança alimentar. Por isso, a adoção de boas práticas para uso eficiente de fertilizantes considera a aplicação na fonte certa, na dose certa, no lugar certo e na época certa (4Cs). A escolha da fonte certa de nutrientes pode influenciar na eficiência da absorção pelas plantas, diminuindo possíveis perdas ao meio ambiente. O uso da dose certa é fundamental para evitar desequilíbrio nutricional e prejuízos econômicos, assim como a época certa é crucial para disponibilizar nutrientes às plantas nos períodos de maior exigência nutricional. O local certo também deve ser considerado, com vistas ao uso eficiente de nutrientes adicionados ao solo. Portanto, a disponibilidade de nutrientes de acordo com as necessidades das culturas otimiza a eficiência dos fertilizantes, maximiza a produção e reduz os possíveis impactos ao meio ambiente (Borges, 2021).

## 4 CONCLUSÕES

No Brasil, existe uma grande variedade de fertilizantes minerais disponíveis no mercado. No entanto, a produção em grande escala manifesta-se como um dos maiores desafios para o abastecimento do mercado interno, em decorrência de fatores como a limitação de reservas naturais dos elementos nitrogênio, fósforo e potássio, assim como as questões logísticas e tributárias. Além disso, os impactos causados ao meio ambiente em decorrência da alta aplicação de fertilizantes minerais devem ser considerados, com vistas à agricultura sustentável.

Embora exista grande variedade de produtos fertilizantes orgânicos no mercado nacional e com benefícios amplamente reconhecidos no aumento das colheitas de



culturas economicamente importantes, a produção em larga escala e com preços competitivos com os fertilizantes minerais ainda limita a ampla aplicação desses produtos. Os registros de biofertilizantes ainda são restritos no mercado nacional, embora a sua eficiência agrônômica já tenha sido comprovada em diversas cultivares, além dos benefícios ao meio ambiente. Por isso, deve-se considerar a ampliação desse mercado com produtos de alta qualidade e valor econômico competitivo.

## AGRADECIMENTOS

Universidade Feevale, Universidade de Santa Cruz do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, IV Seminário Sul de Inovações em Tecnologias Ambientais.

---

## OVERVIEW OF THE REGISTRATION OF MINERAL FERTILIZERS, ORGANIC FERTILIZERS, AND BIOFERTILIZERS IN DIFFERENT REGIONS OF BRAZIL

**ABSTRACT:** With the increasing global population, the need to expand crop production is crucial to ensure food security, and for this, the use of inputs such as fertilizers is essential. Brazil is the fourth-largest consumer of fertilizers globally and imports about 80% of the fertilizers used in agriculture. As a result, the national economy becomes vulnerable to external market changes. In light of this, the objective of this study was to provide an overview of the diversity of national and imported mineral fertilizers, organic fertilizers, and biofertilizers registered in the different regions of Brazil, in order to identify the current status of the national scenario in the search for nature-based, efficient, and sustainable solutions for the country's agriculture. Data from the Ministry of Agriculture and Livestock were consulted, revealing that Brazil has 75,019 registered national mineral fertilizers and 5,990 imported mineral fertilizers. Although there is a wide variety of products, large-scale production is insufficient to supply the domestic market, which may be due to limitations in natural reserves of nitrogen, phosphorus, and potassium within Brazilian territory. In addition, tax and logistical issues may also contribute to the current scenario. As an alternative to the use of mineral fertilizers, organic fertilizers have emerged as a more sustainable option and, in Brazil, there are

12,012 national organic fertilizers and 869 imported organic fertilizers. The benefits of organic fertilizers are already well known, as they increase yields of various crops of economic interest and promote the activity of soil microorganisms. However, compared to mineral fertilizers, organic fertilizers have lower nutrient concentrations. Another sustainable alternative that helps reducing the consumption of mineral fertilizers are biofertilizers, which still have a limited number of recognized registrations in Brazil, with only 15 national biofertilizers and three imported biofertilizers. There is therefore a need to produce new high-quality products at a competitive price in order to reduce the use of mineral fertilizers and help Brazil produce food in a more sustainable way, ensuring food security and becoming a global benchmark in sustainable agriculture.

**Keywords:** Agricultural inputs, sustainable agriculture, food security, economic development.

---

## REFERÊNCIAS

Aluoch, S. O., Li, Z., Li, X., Hu, C., Mburu, D. M., Yang, J., Xu, Q., Yang, Y. & Su, H. (2022). Effect of mineral N fertilizer and organic input on maize yield and soil water content for assessing optimal N and irrigation rates in Central Kenya. *Field Crops Research*, 277, 108420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108420>.

Batista, G. S., Silva, J. L., Rocha, D. N. S., Souza, A. R. E., Araujo, J. F. & Mesquita, A. C. (2019). Crescimento inicial do meloeiro em função da aplicação de biofertilizantes no cultivo orgânico. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, 9(2), 01-09. <http://dx.doi.org/10.21206/rbas.v9i2.3072>.

Belford, R. K., Klepper, B. & Rickman, R. W. (mar. 1987). Studies of Intact Shoot-Root Systems of Field-Grown Winter Wheat. II. Root and Shoot Developmental Patterns as Related to Nitrogen Fertilizer<sup>1</sup>. *Agronomy Journal*, 79(2), 310-319. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900020027x>.

Bomfim, C. A., Coelho, L. G. F., Vale, H. M. M., Mendes, I. C., Megías, M., Ollero, F. J. & Reis Junior, F. (2021). Brief history of biofertilizers in Brazil: from conventional approaches to new biotechnological solutions. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(4), 2215-2232. <http://dx.doi.org/10.1007/s42770-021-00618-9>.

Borges, A. L. (ed). (2021). *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. 2 ed. Brasília, DF. Embrapa Mandioca e Fruticultura.

Brasil, 2020a. *Instrução normativa nº 61, de 8 de julho de 2020* – DOU – Imprensa Nacional.

Brasil, 2020b. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. *Produção Nacional de Fertilizantes*. Recuperado de [https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae\\_publicacao\\_fertilizantes\\_v10.pdf](https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf).

Brasil, 2022. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Plano Nacional de Fertilizantes*. Recuperado de <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/o-plano-nacional-de-fertilizantes>.

Brasil, 2024. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Sipeagro – Fertilizantes*. Recuperado de <https://mapaindicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Fertilizantes/Fertilizantes.html>.

Bronick, C. J. & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.

Cai, J., Cheng, W., Liang, Z., Li, C., Deng, Y., Yin, T. & Li, C. (2023). Organic and slow-release fertilizer substitution strategies improved the sustainability of pineapple production systems in the Tropics. *Sustainability*, 15(13), 10353. <http://dx.doi.org/10.3390/su151310353>.

Canfora, L., Malusà, E., Salvati, L., Renzi, G., Petrarulo, M. & Benedetti, A. (2015). Short-term impact of two liquid organic fertilizers on *Solanum lycopersicum* L. rhizosphere Eubacteria and Archaea diversity. *Applied Soil Ecology*, 88, 50-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.017>.

Chang, K. H., Wu, R. Y., Chuang, K. C., Hsieh, T. F. & Chung, R. S. (2010). Effects of chemical and organic fertilizers on the growth, flower quality and nutrient uptake of *Anthurium andreaeanum*, cultivated for cut flower production. *Scientia Horticulturae*, 125(3), 434-441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2010.04.011>.

Chen, M., Zhang, S., Liu, L., Wu, L. & Ding, X. (2021). Combined organic amendments and mineral fertilizer application increase rice yield by improving soil structure, availability and root growth in saline-alkaline soil. *Soil and Tillage Research*, 212, 01–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2021.105060>.

Cheng, Y., Luo, M., Zhang, T., Yan, S., Wang, C., Dong, Q., Feng, H., Zhang, T. & Kisekka, I. (2023). Organic substitution improves soil structure and water and nitrogen status to promote sunflower (*Helianthus annuus* L.) growth in an arid saline area. *Agricultural Water Management*, 283, 01–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108320>.

Fu, L., Penton, C. R., Ruan, Y., Shen, Z., Xue, C., Li, R. & Shen, Q. (jan. 2017). Inducing the rhizosphere microbiome by biofertilizer application to suppress banana Fusarium wilt disease. *Soil Biology and Biochemistry*, 104, 39–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.10.008>.

García-Fraile, P., Menéndez, E. & Rivas, R. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *AIMS Bioengineering*, 2(3), 183–205. <http://dx.doi.org/10.3934/bioeng.2015.3.183>.

Geisseler, D., Lazicki, P. A. & Scow, K. M. Mineral nitrogen input decreases microbial biomass in soils under grasslands but not annual crops. *Applied Soil Ecology*, 106, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.04.015>.

Gu, S., Hu, Q., Cheng, Y., Bai, L., Liu, Z., Xiao, W., Gong, Z., Wu, Y., Feng, K. & Deng, Y. (2019). Application of organic fertilizer improves microbial community diversity and alters microbial network structure in tea (*Camellia sinensis*) plantation soils. *Soil and Tillage Research*, 195, 104356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104356>.

Han, J., Dong, Y. & Zhang, M. (2021). Chemical fertilizer reduction with organic fertilizer effectively improve soil fertility and microbial community from newly cultivated land in the Loess Plateau of China. *Applied Soil Ecology*, 165, 01–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103966>.

He, Z., Ding, B., Pei, S., Cao, H., Liang, J. & Li, Z. (2023). The impact of organic fertilizer replacement on greenhouse gas emissions and its influencing factors. *Science of the Total Environment*, 905, 01–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166917>.

Jin, X., Cai, J., Yang, S., Li, S., Shao, X., Fu, C., Li, C., Deng, Y., Huang, J. & Ruan, Y. (2023). Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer and slow-release fertilizer benefits soil microbial diversity and pineapple fruit yield in the tropics. *Applied Soil Ecology*, 189, 01–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104974>.

Keyhani, A. B., He, W., Teng, M., Yan, Z., Ma, Z., Xu, J., Fayaz, M., Zhou, C., Wei, P. & Wang, P. (2024). Effect of mineral fertilizers on microorganisms community characteristic during leaf litter decomposition under *Pinus massoniana* in a subtropical forest. *Applied Soil Ecology*, v. 199, p. 01–10, 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105421>.

Koković, N., Jačimović, G., Sikirić, B., Čirić, V., Ugrenović, V., Zhapparova, A. & Saljnikov, E. (2022). Changes in Eutric Cambisol due to long-term mineral fertilisation: a case study in Serbia. *Italian Journal of Agronomy*, 17(2), 01–10. <http://dx.doi.org/10.4081/ija.2022.2029>.

Li, Q., Zhang, D., Song, Z., Ren, L., Jin, X., Fang, W., Yan, D., Li, Y., Wang, Q. & Cao, A. (2022). Organic fertilizer activates soil beneficial microorganisms to promote strawberry growth and soil health after fumigation. *Environmental Pollution*, 295, 01–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118653>.

Liang, Z., Jin, X., Zhai, P., Zhao, Y., Cai, J., Li, S., Yang, S., Li, C. & Li, C. (2022). Combination of organic fertilizer and slow-release fertilizer increases pineapple yields, agronomic efficiency and reduces greenhouse gas emissions under reduced fertilization conditions in tropical areas. *Journal of Cleaner Production*, 343, 01–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131054>.

Mahmud, A. A., Upadhyay, S. K., Srivastava, A. K. & Bhojiya, A. A. (2021). Biofertilizers: a nexus between soil fertility and crop productivity under abiotic stress. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 01–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100063>.

ONU – Organização das Nações Unidas. (2015). *Os 17 objetivos: desenvolvimento sustentável*; Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas: Nova York, NY, EUA.

ONU – Organização das Nações Unidas (2022). *Perspectivas da População Mundial 2022: resumo dos resultados, artigos estatísticos* – Nações Unidas. Relatório de População e Estatísticas Vitais. Nações Unidas. Recuperado de <https://doi-org.ez310.periodicos.capes.gov.br/10.18356/9789210014380>.

Noh, N. M., Azhari, N. A. & Mohamad, S. N. M. (2015). Rosa Bitamina (organic fertilizer) effects in enhancing *Rosa centifolia* resistancy and flowering process. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 195, 1715–1718. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.282>.

Ogino, C. M., Costa Junior, G., Popova, N. D. & Martines Filho, J. G. (2021). Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o centro-oeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 59(1), 1–19. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9479.2021.220367>.

Olanrewaju, O. S., Glick, B. R. & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 01–16. <http://dx.doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>.

Pal, S., Singh, H. B., Farooqui, A. & Rakshit, A. (2015). Fungal biofertilizers in Indian agriculture: perception, demand and promotion. *Journal of Eco-friendly Agriculture*, 10(2), 101–113.

Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., Stylianou, M., Economou, F., Vardopoulos, I., Klontza, E. E., Lekkas, D. F. & Zorpas, A. A. (2023). Measuring Circularity: tools for monitoring a smooth transition to circular economy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 36, 01–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2023.101330>.

Pu, R., Wang, P., Guo, L., Li, M., Cui, X., Wang, C., Liu, Y. & Yang, Y. (2022). The remediation effects of microbial organic fertilizer on soil microorganisms after chloropicrin fumigation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 01–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113188>.

Rivers, C. N., Barrett, M. H., Hiscock, K. M., Dennis, P. F., Feast, N. A. & Lerner, D. N. (1996). Use Of Nitrogen Isotopes To Identify Nitrogen Contamination Of The Sherwood Sandstone Aquifer Beneath The City Of Nottingham, United Kingdom. *Hydrogeology Journal*, 4(1), 90–102. <http://dx.doi.org/10.1007/s100400050099>.

Shaabani, M., Iriti, M., Mortazavi, S. N., Amirmohammadi, F. Z. & Zamanian, K. (2022). The effects of two organic fertilizers on morpho-physiological traits of Marigold (*Calendula officinalis* L.). *South African Journal of Botany*, 148, 330–335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2022.04.035>.

Silva, C. F., Moura, M. F., Vilela, Á. R. R., Arađjo, M. B. & Marques, J. D. S. (2019). Produção de feijão-caupi em função do emprego de inoculante e adubos orgânicos e mineral. *Diversitas Journal*, 4(3), 1130–1145. <http://dx.doi.org/10.17648/diversitas-journal-v4i3.832>.

Ulrich, A. E. & Frossard, E. (2014). On the history of a reoccurring concept: phosphorus scarcity. *Science of the Total Environment*, 490, 694–707. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.050>.

Velimirovic, A., Jovovic, Z. & Przulj, N. (2021). From neolithic to late modern period: brief history of wheat. *Genetika*, 53(1), 407–417. <http://dx.doi.org/10.2298/gensr2101407v>.

Vico, A., Sáez, J. A., Pérez-Murcia, M. D., Martínez-Tomé, J., Andreu-Rodríguez, J., Agulló, E., Bustamante, M. A., Sanz-Cobena, A. & Moral, R. (2020). Production of spinach in intensive Mediterranean horticultural systems can be sustained by organic-based fertilizers without yield penalties and with low environmental impacts. *Agricultural Systems*, 178, 01–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102765>.

Wang, J., Song, Y., Ma, T., Raza, W., Li, J., Howland, J. G., Huang, Q. & Shen, Q. (2017). Impacts of inorganic and organic fertilization treatments on bacterial and fungal communities in a paddy soil. *Applied Soil Ecology*, 112, 42–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.005>.

Wei, X., Bai, X., Cao, P., Wang, G., Han, J. & Zhang, Z. (2023). Bacillus and microalgae biofertilizers improved quality and biomass of *Salvia miltiorrhiza* by altering microbial communities. *Chinese Herbal Medicines*, 15(1), 45–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chmed.2022.01.008>.

Yoro, K. O. & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. *Advances in Carbon Capture*, 3–28. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-819657-1.00001-3>.

Zhao, G., Zhu, X., Zheng, G., Meng, G., Dong, Z., Baek, J. H., Jeon, C. O., Yao, Y., Xuan, Y. H. & Zhang, J. (2024). Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980–2022). *Geography And Sustainability*, 5(1), 19–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.006>.

Zhu, Y., Lv, X., Li, T., Zhong, M., Song, J., Wang, H. & Cui, J. (2022). Cotton straw biochar and compound *Bacillus* biofertilizer reduce Cd stress on cotton root growth by regulating root exudates and antioxidant enzymes system. *Frontiers in Plant Science*, 13, 01–15. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2022.1051935>.





IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# PRODUÇÃO DE ENZIMAS AMIOLÍTICAS POR FERMENTAÇÃO SUBMERSA UTILIZANDO FARELO DE TRIGO COMO SUBSTRATO

*Jéssica Mulinari<sup>\*1</sup>, Leonardo de Lima<sup>2</sup>, Alan Rempel<sup>2</sup>, Luciane Maria Colla<sup>1,2</sup>*

---

1 Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGAgro), Universidade de Passo Fundo (UPF), 99052-900, Passo Fundo, Brasil.

2 Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade de Passo Fundo (UPF), 99050-120, Passo Fundo, Brasil.

\*E-mail: [jessicamulinari15@gmail.com](mailto:jessicamulinari15@gmail.com)

# RESUMO

Os processos enzimáticos são amplamente utilizados em diversas indústrias devido à sua alta especificidade e condições operacionais brandas. A maior parte das enzimas comerciais é produzida por microrganismos através de fermentação submersa. Esse processo apresenta um custo elevado que pode ser reduzido com a utilização de substratos de baixo custo, como resíduos agroindustriais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de farelo de trigo como substrato na produção de enzimas amilolíticas através de fermentação submersa de *Bacillus velezensis*. Avaliou-se a adição de nutrientes e o impacto do aumento de escala na produção das enzimas. A suplementação de nutrientes não gerou impactos significativos em pequena escala (100 mL), mas favoreceu a produção das enzimas amilolíticas em biorreator (4000 mL). A maior atividade enzimática obtida foi de  $1,18 \pm 0,01 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$  após 96 h de fermentação em biorreator utilizando meio contendo 10% (m/v) de farelo de trigo, 1% (m/v) de extrato de levedura e 1% (v/v) de solução de nutrientes. Este é o primeiro trabalho na literatura a utilizar *Bacillus velezensis* na fermentação de farelo de trigo para a produção de enzimas amilolíticas. Os resultados obtidos neste estudo demonstram a viabilidade de utilização de farelo de trigo como substrato para a produção de enzimas amilolíticas por *Bacillus velezensis* e estudos futuros do mesmo grupo de pesquisa irão otimizar os parâmetros do processo.

**Palavras-chave:** *Bacillus velezensis*. Biorreator. Amilase. Resíduo agroindustrial. Meio fermentativo.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Processos enzimáticos são amplamente utilizados em diversas indústrias, como a alimentícia, farmacêutica, química e ambiental, devido à alta especificidade, condições operacionais brandas e maior sustentabilidade ambiental (Jegannathan & Nielsen, 2013; Wu et al., 2021). A alta especificidade das enzimas por seus substratos permite que catalisem reações de forma precisa, sem a formação de subprodutos indesejados (Rahman et al., 2020). Além disso, a catálise enzimática requer condições brandas de temperatura, pH e pressão, o que reduz o risco de degradação de componentes sensíveis e diminui o consumo energético. Esse fato, aliado à biodegradabilidade das enzimas, aumenta a sustentabilidade de processos enzimáticos em comparação aos processos químicos (Chook et al., 2023).

As enzimas podem ser de origem vegetal, animal ou microbiana. A maior parte das enzimas comerciais é produzida por microrganismos, como bactérias, fungos e leveduras, por terem um processo de produção mais econômico, apresentarem altos rendimentos, facilitarem o aumento de escala e serem de fácil manipulação visando a obtenção de enzimas com as características desejadas (Fasim et al., 2021). As enzimas microbianas são produzidas por meio de processos fermentativos, que podem ser em estado sólido ou submersos. A fermentação em estado sólido ocorre com o uso de substratos sólidos sem presença excessiva de água, enquanto a fermentação submersa ocorre em meio líquido com substratos dissolvidos ou suspensos (Ramos & Malcata, 2017). A fermentação submersa é o método mais utilizado industrialmente, pois facilita o aumento de escala ao permitir um melhor controle dos parâmetros do processo (temperatura, pH, oxigenação), promove transferências de calor e massa mais eficientes, e possui um controle superior ao da fermentação em estado sólido à contaminação por outros microrganismos, além de facilitar a purificação do produto (Hansen et al., 2015; Thakur et al., 2023).

Para a hidrólise de matéria-prima amilácea, visando à produção desde oligossacarídeos até açúcares redutores nas indústrias de alimentos, bebidas, biocombustíveis, têxteis e farmacêutica, são amplamente utilizadas enzimas amilolíticas, como amilases e amiloglicosidases (Souza & Magalhães, 2010). Entre as enzimas amilolíticas estão as  $\alpha$ -amilases, endoenzimas que atuam na hidrólise das ligações  $\alpha$ -1,4 não terminais das cadeias lineares do amido, as  $\beta$ -amilases que atuam nas extremidades não redutoras das cadeias lineares, liberando maltoses e, em menor quantidade, glicose e maltotriose, e as amiloglicosidases que atuam em todos os tipos de ligações, tanto nas  $\alpha$ -1,4 das cadeias lineares quanto nas  $\alpha$ -1,6 das ramificações, liberando glicose como produto. O mercado global de amilases foi avaliado em 2,7 bilhões de dólares em 2023, e a projeção é que atinja 4,4 bilhões de dólares até 2033 (Allied Market Research, 2024).

A fim de tornar os processos fermentativos economicamente viáveis, a utilização de substratos de baixo custo, como resíduos agroindustriais, é uma alternativa (Niyonzima et al., 2020). Diversos microrganismos e resíduos agroindustriais podem ser aplicados na produção de amilases. Bactérias do gênero *Bacillus* são conhecidas por serem ótimas produtoras de  $\alpha$ -amilase e têm sido amplamente utilizadas para a produção comercial da enzima (Souza & Magalhães, 2010). *Bacillus amyloliquefaciens*, por exemplo, foi avaliado para a produção de amilases utilizando farelo de trigo como substrato em fermentação em estado sólido, sendo a atividade máxima obtida de 84 U/mg em pH 7 e 70°C (Zar et al., 2013). *Bacillus velezensis* também foi avaliado para a produção de enzimas amilolíticas por Devos et al. (2024) utilizando triticales e bagaço de cana de

açúcar como fonte de carbono. A maior atividade amilolítica obtida foi de 3,86 U/mL utilizando pH 5.5 e 120 h de fermentação sem suplementação de nutrientes.

Considerando que o estado do Rio Grande do Sul é um dos principais produtores de trigo no Brasil e que a previsão do governo estadual indica uma produção de 4,2 milhões de toneladas métricas em 2024 (Rio Grande do Sul, 2024), a geração de subprodutos de baixo custo como o farelo de trigo será considerável. Assim, buscando reduzir os custos de produção de enzimas amilolíticas, o objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de farelo de trigo como substrato na fermentação submersa de *Bacillus velezensis*. Este é o primeiro trabalho na literatura a utilizar *Bacillus velezensis* para a fermentação de farelo de trigo a fim de produzir enzimas amilolíticas. Avaliou-se a adição de nutrientes e o impacto do aumento de escala na produção das enzimas.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL OU METODOLOGIA

### 2.1 MATERIAIS E REAGENTES

Farelo de trigo foi utilizado como fonte de carbono, sendo armazenado a  $-20^{\circ}\text{C}$  até o uso. O farelo de trigo possui  $11,55 \pm 0,03\%$  de umidade,  $3,85 \pm 0,04\%$  de lipídeos,  $13,06 \pm 0,10\%$  de proteínas,  $3,29 \pm 0,01\%$  de cinzas, e  $68,25 \pm 0,09\%$  de carboidratos (Kreling et al., 2020). Foram avaliados os microrganismos *Bacillus velezensis* UPF-B1 e UPF-B2, isolados de frutas e vegetais em decomposição por Devos et al. (2024). Foram utilizados os seguintes reagentes de grau analítico: triptona (KASVI, Brasil), extrato de levedura (HiMedia, Índia), glicose anidra ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ,  $\geq 99,5\%$ , Neon, Brasil), ácido acético glacial ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ,  $\geq 99,5\%$ , Purion Química, Brasil), fosfato de potássio monobásico anidro ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\geq 98\%$ , Êxodo Científica, Brasil), sulfato de magnésio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\geq 98,0\%$ , Neon, Brasil), cloreto de cálcio anidro ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\geq 98,0\%$ , Merck, Alemanha), sulfato de ferro II ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\geq 99\%$ , Êxodo Científica, Brasil), sulfato de manganês monohidratado ( $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\geq 98,0\%$ , Synth, Brasil), sulfato de zinco heptahidratado ( $\text{ZnSO}_4$ ,  $\geq 99,0\%$ , Química Moderna, Brasil), amido solúvel ( $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ , Synth, Brasil), fosfato de sódio monobásico anidro ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\geq 97\%$ , Êxodo Científica, Brasil), fosfato de sódio dibásico anidro ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\geq 98,0\%$ , Nuclear, Brasil), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ,  $\geq 97,0\%$ , Neon, Brasil), e ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS,  $\text{C}_7\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_7$ ,  $\geq 98\%$ , Sigma-Aldrich, EUA).

## 2.2 PREPARO DO INÓCULO

O método de preparo do inóculo e posterior fermentação submersa foi adaptado de Rodrigues et al. (2017) e Devos et al. (2024). O inóculo foi preparado em meio PC (Plate Count) composto por  $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de triptona,  $2,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de extrato de levedura e  $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de glicose. Foram adicionados 50 mL de meio PC a um frasco Erlenmeyer de 250 mL, que foi autoclavado a  $121 \text{ }^\circ\text{C}$  e 101 kPa por 20 min e, após atingir temperatura ambiente, inoculado com duas alçadas da bactéria. O inóculo foi então incubado em mesa agitadora (TE-421, Tecnal) por 48 h a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  e 150 rpm.

## 2.3 FERMENTAÇÃO SUBMERSA

O meio fermentativo foi preparado adicionando-se 10% (m/v) de farelo de trigo em água destilada, que foi fervido por 30 min e filtrado para remoção dos sólidos. O pH do sobrenadante foi ajustado para 5,5 com ácido acético 1 M, o volume foi ajustado para 90 mL com água destilada, e o meio foi adicionado a Erlenmeyers de 250 mL. Foram realizados testes com e sem suplementação de nutrientes. Nos testes com suplementação, adicionou-se 1% (m/v) de extrato de levedura como fonte de nitrogênio e 1% (v/v) de solução nutriente contendo  $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{MgSO}_4$ , 0,225 g de  $\text{CaCl}_2$  e  $10 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$  de solução de elementos traço ( $0,63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $0,01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{MnSO}_4$ ,  $0,62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de  $\text{ZnSO}_4$ ). O meio foi esterilizado a  $121 \text{ }^\circ\text{C}$  e 101 kPa por 20 min e, após atingir temperatura ambiente, foi inoculado com 10% (v/v) do inóculo preparado com as bactérias no meio PC com uma absorbância entre 0,8 e 1,0 a 610 nm. A fermentação foi realizada em Erlenmeyers de 250 mL com 100 mL de volume inicial em mesa agitadora (TE-421, Tecnal) por 144 h a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  e 150 rpm. Amostras foram coletadas a cada 24 h para determinação da atividade amilolítica de acordo com a seção 2.5. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

## 2.4 AUMENTO DE ESCALA

Para avaliar os efeitos do aumento de escala no comportamento da fermentação e produção enzimática, experimentos foram realizados em um biorreator de bancada (Tec-Bio-Flex, Tecnal) de 5 L com volume inicial de 4000 mL. A preparação do inóculo e do meio fermentativo seguiu a metodologia descrita na seção 2.3, realizando-se ensaios com e sem suplementação. O microrganismo utilizado e o tempo fermentativo foram escolhidos com base nos resultados obtidos em pequena escala. A temperatura do biorreator foi mantida em  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , a agitação em 150 rpm, e a adição de ar em  $2,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Para evitar a formação de espuma, adicionou-se o antiespumante Hidro Star Agro 3

(Star Flesh) a 5% (v/v) em água destilada. A fim de comparar a produção enzimática no biorreator com a produção em pequena escala, amostras também foram retiradas a cada 24 h para determinação da atividade amilolítica.

## 2.5 ATIVIDADE AMILOLÍTICA

A atividade amilolítica (AA) das enzimas produzidas foi determinada a partir da liberação de açúcares redutores (AR) sob condições de teste padronizadas: 1 mL das amostras do extrato fermentativo (previamente centrifugadas para remoção das células bacterianas) foi adicionado a tubos de ensaio com 2 mL de solução de amido 1% (m/v) em tampão fosfato de sódio 0,2 M pH 7 e incubado em um banho termostático por 60 min a 40 °C. A reação foi interrompida com a adição de 0,5 mL de NaOH 1 M, seguida de banho termostático a 100 °C por 10 min. Em seguida, o meio reacional foi diluído 5 vezes em água destilada. O meio reacional diluído foi utilizado para determinar a concentração de AR liberado pelo método do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), utilizando uma curva padrão de glicose. Para isso, 1 mL do meio reacional diluído foi adicionado a 1 mL de NaOH 1M e 1 mL de DNS e incubado por 5 min a 100 °C em banho termostático. Após esse tempo, as amostras foram resfriadas a temperatura ambiente com o auxílio de um banho de gelo e adicionou-se 7 mL de água em cada amostra. A absorbância das amostras foi determinada em espectrofotômetro UV-Vis (T60 U, PG Instruments) em um comprimento de onda de 546 nm. Foi realizado um branco para cada amostra a fim de determinar a concentração de AR já presente no extrato fermentativo. Para isso, adicionou-se 1 mL de NaOH 1 M a 1 mL do extrato, que foi incubado a 100 °C por 10 min a fim de desnaturar as enzimas antes de serem adicionadas à solução de amido. A atividade amilolítica foi calculada usando a Equação 1. Uma unidade de atividade enzimática (U) corresponde à quantidade de enzima necessária para liberar 1 µmol de AR por minuto nas condições do método proposto.

$$AA = \frac{[AR]_f - [AR]_i}{t \times 0,18} \quad (1)$$

onde AA é a atividade amilolítica (U/mL),  $[AR]_f$  é a concentração de açúcares redutores após a reação enzimática (mg/mL),  $[AR]_i$  é a concentração de açúcares redutores no branco (mg/mL),  $t$  é o tempo de hidrólise enzimática (min), e 0,18 é o fator de conversão de mg para µmol de açúcar redutor.

As diferenças entre as médias dos ensaios foram avaliadas por análise de variância (ANOVA) com um nível de confiança de 95%, seguida pelo teste de Tukey.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 FERMENTAÇÃO SUBMERSA EM PEQUENA ESCALA

A Figura 1 mostra as atividades amilolíticas obtidas para os extratos fermentativos de *Bacillus velezensis* UPF-B1 (Figura 1a) e UPF-B2 (Figura 1b) ao longo do tempo utilizando farelo de trigo como substrato sem suplementação e com suplementação de nutrientes. Em ambos os casos, as maiores atividades amilolíticas foram obtidas utilizando-se o *Bacillus velezensis* UPF-B2 em 96 h de fermentação, sendo de  $0,80 \pm 0,09 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$  para o meio sem suplementação e  $0,85 \pm 0,01 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$  para o meio suplementado. Nota-se que, em 96 h, a suplementação com nutrientes não causou diferenças significativas na atividade enzimática. O mesmo comportamento foi observado por Devos et al. (2024) ao comparar o *Bacillus velezensis* UPF-B1 e o UPF-B2 em meio fermentativo contendo triticales e bagaço de cana: a cepa UPF-B2 também apresentou maiores produções de enzimas amilolíticas ( $3,86 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) do que a UPF-B1 ( $3,46 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) e a suplementação com nutrientes não afetou a atividade enzimática. No entanto, no estudo de Devos et al. (2024), a máxima atividade enzimática foi obtida em 120 h ao invés de 96 h como visto neste estudo. As maiores atividades amilolíticas obtidas por Devos et al. (2024) provavelmente se devem aos diferentes substratos já que o grão inteiro de triticales foi moído e a farinha resultante, contendo aproximadamente 80% de carboidratos, foi utilizada. A farinha de triticales provavelmente possui uma maior quantidade de amido disponível para a fermentação do que o farelo de trigo utilizado neste estudo.

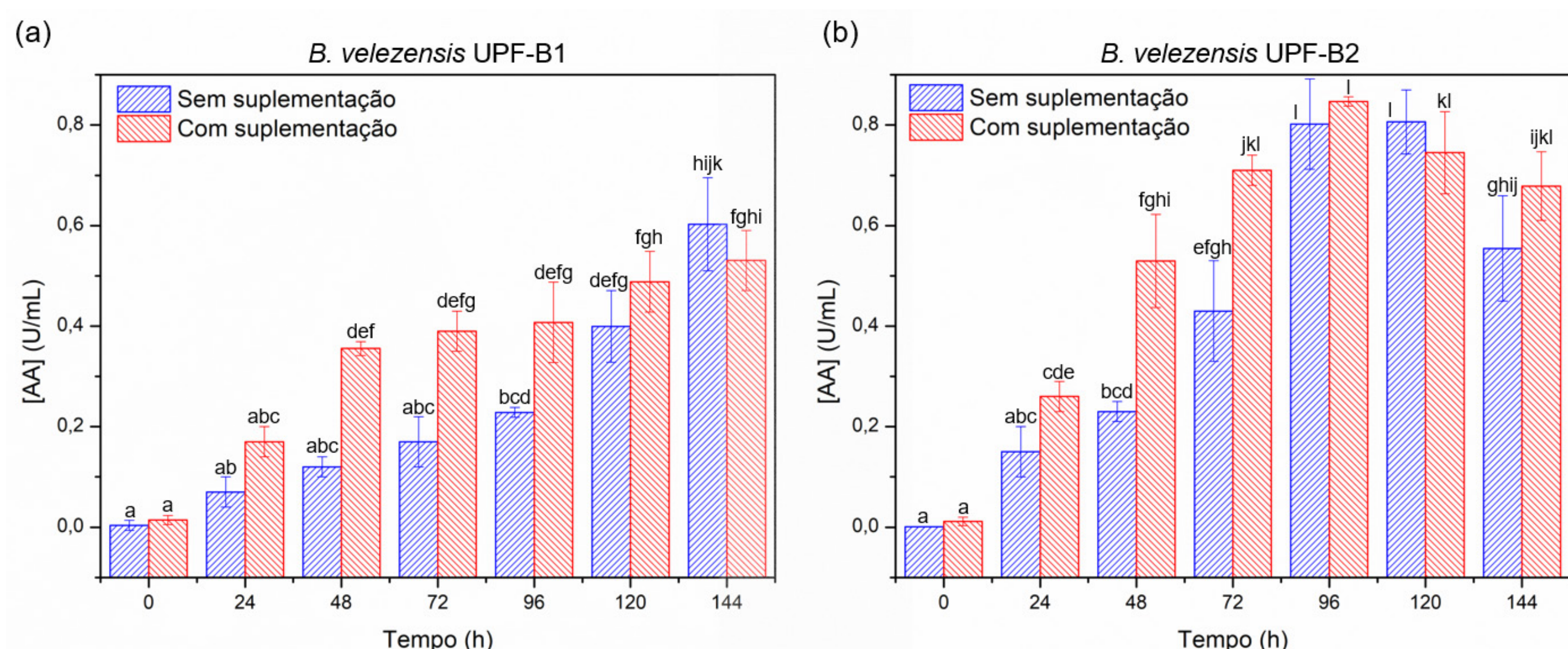


Figura 1. Atividades amilolíticas do extrato fermentativo sem e com suplementação utilizando (a) *Bacillus velezensis* UPF-B1 e (b) *Bacillus velezensis* UPF-B2 com farelo de trigo como substrato em Erlenmeyers de 250 mL com 100 mL de meio. Nota: os valores representam médias de triplicata e seus respectivos desvios padrão. Barras com letras diferentes são significativamente diferentes de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Apesar de não ter apresentado diferença significativa em 96 h de fermentação, a adição de nutrientes ao meio aumentou a taxa de liberação de enzimas amilolíticas. Por exemplo, para o *Bacillus velezensis* UPF-B1 em 48 h de fermentação, a atividade enzimática foi de  $0,12 \pm 0,02 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$  para o meio sem suplementação de nutrientes e  $0,36 \pm 0,01 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$  para o meio suplementado. O mesmo comportamento pode ser observado para o *Bacillus velezensis* UPF-B2: em 48 h de fermentação, a adição de nutrientes aumentou a atividade enzimática de  $0,23 \pm 0,02 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$  (sem suplementação) para  $0,53 \pm 0,09 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ .

## 3.2 AUMENTO DE ESCALA

Com o *Bacillus velezensis* UPF-B2, realizou-se as fermentações em biorreator com 4000 mL de meio por 96 h. A Figura 2 apresenta as atividades amilolíticas das fermentações com farelo de trigo como substrato sem suplementação (Figura 2a) e com suplementação de nutrientes (Figura 2b) comparando os resultados em pequena escala (100 mL) com os do aumento de escala (4000 mL). Nota-se que, quando o meio fermentativo não foi suplementado com nutrientes, a produção de enzimas amilolíticas em maior escala apresentou maiores atividades até 48 h de fermentação em comparação com a menor escala. No entanto, após 48 h, a atividade enzimática se manteve constante nos testes com 4000 mL, enquanto nos testes em 100 mL a atividade continuou aumentando. Isso pode se dever a oxigenação do meio, já que houve a formação de espuma no biorreator devido à agitação e aeração, fazendo com que a adição de antiespumante fosse necessária. Os agentes antiespumantes influenciam o tamanho das bolhas, causando uma redução na taxa de transferência de oxigênio, o que resulta em uma depleção de oxigênio dissolvido no meio (Tiso et al., 2024). Na produção de  $\alpha$ -amilase por *Bacillus amyloliquefaciens*, por exemplo, o uso de agentes antiespumantes para controlar a formação de espuma resultou em uma redução significativa na produção da enzima (Milner et al., 1996). Sem controlar a formação de espuma, a atividade enzimática chegou a  $4800 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ , no entanto quando houve o uso de antiespumantes, a atividade caiu para  $2550\text{--}2670 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ . Segundo os autores, isso indica que os agentes antiespumantes podem impactar negativamente a produção de enzimas ao reduzir a disponibilidade de oxigênio (Milner et al., 1996).

Já no meio com suplementação de nutrientes (Figura 2b), a atividade das enzimas amilolíticas foi superior para o teste em maior escala (4000 mL) alcançando  $1,18 \pm 0,01 \text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$ . Nos ensaios em biorreator de 4000 mL, as forças de cisalhamento são diferentes devido ao *design* do agitador, o que pode afetar o crescimento bacteriano e a produção



enzimática (El-Naggar et al., 2019). As bactérias também podem sofrer mudanças fisiológicas ou metabólicas em escalas maiores devido a alterações no pH, oxigênio dissolvido ou concentração de dióxido de carbono (Du et al., 2022). Nesse sentido, a suplementação de nutrientes pode ajudar o microrganismo a suportar esses estresses em configurações de maior escala, enquanto em pequena escala o cisalhamento geralmente é menor e as mudanças fisiológicas ou metabólicas podem ser mínimas ou inexistentes, não exigindo nutrientes adicionais para a produção enzimática.

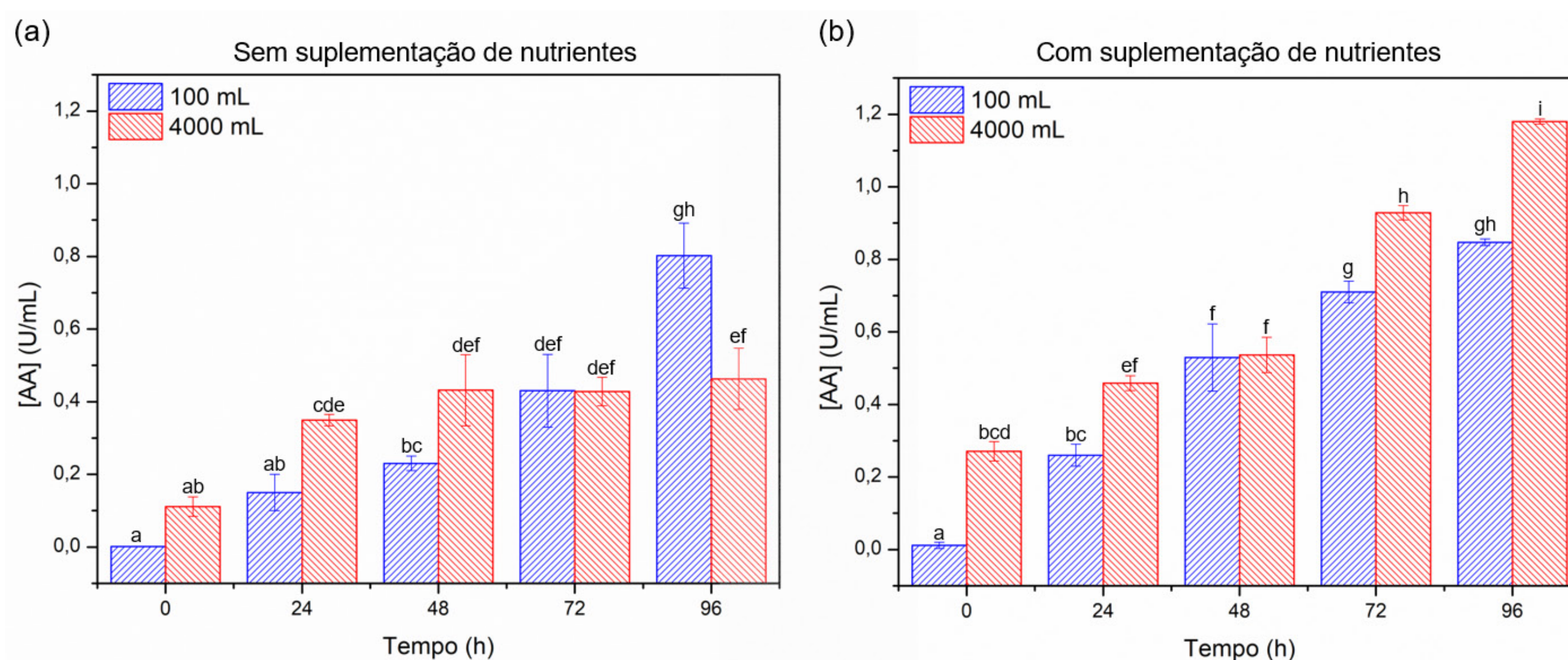


Figura 2. Atividades amilolíticas do extrato fermentativo de *Bacillus velezensis* UPF-B2 utilizando farelo de trigo como substrato com e sem suplementação de nutrientes em biorreator com 4000 mL de volume de meio. Nota: Os valores representam médias de triplicata e seus respectivos desvios padrão. Barras com letras diferentes são significativamente diferentes de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a viabilidade de se utilizar o farelo de trigo como substrato para a produção de enzimas amilolíticas em fermentação submersa por *Bacillus velezensis*. A cepa de *Bacillus velezensis* UPF-B2 apresentou uma maior produção enzimática quando comparada à cepa UPF-B1. Além disso, os dados mostraram a importância da realização de testes em maior escala em equipamentos que se assemelham a biorreatores industriais a fim de definir e otimizar os parâmetros de processo. A suplementação de nutrientes não gerou impactos significativos em pequena escala (100 mL) mas favoreceu a produção de enzimas amilolíticas em biorreator (4000 mL). A maior atividade enzimática obtida foi de  $1,18 \pm 0,01$  U/mL após 96 h de fermentação em biorreator utilizando meio contendo 10% (m/v) de farelo de trigo, 1% (m/v) de extrato de levedura e 1% (v/v) de solução nutriente.

# AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

---

## PRODUCTION OF AMYLOLYTIC ENZYMES BY SUBMERGED FERMENTATION USING WHEAT BRAN AS SUBSTRATE

**ABSTRACT:** Enzymatic processes are widely used in various industries due to their high specificity and mild operational conditions. Microorganisms produce most commercial enzymes through submerged fermentation. This process has a high cost, which can be reduced using low-cost substrates, such as agro-industrial waste. In this context, this study aimed to evaluate the use of wheat bran as a substrate for the production of amylolytic enzymes through submerged fermentation of *Bacillus velezensis*. The addition of nutrients and the impact of scale-up on enzyme production were assessed. Nutrient supplementation did not have significant impacts at a small scale (100 mL) but enhanced amylolytic enzyme production in a bioreactor (4000 mL). The highest enzymatic activity obtained was  $1.18 \pm 0.01 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$  after 96 hours of fermentation in a bioreactor using a medium containing 10% (w/v) wheat bran, 1% (w/v) yeast extract, and 1% (v/v) nutrient solution. This is the first study in the literature to use *Bacillus velezensis* in the wheat bran fermentation to produce amylolytic enzymes. The results obtained in this study demonstrate the feasibility of using wheat bran as a substrate for amylolytic enzyme production, and future studies will focus on optimizing the process parameters

**Keywords:** *Bacillus velezensis*. Bioreactor. Amylase. Agro-industrial waste. Fermentation broth.

---

## REFERÊNCIAS

Allied Market Research. (2024). Amylase Market Size, Share, Forecast Report, 2033. Recuperado de <https://www.alliedmarketresearch.com/amylase-market-A15505>

Chook, K. Y., Aroua, M. K. & Gew, L. T. (2023) Enzyme Biocatalysis for Sustainability Applications in Reactors: A Systematic Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(28), 10800–10812. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00832>

Devos, R. J. B., Bender, L. E., Lopes, S. T., Cavanhi, V. A. F., Colvero, G. L., Rempel, A., Harakava, R., Alves Jr., S. L. & Colla, L. M. (2024). Multienzyme production by *Bacillus velezensis* strains isolated from fruit residues in submerged fermentation using triticale and sugarcane bagasse in the cultivation media. *Process Biochemistry*, 141, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.03.003>

Du, Y.-H., Wang, M.-Y., Yang, L.-H., Tong, L.-L., Guo, D. S.; Ji, X. J. (2022). Optimization and Scale-Up of Fermentation Processes Driven by Models. *Bioengineering*, 9, 9. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9090473>

El-Naggar, N. E.-A., Moawad, H., El-Shweihy, N. M., El-Ewasy, S. M., Elsehemy, I. A. & Abdelwahed, N. A. M. (2019). Process development for scale-up production of a therapeutic L-asparaginase by *Streptomyces brollosae* NEAE-115 from shake flasks to bioreactor. *Scientific Reports*, 9, 13571. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49709-6>

Fasim, A., More, V. S. & More, S. S. (2021). Large-scale production of enzymes for biotechnology uses. *Current Opinion in Biotechnology*, 69, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.12.002>

Hansen, G. H., Lübeck, M., Frisvad, J. C., Lübeck, P. S. & Andersen, B. (2015). Production of cellulolytic enzymes from ascomycetes: Comparison of solid state and submerged fermentation. *Process Biochemistry*, 50(9), 1327–1341. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.05.017>

Jegannathan, K. R. & Nielsen, P. H. (2013). Environmental assessment of enzyme use in industrial production – a literature review. *Journal of Cleaner Production*, 42, 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.005>

Kreling, N. E., Simon, V., Fagundes, V. D., Thomé, A. & Colla, L. M. (2020). Simultaneous Production of Lipases and Biosurfactants in Solid-State Fermentation and Use in Bioremediation. *Journal of Environmental Engineering*, 146(9), 04020105. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001785](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001785)

Niyonzima, Fr. N., Veena, S. M. & More, S. S. (Springer 2020). Industrial Production and Optimization of Microbial Enzymes. In N. K. Arora, J. Mishra & V. Mishra (ed.), *Microbial Enzymes: Roles and Applications in Industries*, 115–135. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1710-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1710-5_5)

Rahman, M., Hack-Polay, D., Billah, M. M. & Nabi, M. D. U. (2020). Bio-based textile processing through the application of enzymes for environmental sustainability. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*, 19(1), 87-106. [https://doi.org/10.1386/tmsd\\_00017\\_1](https://doi.org/10.1386/tmsd_00017_1)

Ramos, Ó. L. & Xavier Malcata, F. Food-Grade Enzymes. (2017). In M. Moo-Young (ed.), *Comprehensive Biotechnology* (Third Edition, 587-603). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.09173-1>

Rio Grande do Sul. (2024). Colheita do trigo no Estado deve passar de 4 milhões de toneladas. Recuperado de <https://www.estado.rs.gov.br/colheita-do-trigo-no-estado-deve-passar-de-4-milhoes-de-toneladas>

Rodrigues, É. F., Ficanha, A. M. M., Dallago, R. M., Treichel, H., Reinehr, C. O., Machado, T. P., Nunes, G. B. & Colla, L. M. (2017). Production and purification of amylolytic enzymes for saccharification of microalgal biomass. *Bioresource Technology*, 225, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.047>

Souza, P. M. de & Oliveira e Magalhães, P. de. (2010). Application of microbial  $\alpha$ -amylase in industry – A review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 41, 850-861. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400004>

Thakur, N., S. & Bhalla, T. C. (2023). Chapter 18 – Enzymes and their significance in the industrial bioprocesses. In A. K. Bhatt, R. K. Bhatia & T. C. Bhalla (ed.), *Basic Biotechniques for Bioprocess and Bioentrepreneurship*, 273-284. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816109-8.00018-0>

Tiso, T., Demling, P., Karmainski, T., Oraby, A., Eiken, J., Liu, L., Bongartz, P., Wessling, M., Desmond, P., Schmitz, S., Weiser, S., Emde, F., Czech, H., Merz, J., Zibek, S., Blank, L. M. & Regestein, L. (2024). Foam control in biotechnological processes – challenges and opportunities. *Discover Chemical Engineering*, 4(2). <https://doi.org/10.1007/s43938-023-00039-0>

Wu, S., Snajdrova, R., Moore, J. C., Baldenius, K., Uwe, T. (2021). Bornscheuer. Biocatalysis: Enzymatic Synthesis for Industrial Applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 60(1), 88-119. <https://doi.org/10.1002/anie.202006648>

Zar, M. S., Ali, S. & Shahid, A. A. (2013). The influence of carbon and nitrogen supplementation on alpha amylase productivity of *Bacillus amyloliquefaciens* IIB-14 using fuzzy-logic and two-factorial designs. *African Journal of Microbiology Research*, 7(2), 120-129. <https://doi.org/10.5897/AJMR12.1519>



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DE CEVADA RESIDUAL

*Gabrielle Fusiger Berwian<sup>1\*</sup>, Arthur de Almeida Rebechi<sup>2</sup>, Emmanuel Elias Scorsato<sup>3</sup>, Luciane Maria Colla<sup>1</sup>*

---

1 Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade de Passo Fundo (UPF), CEP 99052-900, Passo Fundo, Brasil.

2 Graduação em Engenharia Química, Universidade de Passo Fundo (UPF), CEP 99052-900, Passo Fundo, Brasil.

3 Graduação em Ciências Biológicas, Universidade de Passo Fundo (UPF), CEP 99052-900, Passo Fundo, Brasil.

\*E-mail: gabiberwian@gmail.com

# RESUMO

As fontes renováveis de combustíveis, em especial o bioetanol, tem sido consideradas como alternativa à matriz energética convencional, porém existe necessidade de ampliação e oferta de biomassa para a produção desse biocombustível. Dentre elas, a cevada residual se destaca pelas altas concentrações de carboidratos do grão e por ser uma fonte que não pode ser utilizada na indústria cervejeira. Sendo assim, o estudo tem como objetivo a utilização da cevada residual para a produção de bioetanol por Sacarificação e Fermentação Separada (SHF). As amostras padrão, com déficit de crescimento, pré-germinada e contaminada com micotoxinas foram caracterizadas em espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Os meios foram preparados com tampão fosfato (pH 5,0) com 15% (m/v) de sólidos, sendo posteriormente hidrolisados com as enzimas LpHera ( $\alpha$ -amilase) e Saczyme (amiloglucosidase). O mosto foi esterilizado e foram adicionados 10% (v/v) de inóculo de *Saccharomyces cerevisiae*, as amostras foram caracterizadas em relação à concentração de açúcares e etanol a cada 6 horas, por 24 horas. Dentre as amostras, a cevada padrão cervejeiro apresentou maior concentração de etanol 39,02 g/L após 24 horas, enquanto a cevada com déficit de crescimento obteve 27,01 g/L de etanol e as amostras contaminada e com pré-germinada alcançaram concentração final de 21,9 g/L de etanol. Mesmo com variações de rendimento, o uso da cevada residual para a produção de bioetanol traz benefícios econômicos e ambientais, reduzindo o desperdício agroindustrial e criando uma alternativa energética renovável e sustentável.

**Palavras-chave:** Amido. Contaminação. DON. Etanol. Fermentação.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por combustíveis fósseis representa um desafio econômico e ambiental, levando à busca por alternativas sustentáveis que atendam às necessidades globais e reduzam os impactos ambientais dessas fontes. Entre essas alternativas, o uso de recursos energéticos produzidos a partir de biomassa biodegradável, como o bioetanol, tem se mostrado promissor, pois proporciona uma combustão menos agressiva em comparação aos combustíveis convencionais (Aruwajoye et al., 2020; Devos & Colla, 2022).

No Brasil, a principal biomassa para a produção de bioetanol é a cana-de-açúcar, mas também é possível produzir esse biocombustível a partir de amiláceos como a cevada, o trigo e o milho. O uso dessas matérias-primas gera controvérsias, pois há uma competição por recursos que poderiam ser utilizados na alimentação humana (Persson et al., 2023). Entre os amiláceos, a cevada se destaca como uma matéria-prima promissora para a produção de bioetanol, devido ao seu alto teor de amido, que podem ser convertidos em açúcares simples durante a fermentação. Embora a cevada seja amplamente usada na produção de cerveja, problemas no cultivo, como pré-germinação no campo, tamanho inadequado dos grãos ou contaminação por micotoxinas podem inviabilizar seu uso para essa finalidade. Essas limitações fazem da cevada fora de padrão uma opção interessante para a produção de bioetanol.

O tamanho do grão é um fator essencial na produção de cerveja, especialmente observado em plantas da espécie *Hordeum hexastichum* (seis fileiras), onde frequentemente obtém-se grãos menores e mais achatados, resultado do desenvolvimento limitado do grão. Esse formato menor dificulta o seu uso em maltarias, pois os grãos tendem a ter uma casca mais rígida implicando na obtenção do malte. Esse fator, além de limitar o controle sobre o processo, pode causar variações indesejadas no sabor e na qualidade do produto final (Langenaeken et al., 2019; Porto, 2011), portanto, essa passa a não ser utilizada na produção da bebida. A pré-germinação em campo ocorre quando as sementes germinam antes da colheita, geralmente devido a variações de temperatura e umidade. Esse fenômeno afeta negativamente a qualidade dos grãos, levando à perda de enzimas importantes para a produção cervejeira e comprometendo a produção de álcool e as características sensoriais da bebida (Gualano et al., 2014). Além disso, a pré-germinação aumenta a umidade dos grãos, tornando-os mais vulneráveis à contaminação por microrganismos, como as micotoxinas.

A contaminação por micotoxinas, toxinas produzidas por fungos, é um problema sério que compromete a qualidade dos grãos desde o cultivo até o processamento. Altamente prejudiciais à saúde humana e animal, essas substâncias tornam os grãos contaminados impróprios para o consumo, o que impede seu uso seguro na produção de cervejas e outros alimentos. No entanto, embora sua aplicação seja restrita para fins alimentícios, esses grãos ainda podem ser aproveitados na produção de biocombustíveis, como o bioetanol. Nesse processo, a ação das enzimas e leveduras podem degradar as micotoxinas, permitindo que o subproduto final seja adequado para a alimentação animal (Juodeikiene et al., 2020).

O tratamento adequado desses resíduos contribui para a qualidade e segurança do produto principal, além de promover a sustentabilidade e a economia circular ao aproveitar os resíduos gerados. Assim, o estudo tem como objetivo utilizar a cevada residual para produzir bioetanol por meio do processo de Sacarificação e Fermentação Separada (SHF).

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 BIOMASSA E CARACTERIZAÇÃO

As cultivares de cevada utilizadas na pesquisa foram obtidas junto a uma maltaria localizada em Passo Fundo, no Rio Grande do Sul, totalizando 4 amostras, sendo: (1) cevada dentro dos padrões cervejeiros, (2) tamanho fora do padrão (3) contaminada com Desoxinivalenol (DON) e (4) pré-germinada em campo. Os grãos utilizados foram moídos em moinho de facas (MA090/CFT, Marconi, Brasil), com temperatura controlada a 16°C com banho de circulação externa (SL-152, Solab, Brasil), passando por uma peneira de 10 mesh.

A caracterização das amostras em relação a proteínas, lipídios, fibras, cinzas e amido foram determinadas em espectrometria no infravermelho próximo (NIRS). As diferentes amostras de cevada foram analisadas em espectrômetro (NIRSTM DS2500, FOSS, Brasil), que realiza leituras na faixa entre 400 e 2500 nm, e contém curva de calibração específica para grãos. O equipamento expressa os resultados obtidos em g/100g e a análise foi realizada em triplicata.

### 2.2 FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

#### 2.2.1 MICRO-ORGANISMO

A cepa utilizada foi a levedura *Saccharomyces cerevisiae*. O pré-inóculo foi preparado com objetivo de fazer a reativação da levedura, portanto a mesma foi encubada a 30°C por 48 horas em um meio líquido contendo 2% de glicose, 2% de peptona e 1% de extrato de levedura (Rempel et al., 2019). Os inóculos foram preparados utilizando as mesmas proporções de glicose, peptona e extrato de levedura citados anteriormente, juntamente do 10% do pré-inóculo, e esse foi incubado novamente a 30°C por 8 horas, até que se atingisse uma absorbância de 0,8 nm.



## 2.2.2 PROCESSO FERMENTATIVO

Os meios para hidrólise foram preparados contendo 15% para cada uma das biomassas e homogeneizados em tampão fosfato (pH 5,0), seguido do processo de gelatinização. Após resfriada, foi feita a adição de 150 mL/m<sup>3</sup> de enzima, sendo elas adicionadas em conjunto no meio. A enzima LpHera ( $\alpha$ -amilase) foi adicionada no tempo inicial de hidrólise, seguida da Saczyme (amiloglucosidase) adicionada 2 horas após início da hidrólise. A estabilização na conversão de açúcares foi alcançada em 6 horas, concluindo o processo.

Posteriormente, os mostos foram esterilizados em autoclave e inoculados com 10% (v/v) de inóculo. As amostras foram coletadas a cada 6 horas para posterior determinação de açúcares redutores do meio e a concentração de etanol obtido no processo. O consumo de substrato pela levedura foi verificado através da determinação de açúcar redutor (AR), o qual foi quantificado pelo método 3,5 DNS (Miller, 1959), utilizando-se uma curva padrão, obtida a partir de solução estoque de glicose anidra. Para determinar a concentração de etanol, anteriormente as amostras foram destiladas, e as amostras foram avaliadas pela reação do dicromato de potássio (Salik & Povh, 1993). Todas as análises foram realizadas em triplicata.

## 2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) no nível de 95% de confiança seguido do teste de comparação de médias (Tukey) para as amostras que apresentavam diferença significativa.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química de grãos de cevada é um aspecto importante a ser considerado na produção de bioetanol, pois influencia diretamente no rendimento e na qualidade do biocombustível produzido. Para tanto, a composição química das diferentes amostras de cevada em base úmida está representada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química da cevada residual

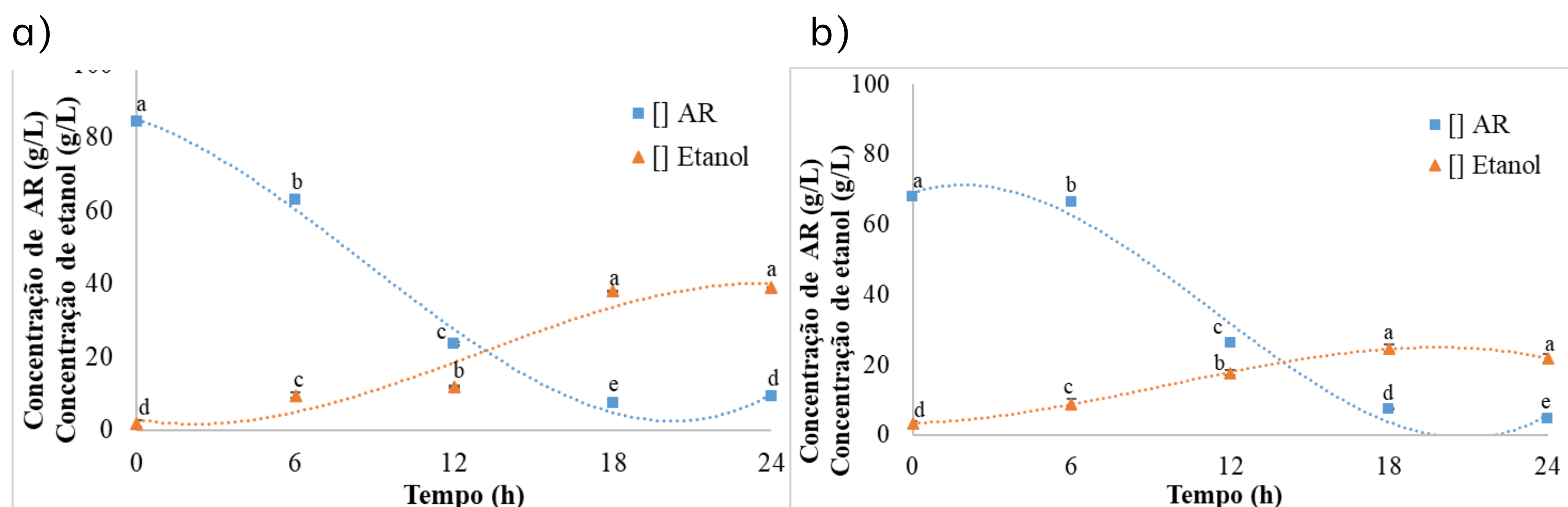
| Cevada                 | Amido                     | Proteína                   | Lipídios                 | Fibra bruta              | Cinzas                   |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Padrão cervejeiro      | 62,74 ± 0,14 <sup>a</sup> | 11,27 ± 0,11 <sup>ab</sup> | 2,46 ± 0,03 <sup>a</sup> | 2,77 ± 0,03 <sup>d</sup> | 2,40 ± 0,02 <sup>c</sup> |
| Déficit de crescimento | 62,99 ± 0,12 <sup>a</sup> | 10,98 ± 0,05 <sup>c</sup>  | 2,44 ± 0,01 <sup>a</sup> | 2,81 ± 0,07 <sup>d</sup> | 2,50 ± 0,02 <sup>b</sup> |
| Cont. com micotoxinas  | 61,81 ± 0,14 <sup>b</sup> | 11,00 ± 0,06 <sup>bc</sup> | 2,23 ± 0,06 <sup>b</sup> | 3,86 ± 0,06 <sup>a</sup> | 2,71 ± 0,03 <sup>a</sup> |
| Pré-germinada          | 61,91 ± 0,02 <sup>b</sup> | 11,49 ± 0,17 <sup>a</sup>  | 2,37 ± 0,09 <sup>a</sup> | 3,18 ± 0,05 <sup>c</sup> | 2,28 ± 0,03 <sup>d</sup> |

\* Os resultados expressam a média ± desvio padrão obtidos através de determinação em triplicata. Letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente pelo Teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os resultados obtidos para a cevada estão em conformidade com os dados encontrados na literatura (Yang et al., 2015; Juodeikiene et al., 2014). A concentração de amido no grão é um fator crucial na produção de bioetanol, uma vez que teores mais altos de amido estão associados a um maior rendimento final, fornecendo o substrato necessário para a fermentação pela levedura utilizada. Neste estudo, as concentrações de amido variaram de 61,81% para a amostra contaminada com DON a 62,99% para a amostra que não atingiu o tamanho adequado. As altas concentrações de amido presentes nos grãos demonstram uma possível valorização desse resíduo, tornando-o apto para a produção de bioetanol.

### 3.2 FERMENTAÇÃO

A Figura 1 mostra o consumo de açúcares fermentáveis pela levedura, ocorrendo de forma simultânea com a produção de bioetanol para todos os experimentos ao longo da Sacarificação e Fermentação Separada (SHF).



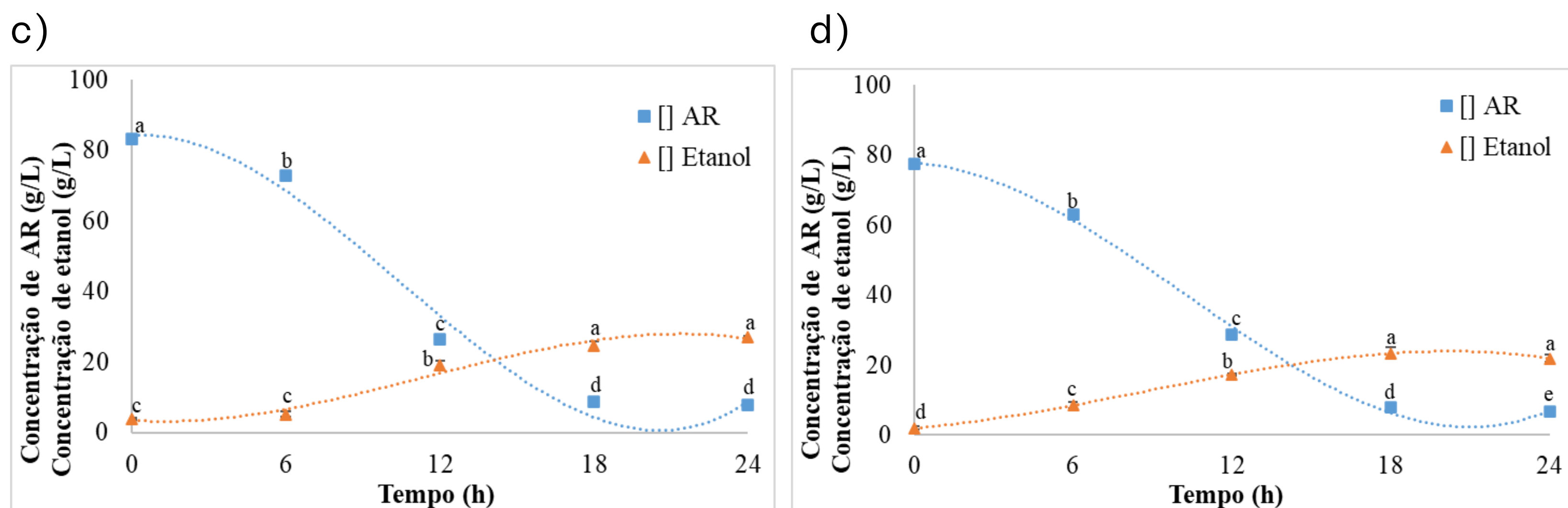


Figura 1. Concentração de açúcar redutor e etanol durante a fermentação das amostras de cevada padrão (a), pré-germinada (b), com déficit de crescimento (c) e contaminada com micotoxina DON (d) \*Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). \*\*AR: açúcar redutor.

Diante dos resultados obtidos, observa-se que as amostras de cevada apresentam um perfil fermentativo similar à amostra padrão, com maior atividade da levedura nas primeiras 12 horas. Essa fase de maior atividade pode ser atribuída ao período de crescimento exponencial das leveduras, caracterizado pela rápida multiplicação celular devido à abundância de açúcares fermentáveis. Após esse período, a atividade fermentativa tende a se estabilizar, indicando uma transição para a fase estacionária, na qual a disponibilidade de nutrientes se torna limitada e o consumo de açúcares diminui (Astolfi et al., 2020).

Esse comportamento também foi observado por Rempel et al. (2019) e Astolfi et al. (2020) que utilizaram a mesma cepa de levedura *Saccharomyces cerevisiae* (CAT-1) e relataram um maior consumo de açúcares redutores nas horas iniciais, com estabilização da fermentação após 16 e 12 horas, respectivamente.

Quanto às diferentes biomassas, observa-se que a produtividade de etanol é influenciada pela disponibilidade de açúcares no meio. A amostra padrão demonstra maior eficiência na conversão de açúcares redutores em comparação com as demais, resultando em uma produtividade final de etanol mais elevada, atingindo 39,02 g/L após 24 horas de fermentação. Em relação à biomassa que não atingiu o padrão de crescimento para o colhimento, obteve-se concentração de etanol de 27,01 g/L mais próxima ao padrão. Esse fator pode ser explicado pela diferença inicial de AR disponível no início da fermentação, fator esse que interferiu diretamente na concentração final de etanol.

Ambas as amostras de cevada pré-germinada e contaminada com DON apresentam concentrações de 21,9 g/L. A baixa eficiência da cevada pré-germinada pode ser explicada por possíveis alterações estruturais no amido presente no grão, dificultando a

conversão de açúcares redutores no processo de hidrólise e conseqüentemente obtendo concentrações de etanol inferiores quando relacionadas à amostra padrão. Já para a cevada contaminada, o rendimento final pode ser afetado pela ação dos contaminantes na levedura, causando estresse ou até mesmo a morte celular, resultando em um rendimento final reduzido (Giacomini et al., 2023).

## 4 CONCLUSÕES

O estudo demonstra o potencial da cevada residual como biomassa alternativa viável para a produção de bioetanol. Embora o rendimento em etanol seja inferior ao da amostra padrão, o uso dessas biomassas oferece benefícios econômicos e ambientais ao promover a economia circular. Aproveitar a cevada residual reduz resíduos agroindustriais e valoriza subprodutos que seriam descartados, resultando em uma alternativa energética renovável e sustentável, alinhada ao uso eficiente dos recursos naturais.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro fornecido para o projeto universal 403786/2021-5, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) – número do processo 21/2551-000223-7. Além disso, reconhecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela fonte de financiamento 001, que foi essencial para este trabalho e válida de 1º de março de 2023 a 28 de fevereiro de 2025. Por fim, estendemos nossa apreciação à Universidade de Passo Fundo (UPF) pela infraestrutura fornecida e aos nossos colegas do Laboratório de Bioquímica e Bioprocessos (LABIO) pela colaboração.

---

## BIOETHANOL PRODUCTION FROM RESIDUAL BARLEY VIA SHF

**ABSTRACT:** Renewable fuel sources, especially bioethanol, have been considered an alternative to the conventional energy matrix; however, there is a need to expand biomass supply for the production of this biofuel. Among them, residual barley stands out due to the high concentrations of carbohydrates in the grain and for being a source that cannot be used in the brewing industry. Therefore, the study aims to use residual barley

for the production of bioethanol by SHF. Standard, growth-deficient, pre-germinated, and mycotoxin-contaminated samples were specified in NIR spectroscopy. The media were prepared with phosphate (pH 5.0) with 15% (w/v) solids, and were subsequently hydrolyzed with the enzymes LpHera ( $\alpha$ -amylase) and Saczyme (amyloglucosidase). The must was sterilized, and 10% (v/v) of *Saccharomyces cerevisiae* inoculum was added. The samples were specified in relation to the concentration of sugars and ethanol every 6 hours for 24 hours. Among the samples, the standard brewing barley obtained a better ethanol concentration of 39.02 g/L after 24 hours, while the stunted barley obtained 27.01 g/L of ethanol, and the contaminated and pre-germinated samples reached the final concentration of 21.9 g/L. Even with yield variations, the use of residual barley for the production of bioethanol brings economic and environmental benefits, reducing agro-industrial waste and creating a renewable and sustainable energy alternative.

**Keywords:** Starch. Contamination. DON. Ethanol. Fermentation.

---

## REFERÊNCIAS

Aruwajoye, G. S., Sewsynker-Sukai, Y. & Kana, E. B. G. (2020). Valorisation of cassava peels through simultaneous saccharification and ethanol production: effect of prehydrolysis time, kinetic assessment and preliminary scale up. *Fuel*, 278, 118351.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118351>

Astolfi, A. L., Rempel, A., Cavanhi, V. A. F., Alves, M., Deamici, K. M., Colla, L. M. & Costa, J. A. V. (2020). Simultaneous saccharification and fermentation of *Spirulina* sp. and corn starch for the production of bioethanol and obtaining biopeptides with high antioxidant activity. *Bioresource Technology*, 301, 122698. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122698>

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122698>

Devos, R. J. B. & Colla, L. M. (2022). Simultaneous saccharification and fermentation to obtain bioethanol: A bibliometric and systematic study. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100924. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100924>

Giacomini, R. X., Acosta, E. R., Cerqueira, M. B. R., Primel, E. G. & Garda-Buffon, J. (2023). Alcoholic Fermentation as a Strategy to Mitigate Pesticides and Mycotoxins. *Food and Bioprocess Technology*, 16(10), 2315–2327. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03070-9>

- Gualano, N. A., Del Fueyo, P. A. & Benech-Arnold, R. L. (2014). Potential longevity (Ki) of malting barley (*Hordeum vulgare* L.) grain lots relates to their degree of pre-germination assessed through different industrial quality parameters. *Journal of Cereal Science*, 60(1), 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.03.003>
- Juodeikiene, G., Cernauskas, D., Trakselyte-Rupsiene, K., Bartkiene, E., Zadeike, D., Banyte, G. & Santini, A. (2020). Acoustic-Based Screening Method for the Detection of Total Aflatoxin in Corn and Biological Detoxification in Bioethanol Production. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00543>
- Juodeikiene, G., Cernauskas, D., Vidmantiene, D., Basinskiene, L., Bartkiene, E., Bakutis, B. & Baliukoniene, V. (2014). Combined fermentation for increasing efficiency of bioethanol production from *Fusarium* sp. contaminated barley biomass. *Catalysis Today*, 223, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.09.028>
- Langenaeken, N. A., De Schepper, C. F., De Schutter, D. P. & Courtin, C. M. (2019). Different gelatinization characteristics of small and large barley starch granules impact their enzymatic hydrolysis and sugar production during mashing. *Food Chemistry*, 295, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.045>
- Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Porto, P. D. (2011). *Tecnologia de fabricação de malte: uma revisão*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10183/56455>
- Persson, M., Galbe, M. & Wallberg, O. (2023). *Mitigation of pretreatment-derived inhibitors during lignocellulosic ethanol fermentation using spent grain as a nitrogen source*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01454-5/Published>
- Rempel, A., de Souza Sossella, F., Margarites, A. C., Astolfi, A. L., Steinmetz, R. L. R., Kunz, A., Treichel, H. & Colla, L. M. (2019). Bioethanol from *Spirulina platensis* biomass and the use of residuals to produce biomethane: An energy efficient approach. *Bioresource Technology*, 288, 121588. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121588>
- Salik, F. L. M. & Povh, N. P. (1993). *Método espectrofotométrico para determinação de teores alcoólicos em misturas hidroalcoólicas*. Congresso Nacional da STAB.
- Yang, M., Kuittinen, S., Zhang, J., Vepsäläinen, J., Keinänen, M. & Pappinen, A. (2015). Co-fermentation of hemicellulose and starch from barley straw and grain for efficient pentoses utilization in acetone-butanol-ethanol production. *Bioresource Technology*, 179, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.005>



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# BIOSSORÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES EM ÁGUAS POR BIOMASSAS MICROBIANAS

*Giovana Marchezi<sup>1</sup>, Júlia Lorenzato da Silva<sup>1</sup>, Luciane Maria Colla<sup>\*1</sup>*

---

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, 99052-900, Passo Fundo, Brasil.

\*E-mail: [lmcolla@upf.br](mailto:lmcolla@upf.br)

# RESUMO

Contaminantes emergentes (CEs) têm gerado preocupações quanto à degradação da qualidade da água, causando sérios danos ambientais e efeitos adversos à saúde humana e animal. A utilização de biossorbentes derivados de microrganismos para a remoção de CEs tem sido destacada nas pesquisas nesta área. Assim, o artigo apresenta uma revisão da literatura sobre a remoção de contaminantes emergentes por meio de biossorção. A eficiência de remoção foi observada com o uso de microrganismos em sua forma ativa ou inativa, assim como na forma imobilizada. A biomassa ativa pode apresentar maior potencial de remoção devido à possibilidade de absorção além da adsorção, mas possui alto custo de produção e é mais sensível à toxicidade do meio. Por outro lado, a biomassa inativa é mais resistente à toxicidade dos contaminantes, econômica e sustentável. A imobilização de microrganismos oferece vantagens, como estabilidade prolongada, facilidade de separação, reutilização e melhoria das propriedades catalíticas. O uso de microalgas foi destacado como uma alternativa sustentável e economicamente viável, pois, além de remover contaminantes emergentes da água, pode ser posteriormente utilizada na produção de biocombustíveis e na captura de carbono. Todos os processos apresentam limitações que dependem do alinhamento entre pesquisa e governança para serem implementados em larga escala.

**Palavras-chave:** Adsorção. Biorremediação. Biotecnologia. Sorção. Microrganismos.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da industrialização causou danos ambientais nas últimas décadas, em especial aos recursos hídricos (Priya et al., 2022). Os contaminantes emergentes (CEs) têm gerado considerável preocupação devido à sua capacidade de degradar significativamente a qualidade da água. Estes se acumulam na cadeia alimentar resultando em sérios problemas (Kushwaha; Rani; Patra, 2019), como efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. Embora tenham sido descobertos no século XIX, apenas em estudos recentes foram reconhecidos como poluentes perigosos (Toldboom et al., 2019; Ahmed et al., 2017; Grassi, 2012). Os CEs abrangem uma variedade de compostos altamente polares e ácidos/alcalinos, incluindo produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais. CEs podem ser classificados como hormônios, dioxinas, pesticidas, surfactantes, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), compostos alquilfenólicos,



nanomateriais e substâncias perfluoradas (Ahmed et al., 2021). Além disso, alguns metais como chumbo, mercúrio, cádmio e arsênio também podem ser considerados CEs, uma vez que são tóxicos aos seres humanos em concentrações muito baixas (Tchounwou et al., 2012). A detecção desses poluentes na água destaca a necessidade de monitoramento rigoroso e regulamentação para mitigar os impactos adversos na saúde humana e no ecossistema aquático (Ahmed et al., 2021).

Esses contaminantes estão presentes em concentrações muito baixas de ng/L a µg/L (Ahmed et al., 2021). Devido a isso, as técnicas convencionais de tratamento de efluentes são ineficientes na sua remoção. Processos de tratamento avançados, como ozonização, adsorção, filtração por membrana são consideradas eficazes para a remoção desses contaminantes (Ahmed et al., 2021). Os processos que envolvem a sorção se mostram uma alternativa promissora para remoção de CEs. Dentro desse processo, a utilização de biossorventes, derivados de materiais biológicos, microrganismos, plantas e resíduos agrícolas têm se destacado. Biossorventes, que utilizam biomassa microbiana, possuem bastante versatilidade de aplicação, pois permitem a utilização de microrganismos em sua forma ativa ou inativa, além da possibilidade de imobilização em outros materiais. Estudos mostram que a biomassa de bactérias, microalgas e fungos apresentaram propriedades de sorção para a remoção de contaminantes da água (Mirizadeh et al., 2023).

A natureza diversificada dos microrganismos oferece uma variedade de sítios ativos e grupos funcionais que podem interagir de maneira seletiva com os contaminantes, resultando em processos de remoção eficientes. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi realizar uma revisão bibliográfica a fim de avaliar a técnica de biossorção com diferentes biomassas microbianas e sua eficiência na remoção de contaminantes emergentes das águas.

## 2 METODOLOGIA DE PESQUISA

### 2.1. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A presente revisão de literatura buscou evidenciar a utilização da técnica de sorção para a remoção de contaminantes emergentes presentes na água através do uso de biomassa microbiana como biossorvente. A análise bibliométrica foi realizada com objetivo de identificar tendências e estudos relacionados ao escopo do trabalho. A busca foi realizada na base de dados Scopus, os termos utilizados foram: biosorption AND

“microbial biomass”, utilizando o inglês para a busca de títulos, resumo e palavras-chave em artigos de pesquisa. Foi delimitado o período de 2008 a 2024, devido apresentar um aumento no número de publicações, para a busca de artigos para compor a revisão bibliográfica. A seleção dos artigos foi feita a partir da leitura do título e do resumo de documentos que apresentavam informações sobre biomassa microbiana e CEs. A busca resultou em um total de 314 artigos. Para analisar as palavras-chave de maior ocorrência foi utilizado o *software VOSviewer*. 787 palavras-chave foram encontradas, sendo que o número de ocorrência de 5 foi selecionado, resultando assim em 35 palavras-chave. Esses resultados estão apresentados na Figura 1.

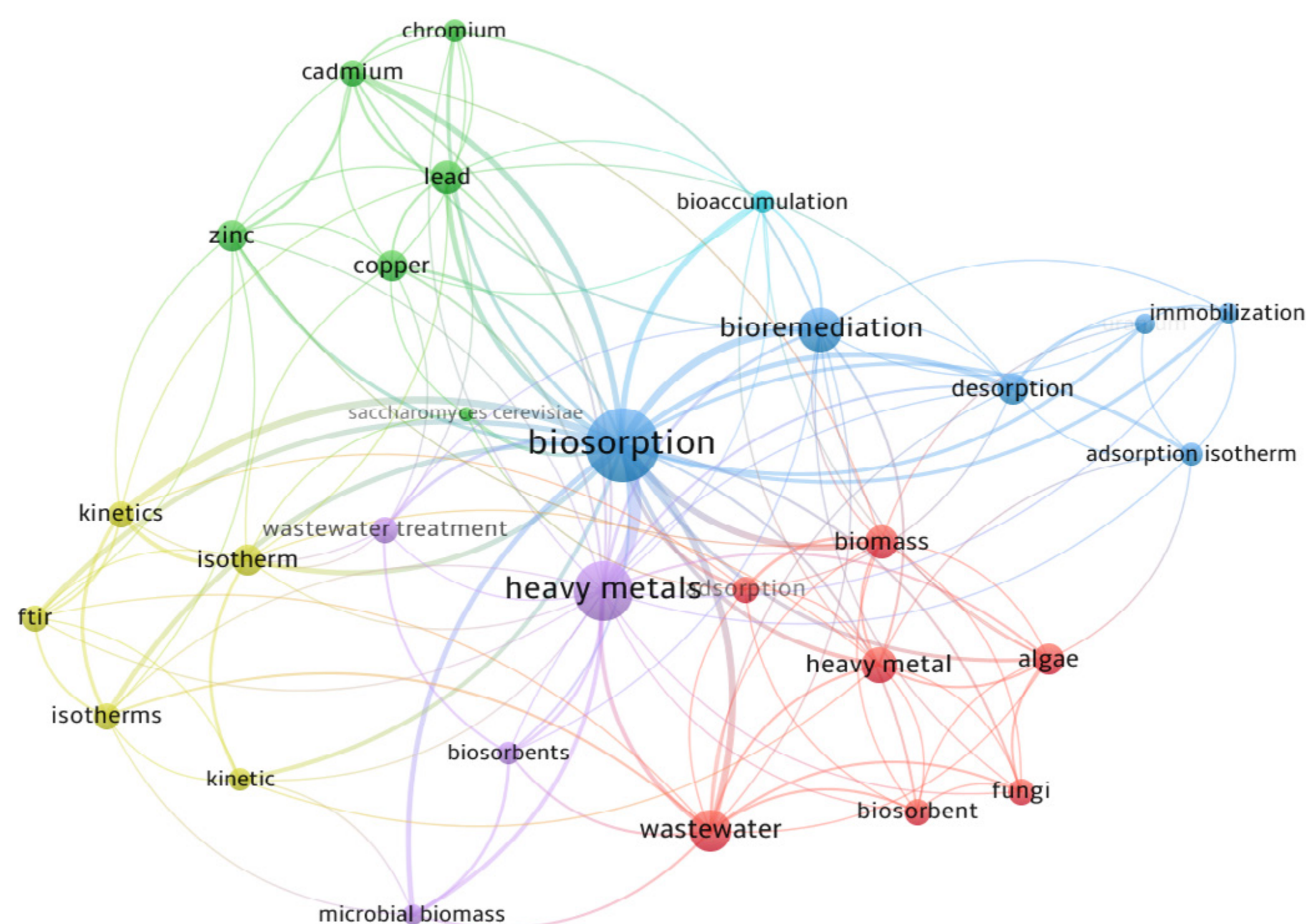


Figura 1. Rede de palavras-chave de maior ocorrência.

Os *clusters* apresentados na Figura 1 foram utilizados para determinar os tópicos a serem abordados na presente revisão.

## 3 FUNDAMENTOS DA TÉCNICA DE BIOSORÇÃO

A biossorção envolve o uso de biomoléculas, como biomassa de microrganismos, para remover substâncias indesejadas de uma solução, como os contaminantes emergentes. A sorção envolve a absorção ou adsorção de moléculas por uma substância sólida ou líquida. A absorção refere-se à inserção de moléculas de uma substância em toda a massa da outra. Já a adsorção refere-se à adesão de moléculas de uma substância à superfície de outra (Fomina & Gadd, 2014). A Figura 2 apresenta os mecanismos de adsorção e absorção de contaminantes.

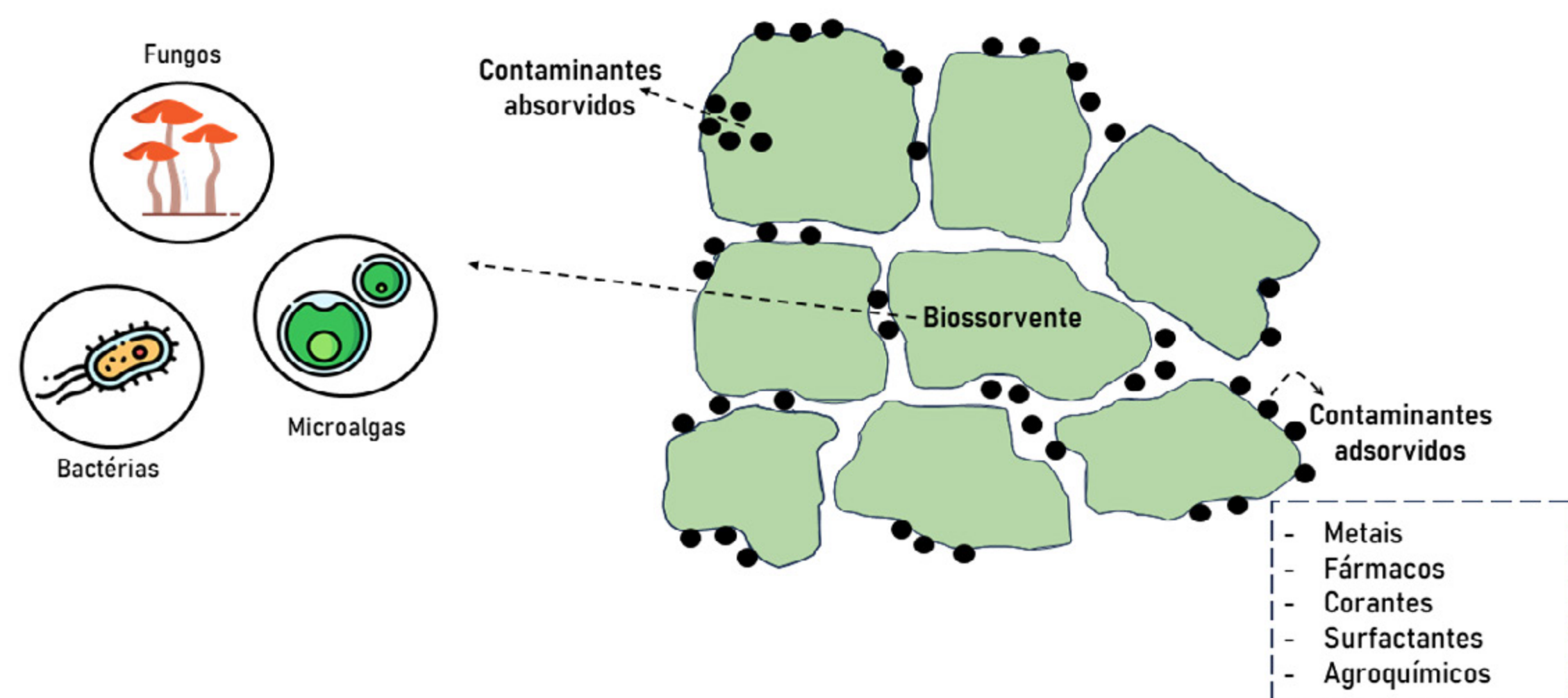


Figura 2. Mecanismo de adsorção e absorção de contaminantes utilizando um bioissorvente

Gu e Lan (2024) identificaram a bioissorção de metais pesados, com o uso de microalgas, em duas etapas. Primeiramente ocorre a adsorção, devido aos grupos funcionais carregados negativamente (polissacarídeos, lipídeos e proteínas) presentes na parede celular das microalgas, o que atrai os contaminantes carregados positivamente, por meio de interação eletrostática. Em seguida, os contaminantes adsorvidos na superfície podem ser transportados para o interior da célula através da absorção.

Assim, o processo de bioissorção pode envolver quimissorção, complexação, adsorção-complexação na superfície e nos poros, troca iônica, microprecipitação e adsorção na superfície. Além disso, através da respiração, fermentação e metabolismo, os microrganismos podem utilizar compostos perigosos como fonte de energia para o crescimento e desenvolvimento (Priya et al., 2022).

A sorção pode ser influenciada por diversos parâmetros físico-químicos, como pH, temperatura, tamanho das partículas de bioissorvente e concentração inicial do contaminante na solução (Blaga et al., 2022; Nateras-Ramírez et al., 2022). O pH é um dos fatores que mais afeta o processo de sorção, pois altera a carga superficial ativa do bioissorvente e promove a especiação do adsorbato dissolvido (Mirizadeh et al., 2023). Para que o efeito do pH da solução sobre a carga superficial do bioissorvente seja conhecido, é necessário que se determine o ponto de carga zero ( $\text{pH}_{\text{PCZ}}$ ) (Yagub et al., 2014). O  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  é o pH na qual a carga da superfície do bioissorvente é igual a zero. Abaixo do  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  a superfície do material é carregada positivamente, permitindo interações com ânions por ligações eletrostáticas. Por outro lado, quando o pH se encontra acima do  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$ , a superfície do material está carregada negativamente, aumentando a afinidade por compostos catiônicos (Kodama & Sekiguchi, 2006). Assim, a escolha do pH adequado pode aumentar a eficiência de adsorção, uma vez que influencia na afinidade entre grupos ativos do bioissorvente e contaminantes. Além disso, o valor do pH pode limitar o

crescimento de alguns microrganismos. As bactérias (procariotos), por exemplo, podem apresentar uma maior resistência a variações de pH, sendo até mesmo mais eficientes em ambientes extremos. Já as células eucarióticas, de modo geral, têm uma faixa de pH mais estreita para manter suas funções biológicas normais.

A temperatura afeta a taxa de reação, assim quando a temperatura é alta, a taxa de bioadsorção também é alta devido ao aumento da atividade superficial e energia cinética do sorbato. Porém, a temperatura além do valor ideal resulta em danos à superfície de microrganismos vivos, diminuindo a taxa de bioadsorção (Yaashikaa et al., 2021). O tamanho de partícula do bioadsorvente pode influenciar na área superficial e também na capacidade de reutilização. O contaminante é adsorvido na superfície do biomaterial, logo, quanto menor suas partículas, maior sua área superficial e maior tende a ser sua capacidade de adsorção.

A bioadsorção também pode ser classificada em dois tipos: ativa e passiva. A bioadsorção ativa é um procedimento no qual a biomassa microbiana extrai contaminantes por meio de atividades metabólicas. A biomassa emprega enzimas para converter o contaminante em uma forma mais estável e menos tóxica, para depois integrar o contaminante em sua estrutura celular. Já a bioadsorção passiva é um procedimento no qual a biomassa microbiana elimina contaminantes sem depender de metabólitos celulares. Nesse processo, as moléculas contaminantes se ligam à superfície da célula bacteriana, estabelecendo ligações químicas devido a interações eletrostáticas e cargas presentes na superfície celular (Mohapatra et al., 2019).

Assim, a bioadsorção passiva é fundamentada na técnica de adsorção. A adsorção se baseia em princípios como a interação do bioadsorvente com o contaminante. As interações podem ser físicas (por exemplo, Van der Waals, forças eletrostáticas e pontes de hidrogênio) ou químicas (por exemplo, formação de íons entre espécies de cargas opostas). As isotermas de adsorção têm a finalidade de quantificar a relação entre a concentração de um soluto ou adsorbato e a quantidade de adsorvente que o retém em equilíbrio, a uma temperatura específica. Estas isotermas desempenham um papel crucial na compreensão do processo de adsorção em superfícies sólidas. Ao empregar isotermas de adsorção, torna-se viável determinar a quantidade máxima de adsorvente capaz de ser retida por uma quantidade determinada de adsorbato, avaliar a eficiência da adsorção e investigar a afinidade dos adsorbatos pelos adsorventes (Kargar & Shirazi, 2020). A partir dessas informações, é possível realizar a seleção do adsorvente mais apropriado para uma aplicação específica e ajustar as condições operacionais visando alcançar a eficiência máxima no processo de adsorção de solutos (Dos Santos et al., 2022).

Dessa forma, pode-se perceber que a técnica de bioissorção para remoção de contaminantes emergentes é evidenciada, sendo que a biomassa ativa e passiva de microrganismos pode ser empregada como bioissorvente, garantindo uma maior sustentabilidade do processo.

## 4 BIOMASSA MICROBIANA COMO BIOSSORVENTE NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

A biomassa microbiana é uma alternativa para a remoção de CEs em meio líquido. A biomassa de bactérias, microalgas e fungos têm apresentado propriedades desejáveis de sorção para o tratamento de águas residuais (Mirizadeh et al., 2023). A bioissorção de contaminantes, por organismos procariontes e eucariontes, é um fenômeno complexo e dinâmico que se desenrola por meio de diversos mecanismos adaptativos. Tanto procariontes quanto eucariontes utilizam estratégias semelhantes aos processos físico-químicos de adsorção e troca iônica para se engajarem nesse processo (Ghorbani et al., 2022; Lo et al., 2014).

Nos procariontes, destaca-se a produção de substâncias poliméricas extracelulares (SPE), ricas em grupos funcionais como carboxilas, enóis, amidas, aminas e hidroxilas. Esses grupos funcionais possuem a capacidade de estabelecer ligações químicas com os contaminantes, resultando em uma eficaz capacidade de adsorção. Adicionalmente, certos procariontes apresentam organelas celulares especializadas, como a bainha envolvente das cianobactérias, que desempenham um papel crucial na absorção de contaminantes, contribuindo para a adaptação desses organismos aos ambientes metalíferos. Essa habilidade de bioissorção é vital para lidar com a presença de contaminantes, e suas aplicações práticas incluem processos de descontaminação ambiental e recuperação de contaminantes em soluções aquosas (Ghorbani et al., 2022).

Já nos eucariontes, a bioissorção é frequentemente considerada como um processo metabolicamente independente, em contraste com a bioacumulação, que está intimamente ligada à sobrevivência celular. Mesmo na ausência de viabilidade celular, as células eucariontes demonstram a capacidade de adsorver contaminantes nos compartimentos extracelulares por meio da ligação ou fixação em grupos funcionais na superfície celular. Essa eficiência na adsorção, muitas vezes não sujeita à regulação metabólica, possibilita uma rápida taxa de adsorção de contaminantes. Esses mecanismos adaptativos evidenciam a notável versatilidade e capacidade de resposta

dos organismos, tanto procariontes quanto eucariontes, aos desafios impostos pela presença de contaminantes em seus ambientes (Lo et al., 2014).

Além disso, a biomassa de microrganismos pode ser utilizada em diferentes formas e estados, como imobilizada, ativa e inativa ou morta, sendo uma estratégia bastante versátil e possibilitando diversas aplicações (El-Sheekh et al., 2020).

## 4.1. BIOMASSA ATIVA

A biomassa microbiana ativa é aquela que está metabolicamente ativa, ou seja, que está realizando atividades biológicas (Ferreira et al., 2016). No estudo realizado por Santaefemia et al. (2016), tanto a biomassa viva quanto a morta da microalga *Phaeodactylum tricornutum* foram utilizadas na remoção de oxitetraciclina, um antibiótico pertencente ao grupo das tetraciclina, sendo amplamente encontrado na água. A oxitetraciclina é sensível à fotodegradação e como o cultivo de microalgas necessita de luz, foram realizados experimentos de controle sem biomassa, mas sob as mesmas condições de exposição, e experimentos de controle no escuro. Assim, a combinação da biomassa viva e da fotodegradação permitiram uma remoção de 97% do fármaco de uma concentração inicial de 2,5 mg/L em 11 h, sendo que o mecanismo de remoção foi principalmente a biossorção do que por fotodegradação. A biomassa viva da microalga *Chlorella vulgaris* também apresentou maior capacidade de biossorção do fármaco flutamida, utilizado no tratamento de câncer, em comparação com a biomassa morta, de acordo com o estudo de Habibzadeh, Chaibakhsh e Naeemib (2018). A capacidade máxima de sorção da biomassa viva foi de 26,8 mg/g e de 12,5 mg/g para a biomassa morta. Assim, além do mecanismo de adsorção, as células vivas podem remover substâncias por bioacumulação, biotransformação ou biodegradação.

A capacidade de biossorção do Arsênio (V), a partir de soluções aquosas, utilizando células vivas da bactéria *Bacillus cereus* demonstrou eficácia de 86% de remoção do contaminante. Os fatores investigados, como pH, tempo de contato, temperatura e quantidade de biossorvente, impactaram de forma significativa na capacidade de biossorção do metal pesado pela bactéria *Bacillus cereus*. Em relação ao pH, a sorção de As(V) foi mais efetiva em condições neutras. A dosagem do biossorvente influenciou a remoção eficiente dos íons arsenato, variando de acordo com a concentração inicial. Ademais, em relação à temperatura, a remoção foi mais eficiente em 30°C e alcançou o equilíbrio após 60 minutos. A eficiência em relação ao tempo da biossorção aumentou significativamente em até 30 minutos e depois se manteve praticamente constante (Giri, Patel & Mishra, 2012).

Assim, apesar de a biomassa ativa apresentar capacidade de bio sorção evidenciada, requer condições específicas, como temperatura, pH e nutrientes, para manter a atividade metabólica dos microrganismos. Além disso, necessita de cultivo e manutenção do microrganismo, envolvendo um custo operacional elevado. No estudo de Rosca et al. (2022), foi demonstrado que a utilização de microrganismos viáveis para a remoção de cromo de águas residuais apresenta desvantagem, uma vez que a célula viva é afetada pela toxicidade do metal pesado, já que através da bioacumulação pode atingir concentrações ao nível das células e que podem causar morte celular. Assim, uma alternativa é a utilização da biomassa inativa ou morta.

## 4.2. BIOMASSA INATIVA OU MORTA

A biomassa microbiana inativa ou morta pode servir como um bio sorvente eficiente e econômico, removendo contaminantes de águas residuais. A biomassa microbiana inativa é aquela que está metabolicamente inativa, ou seja, que não está realizando atividades biológicas (Grassi et al., 2019).

Os bio sorventes apresentam especificidades influenciadas pelas condições operacionais do processo, e do tipo de contaminante a ser removido, como pode ser observado na Tabela 3. A remoção de  $\text{Cr}^{6+}$  por biomassa inativa da bactéria *Bacillus megaterium* foi influenciada pelo pH da solução (pH 1,0). A redução foi o principal mecanismo envolvido na bio sorção do metal, sendo que o  $\text{Cr}^{6+}$  foi reduzido a sua forma trivalente. Os resultados experimentais mostraram que a bio sorção segue o modelo cinético de Elovich, que sugere uma diminuição exponencial da taxa de bio sorção de  $\text{Cr}^{6+}$  à medida que a quantidade de  $\text{Cr}^{6+}$  bio sorvido aumenta. O modelo isotérmico de Freundlich melhor descreveu o equilíbrio de bio sorção (Rosca et al., 2022). No estudo de Nateras-Ramírez et al. (2022), a microalga *Nannochloropsis oculata* foi utilizada na bio sorção de  $\text{Pb}^{2+}$  e  $\text{Cd}^{2+}$ , sendo que os resultados de FTIR evidenciaram que  $\text{Pb}^{2+}$  e  $\text{Cd}^{2+}$  interagiram com os grupos funcionais carboxila, amina e hidroxila. Além disso, a microalga apresentou maior seletividade de remoção de  $\text{Pb}^{2+}$  do que de  $\text{Cd}^{2+}$ . Assim, as microalgas podem remover grandes quantidades de contaminantes e com baixo custo, sendo uma opção atrativa em relação a outros microrganismos.

Microrganismos isolados de um sistema de coleta de lodo de esgoto foram utilizados para a remoção de fenol e chumbo de soluções aquosas, sendo realizada uma comparação entre microrganismos vivos e mortos. Os microrganismos mortos foram mais eficientes (Sulaymon, Abbood & Ali, 2012). Segundo os autores, tanto o fenol quanto o chumbo são tóxicos para os microrganismos vivos, reduzindo sua capacidade de sorção com o

passar do tempo. Assim, a utilização de células vivas na bioissorção pode ser afetada pela toxicidade dos contaminantes, que através da bioacumulação pode atingir concentrações ao nível das células causando sua morte (Rosca et al., 2022). O uso de células microbianas inativas apresenta vantagem, pois a eficácia do bioissorvente não é afetada pela toxicidade do contaminante retido (Rosca et al., 2022). Além disso, a biomassa microbiana inativa pode ser proveniente de subprodutos industriais ou agrícolas, o que pode ser uma opção mais econômica e sustentável em comparação com a biomassa microbiana viva.

Os autores Danouche, El Arroussi e El Ghachtouli (2024) divulgaram a eficácia de uma cepa de levedura na remoção de um corante específico. A biomassa da levedura *Wickerhamomyces anomalus* demonstrou uma capacidade máxima de bioissorção de 71,37 mg/g para o corante vermelho-ácido 14. Os resultados indicaram que o pH, a concentração inicial do corante e a quantidade de biomassa tiveram um impacto significativo na taxa de bioissorção. A remoção máxima do corante atingiu 77% quando otimizados os seguintes parâmetros: pH entre 3 e 4, concentração inicial de corante entre 50 e 75 mg/L, e dose de biomassa de 1,25 g/L. De maneira geral, os resultados sugerem que a biomassa da levedura *Wickerhamomyces anomalus* pode ser uma alternativa eficiente e natural como bioissorvente para a remoção do corante vermelho-ácido 14, aproveitando nutrientes provenientes de fontes diversas para benefícios econômicos e ambientais.

Contudo, a fragilidade dos microrganismos diante dos contaminantes e das condições adversas do efluente líquido pode comprometer a eficiência do processo. Assim, alternativas vêm sendo estudadas para aumentar a estabilidade da biomassa e torná-las viáveis por mais tempo e em diferentes condições operacionais.

### 4.3. BIOMASSA IMOBILIZADA

Apesar da utilização de fungos e bactérias como bioissorventes ser evidenciada na literatura, sabe-se que apresentam baixa estabilidade térmica e mecânica. Além disso, devido ao tamanho de célula, não podem ser reutilizados e empregados em sistemas de coluna de leito fixo, sistema usualmente utilizado na indústria. Assim, pode-se utilizar técnicas como incorporação e imobilização em diferentes matrizes. A imobilização de microrganismos oferece a vantagem de manter sua funcionalidade específica, permitindo a realização de processos metabólicos desejados (El-Sheekh et al., 2020). Além disso, a imobilização pode aumentar a estabilidade operacional das células, protegê-las de impactos de pH, temperaturas e inibidores e diminuir a possibilidade de contaminação de culturas celulares (Dawwam et al., 2023; Suteu et al., 2021).



A imobilização de microrganismos em matrizes poliméricas pode ocorrer através de ligação covalente, reticulação, encapsulamento ou aprisionamento (Rusu et al., 2023). A biomassa morta da bactéria *Paenibacillus dendritiformis*, com resistência ao metal chumbo ( $Pb^{2+}$ ), foi incorporada em polietersulfona com o objetivo de obter uma membrana adsortiva hidrofílica. O biossorvente removeu 98% de  $Pb^{2+}$  da água de uma concentração inicial de 200 mg/L. O modelo isotérmico de Freundlich se adaptou melhor aos dados de sorção, descrevendo um processo de adsorção multicamadas e heterogênea de moléculas na superfície do biossorvente (Dawwam et al., 2023).

A biomassa microbiana residual de *Saccharomyces pastorianus* foi investigada por Suteu et al. (2021). Os autores estudaram suas propriedades como biossorvente, quando encapsulada em alginato de sódio, visando sua aplicação na remoção do corante reativo Brilliant Red HE-3B de soluções aquosas contaminadas. Os pesquisadores concluíram que o biossorvente à base de resíduos de biomassa, encapsulado em alginato de sódio, demonstrou ser altamente eficaz na remoção do corante. Além disso, observaram que o processo de adsorção é predominantemente regido pela isoterma de Langmuir e que é de natureza exotérmica. Também destacaram que o encapsulamento da biomassa de células microbianas residuais em alginato de sódio facilita e melhora a eficiência do manuseio do biossorvente.

O estudo conduzido por Azeez e Al-Zuhairi (2022) demonstrou a eficácia da levedura *Saccharomyces cerevisiae* imobilizada na superfície de nanopartículas magnéticas de  $Fe_3O_4$  na remoção de outro tipo de corante, o corante alaranjado de metila, em solução aquosa. A imobilização das células de levedura foi realizada através do método de adsorção física, envolvendo a adição das células à mistura com as nanopartículas magnéticas e a agitação conjunta por 24 horas. Assim, as células carregadas com as nanopartículas foram separadas usando um ímã permanente e submetidas a várias lavagens com água destilada e solução fisiológica antes de serem utilizadas no processo de biossorção. Os resultados obtidos indicaram que a imobilização das células da levedura na superfície das nanopartículas magnéticas de  $Fe_3O_4$  resultou no aumento da área superficial, o que conseqüentemente aumentou a capacidade de biossorção e eficiência na remoção do corante. Sob as condições ótimas estabelecidas, que incluíram um pH de 6,5, concentração inicial de corante de 50 mg/L, dosagem de biossorvente de 1,5g/L, agitação a 110 rpm e temperatura de 35 °C, foi alcançada uma significativa eficiência de remoção de corante, atingindo 96,52%.

O trabalho de Rusu et al. (2022) também utilizou a biomassa residual imobilizada de *Saccharomyces pastorianus*, porém para a biossorção do antibacteriano Lactato de

etacridina (EL). A biomassa residual de *Saccharomyces pastorianus* foi imobilizada em alginato de cálcio, baseando-se em um biocompósito natural. Os valores mais altos de eficiência de remoção e capacidade de bioissorção foram obtidos em concentração inicial de EL de aproximadamente 60 mg/L, tempo de contato de 94 minutos e velocidade de agitação de 300 rpm, com aproveitamento máximo de 89,49% e 26,04 mg/g, respectivamente.

Biossorbentes à base de quitosana, magnetita e microalga (*Chlorella vulgaris* ou *Arthrospira platensis*) foram avaliados frente à remoção de antibióticos, sendo eles tetraciclina, ciprofloxacina e amoxicilina (Mirizadeh et al., 2023). Os biossorbentes foram regenerados através de tratamento assistido por micro-ondas e reutilizados repetidamente por até quatro ciclos (Mirizadeh et al., 2023). Assim, o uso combinado de microalgas e quitosana oferece uma solução econômica e ambientalmente correta, uma vez que ambos apresentam disponibilidade e são renováveis, além disso, a incorporação de magnetita facilita a recuperação através da aplicação de um campo magnético (Mirizadeh et al., 2023).

A utilização de microalgas tem se mostrado promissora, pois além de realizarem a remoção de metais pesados e nutrientes, também podem ser, posteriormente, aproveitadas em processos de biorrefinaria, agregando valor econômico. Geram grandes quantidades de óleo e biomassa, cujo amido e celulose podem ser convertidos, sendo uma ótima fonte de bioetanol de segunda geração. Uma outra vantagem da utilização da microalga como bioenergia é não competir com grãos utilizados na alimentação, como a soja. Além disso, seu uso posterior à biorremediação não compromete terras cultiváveis, que podem ser usadas para a produção de alimentos (Ortenzio, 2015).

As microalgas são microrganismos que também realizam fotossíntese, capazes portanto de remover o carbono atmosférico, sendo capazes de utilizar tanto carbono orgânico quanto inorgânico (Franco, 2013). Contudo, assim como as demais técnicas e formas de biomassa apresentadas, ainda existem limitações para sua utilização.

## 5 DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A abordagem sobre processo de tratamento avançado para remoção de contaminantes emergentes ainda é bastante complexa. Diante da enorme variedade de microrganismos existentes, os estudos desenvolvidos sobre o tema ainda são poucos. Desta forma, o maior desafio para implantação do processo de bioissorção está na identificação do biossorbente adequado para cada contaminante emergente, bem como a sua eficiência em cada

condição de exposição ao contaminante. Como se trata de uma fonte microbiana, seu comportamento é bastante sensível às condições do meio, e pode não apresentar a eficiência esperada e até já obtida em outras situações.

Algumas tendências podem ser traçadas, de acordo com os artigos estudados, sendo uma maior remoção de metais pesados com uso de biomassa inativa, a qual não sofreria com a toxicidade desses compostos, o que ocorre com as células vivas. Contudo, na utilização de biomassa ativa, o processo de sorção é mais amplo, podendo ocorrer além da adsorção, na superfície do bioissorvente, a absorção do contaminante em seu interior, aumentando o potencial de imobilização deste no meio. Por outro lado, com relação à aplicabilidade da bioissorção em grande escala, é importante pensar no custo de produção desses microrganismos. Desse modo, a utilização de biomassa inativa, proveniente de resíduos agrícolas, pode ser uma opção viável economicamente além de sustentável.

Se torna evidente também a necessidade de destinação para o bioissorvente. Diante disso, uma das etapas importantes no desenvolvimento de tecnologias baseadas em bioissorção é a dessorção do bioissorvente carregado, que permite a reutilização da biomassa e a recuperação e/ou contenção de sorbatos (Fomina & Gadd, 2014). Além da dessorção, pode-se pensar em outros destinos para esse bioissorvente carregado, como biorrefinarias de etanol.

A utilização de microalgas, por exemplo, pode apresentar vantagens adicionais. Além de realizar a remoção de contaminantes emergentes do meio líquido, pode fazer a captação de carbono atmosférico. Uma estratégia seria a utilização de microalgas para tratamento de efluente, aproveitando seu potencial de crescimento e captação de carbono atmosférico. Posteriormente, poderia ser inserida no processo de biorrefinarias. O desafio seria manter a qualidade dessa biomassa, para que seja uma fonte rentável, uma vez que são cultivadas em lagoas abertas, de difícil colheita e passíveis de contaminações.

A gestão e governança adequadas são essenciais para que as pesquisas acadêmicas sobre bioissorção de contaminantes emergentes se traduzam em tecnologias a favor da sociedade, transformando resíduos em fontes de renda. Tais tecnologias, por sua vez, contribuem diretamente para o alcance os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas integrados na agenda 2030, contribuindo diretamente com dois objetivos: ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), visando garantir que todos tenham acesso à água potável segura e saneamento adequado, promovendo uma gestão sustentável dos recursos hídricos. A bioissorção de contaminantes emergentes desempenha um papel vital neste contexto, oferecendo

uma abordagem eficaz para a remoção de poluentes da água, o que torna a água mais segura para consumo humano e para o meio ambiente. E, também, com o ODS 14 (Vida na Água), concentrando-se na conservação e no uso sustentável dos oceanos, mares e recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável. A biossorção de contaminantes emergentes pode contribuir significativamente para a proteção da vida marinha, eliminando substâncias tóxicas que representam uma ameaça para os ecossistemas aquáticos e para a biodiversidade. Ademais, a pesquisa e implementação de tecnologias de biossorção de contaminantes emergentes também podem apoiar outros ODS, como o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) ao melhorar a qualidade da água para consumo humano, e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) promovendo práticas sustentáveis no tratamento de água e gestão de resíduos. Assim, a biossorção emerge como uma ferramenta crucial para alcançar múltiplos objetivos de desenvolvimento sustentável, fortalecendo os esforços globais rumo a um futuro mais sustentável e saudável.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código Financeiro 001), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS 07/2021 – Programa Pesquisador Gaúcho – PqG, 21/2551-0002165-9) e a Universidade de Passo Fundo (UPF).

---

## MICROBIAL BIOMASS AS A BIOSORBENT FOR THE REMOVAL OF EMERGING CONTAMINANTS FROM WATER: A REVIEW

**ABSTRACT:** Emerging contaminants (ECs) have raised concerns for degrading water quality, causing serious environmental damage, and adverse effects on human and animal health. The utilization of biosorbents derived from microorganisms for ECs removal has been highlighted in research in this area. Therefore, the article presents a literature review on the removal of emerging contaminants through biosorption. The removal efficiency was observed using microorganisms in their active or inactive form, as well as in immobilized form. Active biomass may exhibit higher removal potential due to the possibility of absorption beyond adsorption, but it has a high production cost and is more sensitive to medium toxicity. On the other hand, inactive biomass is more resistant to contaminant toxicity, economical, and sustainable. The immobilization

of microorganisms offers advantages such as prolonged stability, ease of separation, reusability, and enhancement of catalytic properties. The use of microalgae was highlighted as a sustainable and economically viable alternative, as besides removing emerging contaminants from water, it can be subsequently used in biofuel production and carbon capture. All processes have limitations that depend on the alignment between research and governance to be implemented on a large scale.

**Keywords:** Adsorption. Bioremediation. Biotechnology. Sorption. Microorganisms.

---

## REFERÊNCIAS

Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S. & Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 274–298.

Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Raza, N., Uddin, M. A., Inayat, A., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chia, W. Y. & Show, P. L. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125912.

Azeez, R. A. & Al-Zuhairi, F. K. I. (2022). Biosorption of dye by immobilized yeast cells on the surface of magnetic nanoparticles. *Alexandria Engineering Journal*, 61, 5213–5222.

Blaga, A. C., Tanasă, A. M., Cimpoesu, R., Tataru-Farmus, R. E., Suteu, D. (2022). Biosorbents Based on Biopolymers from Natural Sources and Food Waste to Retain the Methylene Blue Dye from the Aqueous Medium. *Polymers*, 14, 2728.

Danouche, M., Arroussi, H. E. & El Ghachtouli, N. (2024). Bioremoval of Acid Red 14 dye by *Wickerhamomyces anomalus* biomass: kinetic and thermodynamic study, characterization of physicochemical interactions, and statistical optimization of the biosorption process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14.

Dawwam, G. E., Abdelfattah, N. M., Abdel-Monem, M. O., Jahin, H. S., Omer, A. M., Abou-Taleb, K. A. & Mansor, E. S. (2023). An immobilized biosorbent from *Paenibacillus dendritiformis* dead cells and polyethersulfone for the sustainable bioremediation of lead from wastewater. *Scientific Reports*, 13, 891.

- El-Sheekh, M., El-Sabagh, S., Elsoud, G. A., Elbeltagy, A. (2020). Efficacy of Immobilized Biomass of the Seaweeds *Ulva lactuca* and *Ulva fasciata* for Cadmium Biosorption. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, 44, 37–49.
- Ferreira, V. R. A., Amorim, C. L., Cravo, S. C., Tiritan, M. E., Castro, P. M. L., Afonso, C. M. M. (2016). Fluoroquinolones biosorption onto microbial biomass: activated sludge and aerobic granular sludge. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 110, 53–60.
- Fomina, M. & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, 160, 3–14.
- Franco, A. L. C., Lôbo, I. P., Cruz, R. S. da, Teixeira, C. M. L. L., Almeida Neto, J. A. de & Menezes, R. S. (2013). Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. *Química Nova*, 36, 437.
- Ghorbani, E., Nowruzi, B., Nezhadali, M. & Hekmat, A. (2022). Metal removal capability of two cyanobacterial species in autotrophic and mixotrophic mode of nutrition. *BMC Microbiology*, 22, 58.
- Giri, A. K., Patel, R. K. & Mishra, P. C. (2012). Biosorption of As(V) from aqueous solutions by living cells of *Bacillus cereus*. *Water Science & Technology*, 66.
- Grassi, M., Kaykioglu, G., Belgiorno, V. & Lofrano, G. (2012). Removal of Emerging Contaminants from Water and Wastewater by Adsorption Process. In: *Emerging Compounds Removal from Wastewater*, 15–37.
- Grassi, P., Reis, C., Drumm, F. C., Georgin, J., Tonato, D., Escudero, L. B., Kuhn, R., Jahn, S. L. & Dotto, G. L. (2019). Biosorption of crystal violet dye using inactive biomass of the fungus *Diaporthe schini*. *Water Science & Technology*, 79, 709–717.
- Gu, S. & Lan, C. Q. (2024). Mechanism of heavy metal ion biosorption by microalgal cells: a mathematic approach. *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132875.
- Habibzadeh, M., Chaibaksh, N. & Naeemi, A. S. (2018). Optimized treatment of wastewater containing cytotoxic drugs by living and dead biomass of the freshwater microalga, *Chlorella vulgaris*. *Ecological Engineering*, 111, 85–93.
- Kargar, S. H. M. & Shirazi, N. H. (2020). *Lactobacillus fermentum* and *Lactobacillus plantarum* bioremediation ability assessment for copper and zinc. *Archives of Microbiology*, 202, 1957–1963.

- Kodama, S. & Sekiguchi, H. (2006). Estimation of point of zero charge for activated carbon treated with atmospheric pressure non-thermal oxygen plasmas. *Thin Solid Films*, 506, 327–330.
- Kushwaha, A., Rani, R. & Patra, J. K. (2019). Adsorption kinetics and molecular interactions of lead [Pb(II)] with natural clay and humic acid. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17.
- Lo, Y.-C., Cheng, C. L., Han, Y. L., Chen, B. Y. & Chang, J. S. (2014). Recovery of high-value metals from geothermal sites by biosorption and bioaccumulation. *Bioresource Technology*, 160, 182–190.
- Mirizadeh, S., Solisio, C., Converti, A. Casazza, A. A. (2023). Efficient removal of tetracycline, ciprofloxacin, and amoxicillin by novel magnetic chitosan/microalgae biocomposites. *Separation and Purification Technology*, 329, 125115.
- Mohapatra, R. K., Parhi, P. K., Pandey, S., Bindhani, B. K., Thatoi, H. & Panda, C. R. (2019). Active and passive biosorption of Pb(II) using live and dead biomass of marine bacterium *Bacillus xiamenensis* PbRPSD202: Kinetics and isotherm studies. *Journal of Environmental Management*, 247, 121–134.
- Nateras-Ramírez, O., López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D. I., Aguilar-Ruiz, R. J., Martínez-Macias, M. R. (2022). Kinetic modeling of Cd (II) and Pb (II) biosorption from aqueous solution by inactive biomass of *Nannochloropsis oculata* microalgae. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233, 184.
- Ortenzio, Y. T., Amaral, G. G., Almeida, S. dos S., Oliveira, E. C. A. M. de. (2015). Cultivo de microalgas utilizando resíduos agroindustriais para a produção de biocombustíveis: perspectivas e desafios. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, 5.
- Priya, A. K., Gnanasekaran, L., Dutta, K., Rajendran, S., Balakrishnan, D. & Soto-Moscoso, M. (2022). Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. *Chemosphere*, 307, 135957.
- Rosca, M., Silva, B., Tavares, T. & Gavrilescu, M. (2022). Biosorption of Hexavalent Chromium by *Bacillus megaterium* and *Rhodotorula* sp. Inactivated Biomass. *Processes*, 11, 179.

- Rusu, L., Grigoras, C. G., Simion, A. I., Suceveanu, E. M., Schnakovszky, C. & Favier, L. (2022). Investigation into Biosorption of Pharmaceuticals from Aqueous Solutions by Biocomposite Material Based on Microbial Biomass and Natural Polymer: Process Variables Optimization and Kinetic Studies. *Polymers*, 14, 3388.
- Rusu, L., Suceveanu, E. M., Blaga, A. C., Nedeff, F. M. & Suteu, D. (2023). Insights into Recent Advances of Biomaterials Based on Microbial Biomass and Natural Polymers for Sustainable Removal of Pharmaceuticals Residues. *Polymers*, 15, 2923.
- Santaeufemia, S., Torres, E., Mera, R. & Abalde, J. (2016). Bioremediation of oxytetracycline in seawater by living and dead biomass of the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of hazardous materials*, 320, 315–325.
- Dos Santos, B. A. P., Dall'Oglio, E. L., Siqueira, A. B. de, Caixeta, D. S., Lopes, V. C. P., Vasconcelos, L. G. de & Morais, E. B. de. (2022). Ibuprofen biosorption by chemically activated *Saccharomyces cerevisiae*. *Ambiente e Água*, 7.
- Sulaymon, A. H., Abbood, D. W. & Ali, A. H. (2012). Competitive biosorption of phenol and lead from synthetic wastewater onto live and dead microorganisms. *Desalination and Water Treatment*, 45, 331–342.
- Suteu, D., Blaga, A. C., Cimpoesu, R., Pui, A. C. & Tataru-Farmus, R. E. (2021). Composites Based on Natural Polymers and Microbial Biomass for Biosorption of Brilliant Red HE-3B Reactive Dye from Aqueous Solutions. *Polymers*, 13, 4314.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K. & Sutton, D. J. (2012). Heavy Metal Toxicity and the Environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, 101, 133–164.
- Tolboom, S. N., Carrillo-Nieves, D., Rostro-Alanis, M. de J., Quiroz, R. de la C., Barceló, D., Iqbal, H. M. N. & Parra-Saldivar, R. (2019). Algal-based removal strategies for hazardous contaminants from the environment – A review. *Science of the Total Environment*, 665, 358–366.
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Saravanan, A. & Vo, D. V.-N. (2021). Advances in biosorbents for removal of environmental pollutants: a review on pretreatment, removal mechanism and future outlook. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126596.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184.





IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES DO SOLO: UMA REVISÃO DE LITERATURA

*Júlia Lorenzato da Silva<sup>1</sup>, Giovana Marchezi<sup>1</sup>, Cleomar Reginatto<sup>1</sup>,  
Luciane Maria Colla<sup>1\*</sup>*

---

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo,  
99052-900, Passo Fundo, Brasil.  
\*E-mail: [lmcolla@upf.br](mailto:lmcolla@upf.br)

# RESUMO

A contaminação do solo pode ser causada por atividades humanas incluindo a indústria, agricultura, disposição de resíduos e uso de produtos químicos. Os tratamentos convencionais de remediação do solo apresentam custo elevado, consumo de energia e recursos e limitações com relação a contaminantes persistentes a serem removidos. Assim, a remediação sustentável surge como uma alternativa. O objetivo da presente revisão de literatura foi avaliar as técnicas de remediação sustentável mais utilizadas para remoção de contaminantes do solo. Através da análise bibliométrica, foi possível observar que as técnicas de lavagem de solo, biorremediação, fitorremediação e sorção foram as mais empregadas. Além disso, foram apresentadas as respectivas vantagens e desvantagens. Os contaminantes inorgânicos que mais apareceram nos estudos foram os metais e metais pesados, e contaminantes orgânicos foram os hidrocarbonetos. A utilização de técnicas de remediação sustentável combinadas também foi verificada, permitindo uma abordagem mais eficaz para remover contaminantes do solo.

**Palavras-chave:** Metais. Hidrocarbonetos. Lavagem de solo. Biorremediação. Fitorremediação. Sorção.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso vital e está relacionado com vários dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, incluindo a segurança alimentar, água potável, saúde e bem-estar (Burachevskaya et al., 2023). As atividades humanas são a principal fonte de contaminação do solo (Testa et al., 2023). Os contaminantes orgânicos e inorgânicos representam risco ao ecossistema e ao ser humano, pois podem possuir potencial tóxico, mutagênico e carcinogênico (Nazari et al., 2022). Dentre os contaminantes presentes no solo destacam-se os metais, metais pesados e hidrocarbonetos. Os metais pesados podem ser perigosos para a saúde humana e para o ecossistema, uma vez que pode ocorrer a bioacumulação, sendo que os casos mais comuns de poluição do solo por metais pesados dizem respeito a As, Pb, Cr, Hg, Cu, Cd e U (Testa et al., 2023). Os hidrocarbonetos do petróleo incluem hidrocarbonetos alifáticos, hidrocarbonetos aromáticos, asfaltenos e resinas, que são em sua maioria estáveis e, devido a isso, podem permanecer no solo por um longo período (Lee et al., 2023).

Os tratamentos convencionais de remediação, por muitas vezes, consomem grandes quantidades de água e energia, geram resíduos que necessitam de descarte correto, levam à poluição atmosférica e geração de gases do efeito estufa (Futughe; Jones; Purchase, 2022). Assim, técnicas de tratamento têm sido desenvolvidas e aprimoradas para remover ou degradar de maneira eficiente e sustentável esses contaminantes (Nazari et al., 2022). A técnica mais adequada depende do tipo de contaminante que se deseja remover, das propriedades do solo (tipo de solo, pH do solo e conteúdo de matéria orgânica) e uso do solo (Lee et al., 2023). Sabe-se que técnicas de remediação foram desenvolvidas e aprimoradas com o objetivo de remover ou degradar de maneira eficiente os contaminantes presentes no solo (Nazari et al., 2022). As técnicas físicas e químicas apresentam elevado custo e são prejudiciais à estrutura do solo (Paes et al., 2023). Dessa forma, faz-se necessário o estudo da remediação sustentável como uma alternativa às técnicas convencionais. Esta revisão de literatura apresenta as principais técnicas para remediação sustentável, incluindo os métodos mais utilizados para remoção de diferentes contaminantes, junto com uma discussão dos resultados obtidos e as vantagens e desvantagens da utilização de cada um destes métodos. A escolha das técnicas de remediação sustentável revisadas foi realizada com base na nuvem de palavras geradas a partir do *Bibliometrix* (Figura 1).



Figura 1. Nuvem de palavras com 90 palavras-chave mais citadas dos estudos referentes aos anos de 2006 a 2024 (Consulta: Base de dados: Scopus; Termo de busca: “remediation AND techniques AND sustainable AND soil”; Tipo de documento: Artigo; Idioma: Inglês).

## 2 LAVAGEM DE SOLO

A tecnologia lavagem de solo (LS) é uma técnica em *ex situ*, de rápida limpeza e possui redução de custos. A LS é fundamentada na dessorção de poluentes por água, ácidos orgânicos e inorgânicos, agentes quelantes ou surfactantes, tanto naturais quanto sintéticos, podendo ser ligada a culturas microbianas e assim, concentrando os contaminantes em uma fase líquida a granel, sem modificá-los quimicamente (Piccolo et al., 2021; Kumar et al., 2024). A lavagem de solo pode ser dividida em lavagem física e lavagem química, sendo que a combinação de ambas é a mais utilizada. A lavagem física visa aumentar os poluentes em volumes menores, podendo ser embasada no tamanho, densidade, forma ou propriedades magnéticas antes da lavagem, enquanto a lavagem química visa eliminar os poluentes presentes (Fedje, Modin & Strömvall, 2015; Fedje & Strömvall, 2019).

Os resultados de uma remediação dependem de quais são as características físico-químicas, biológicas e, também, da força de ligação dos poluentes aos componentes orgânicos e inorgânicos do solo. Para aumentar a eficiência de remoção, agentes complexantes fortes ou soluções ácidas e alcalinas são frequentemente utilizadas nos processos de lavagem *ex situ* do solo. Todavia, as mudanças extremas de pHs, os agentes de lavagem utilizados e o tempo de lavagem podem alterar tanto as características, quanto as funções dos solos, tornando tóxico para a biota do solo (Piccolo et al., 2021).

Como por exemplo, o ácido nitrilotriacético e o citrato são eficazes na lavagem de solo para a degradação de As e Cu, porém podem ser fitotóxicos e degradar a qualidade da água quando atingem águas subterrâneas e superficiais por lixiviação e escoamento (Piccolo et al., 2021).

O consumo de agentes de lixiviação é elevado e é necessário que haja uma recirculação eficiente, principalmente se serão utilizados os agentes de lixiviação como o EDTA (Fedje & Strömvall, 2019). O ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) é um dos quelantes mais utilizados na lavagem de solo. No entanto, é não-biodegradável e apresenta persistência prolongada no solo, resultando em contaminações secundárias e possíveis impactos ambientais (Ni et al., 2023).

Ni et al. (2023) avaliaram a lavagem de solo para remoção de chumbo utilizando três quelantes biodegradáveis para substituir o uso do EDTA, seguido de um processo de imobilização química. O quelante EDDS (ácido [S,S]-etilenodiaminodisuccínico) apresentou maior extração de Pb e eficiência comparável ao EDTA. Já Piccolo et al. (2021) realizaram a lavagem de solo de metais pesados, sendo eles As, Co, Cr, Cu, Hg,

Ni, Pb e Zn, e PCBs (policlorobifenilos) utilizando surfactantes naturais húmicos, estes são associações supramoleculares que sobreviveram à degradação biótica e abiótica de biomoléculas liberadas de células quebradas. Os autores obtiveram bons resultados de remoção e demonstraram que a lavagem por surfactantes húmicos pode deixar no solo carbono metabólico suficiente para acelerar a atenuação natural da matéria orgânica poluente no solo.

A grande maioria dos estudos relacionados à lavagem de solo são de metais, contudo, Aouf e Dounit (2022) estudaram a remoção de hidrocarbonetos totais de petróleo em solo contaminado a partir de leito fluidizado líquido. A fluidização ascendente tem por vantagem romper o esqueleto do solo, permitindo que sejam liberados os contaminantes hidrofóbicos. Os autores obtiveram resultados sob certas condições de operação. Foi constatado que as remoções se demonstraram maiores quando adicionado o Lauriléter sulfato de sódio (SLES) como um surfactante.

### 3 BIORREMEDIAÇÃO

O uso de métodos biológicos, como a biorremediação, é frequentemente escolhido devido ao seu alinhamento com os ODS (Akbarian, 2022). A biorremediação diz respeito ao uso de organismos vivos, como bactérias, fungos, plantas ou suas enzimas para remediar ou imobilizar contaminantes no meio ambiente (Parnian, 2022). Por conta disso, a biorremediação trata-se da amenização dos poluentes em determinado local, diferentemente da biodegradação, que aborda bases biológicas do metabolismo de compostos recalcitrantes (De Lorenzo, 2011).

As tecnologias de biorremediação podem ser divididas pelas categorias *in situ* e *ex situ*, podendo envolver aerobiose, anaerobiose ou ambas, dependendo da natureza dos contaminantes e dos microrganismos a serem utilizados (Megharaj, Venkateswarlu & Naidu, 2014). A biorremediação *in situ* ocorre no mesmo local da contaminação, não precisando o material contaminado para outro local para a descontaminação (De Lorenzo, 2011). Ela depende dos microrganismos e de suas capacidades de desintoxicar ou destruir contaminantes já existentes (Megharaj, Venkateswarlu & Naidu, 2014). Algumas das mais utilizadas são bioaugmentação, bioestimulação, bioventilação e atenuação natural monitorada (De Lorenzo, 2011). Quando é necessário o transporte do material contaminado, como o solo e água, para um local diferente do que a origem da poluição, ocorre a biorremediação *ex situ*, por exemplo, biopilhas, compostagem, *landfarming*, biorreatores, tratamentos de fase sólida, entre outras (De Lorenzo, 2011).

### 3.1 BIODISPONIBILIDADE

A biodisponibilidade é um pré-requisito para a remediação biológica de áreas contaminadas e, também, é um fator de risco para organismos vivos por conta de produtos químicos tóxicos, ou seja, são frações de substâncias que se tornam disponíveis para atingir humanos, animais ou plantas, nos quais exercem efeitos biológicos (Harms, 2011). Ela incorpora conceitos de química ambiental e ecotoxicologia relacionados a concentrações de contaminantes, destino e comportamento de um organismo no meio ambiente (Anderson & Hillwalker, 2008).

Pei et al. (2020) analisaram em seu estudo a eficácia de remediação de hortaliças contaminadas com Cd com a aplicação de bentonita (devido às suas propriedades de adsorção e capacidade de troca catiônica) e em combinação com resíduo de cogumelo e de vermicomposto em solo. Os autores concluíram que os tratamentos com a aplicação da bentonita são eficientemente capazes de inibir a biodisponibilidade do metal pesado no solo e a translocação e acúmulo do Cd em partes comestíveis de vegetais.

### 3.2 BIOACUMULAÇÃO

É definida como o processo de acumulação de produtos químicos em um organismo ao longo do tempo devido à absorção direta, chamado de bioconcentração, e pela absorção dos alimentos, chamado de bioampliação, resultando em efeitos adversos e doenças (Chojnacka & Mikulewicz, 2014). Ou seja, é o acúmulo e enriquecimento de contaminantes nos organismos, em relação ao meio ambiente (Borga, 2013). O nível de substâncias bioacumuláveis no ambiente aumentou durante o último século como resultado da atividade industrial, obtendo-se uma maior mobilidade dos elementos tóxicos (Chojnacka & Mikulewicz, 2014).

A contaminação por metais pesados vem sendo muito estudada, pois leva a uma redução no desenvolvimento de plantas, por exemplo. Vadivel e Pitchamuthu (2019) estudaram a utilização do girassol (*Helianthus annuus L.*) para a biorremediação de Pb e Cd no solo proveniente de indústrias de mineração. O girassol é uma espécie já reconhecida por ter propriedades bioacumuladoras e eficazes para a fitorremediação. O estudo concluiu que a utilização de EDTA aumentou a biodisponibilidade, ou seja, induziu o acúmulo de Pb e Cd no girassol, tendo, assim, uma produtividade sustentável da cultura.

### 3.3 FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação é uma tecnologia *in situ* com ampla perspectiva de aplicação na remediação de solos contaminados (Li et al., 2022b). Essa técnica consiste no uso de plantas para remediar terrenos contaminados, sendo que as plantas devem ser tolerantes à contaminação e capazes de absorver ou imobilizar o contaminante no solo (Testa et al., 2023).

As plantas utilizadas na fitorremediação são selecionadas com base em tolerância ao contaminante, alto rendimento de biomassa, sistema radicular profundo e extenso e uso de baixas quantidades de insumos agronômicos (Testa et al., 2023; Gavrilesco et al., 2022). A identificação de plantas com capacidade de estabilizar ou absorver contaminantes do solo e adaptadas às condições das áreas contaminadas são as principais limitações encontradas ao aplicar a técnica de fitorremediação (Paes et al., 2023). Com o objetivo de explorar os principais fatores do solo que regulam a eficiência da fitorremediação, Cui et al. (2021) avaliaram a fitoextração utilizando *Amaranthus Hypochondriacus L.* em solos agrícolas contaminados por Cd. Segundo os autores, além do Cd, a capacidade de troca iônica do solo afetou o crescimento das plantas e o processo de remediação.

Na fitorremediação, os poluentes orgânicos, como hidrocarbonetos, são geralmente biodegradados por bactérias na rizosfera, enquanto os poluentes inorgânicos, como metais pesados, são absorvidos e translocados para tecidos vegetais hiperacumuláveis (Lee et al., 2023).

A fitoestabilização refere-se ao uso de plantas com capacidade de diminuir a mobilidade e/ou biodisponibilidade de um contaminante, com o objetivo de evitar sua lixiviação ou sua entrada na cadeia alimentar (Sarwar et al., 2017). A fitovolatilização envolve a conversão do contaminante em uma forma volátil e sua liberação na atmosfera através dos estômatos. A fitoextração utiliza plantas hipercumuladoras, que absorvem os contaminantes através das raízes e através da translocação acumulam os contaminantes nas folhas (Sarwar et al., 2017). Muitos estudos relataram a translocação de contaminantes para a parte aérea da planta (fitoextração). Njoku e Nwani (2022) avaliaram o potencial da *Amaranthus spinosus* para remediação de solos com metais pesados, observando uma taxa de perda de metais Cu>Zn>Pb>Cd, o índice do fator de translocação indica que todos os metais investigados estavam sendo translocados para as partes aéreas da planta.

Outros mecanismos de fitorremediação verificados referem-se à fitoestimulação e a rizofiltração. Além disso, na maior parte dos estudos avaliados, com o aumento da

concentração do contaminante, houve uma diminuição no crescimento da planta (Paes et al., 2023; Testa et al., 2023). Porém, em concentrações de contaminantes abaixo do nível considerado tóxico, pode ocorrer um crescimento da planta como mecanismo de defesa (Paes et al., 2023).

Assim, apesar de suas limitações, a fitorremediação é uma técnica com potencial de aplicação em grandes áreas contaminadas. Porém, segundo relatório elaborado pela CETESB em dezembro de 2013, das 2.674 áreas remediadas no estado de São Paulo, a fitorremediação foi utilizada em apenas três delas (Paes et al., 2023). Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de novos estudos envolvendo essa técnica, com o objetivo de aplicação em solos contaminados reais.

## 4 SORÇÃO

A técnica de sorção consiste em introduzir um sorvente no solo para adsorver, absorver ou reter contaminantes. Os processos de sorção são divididos em dois tipos: a fisissorção, em que as interações são físicas, como forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio, e a quimissorção, em que prevalecem ligações químicas (Hassanisaadi et al., 2023). O tipo de solo, as propriedades do solo e outros fatores ambientais afetam significativamente o processo de sorção de poluentes do solo (Han et al., 2022). Além disso, os sorventes devem ser substâncias porosas com alta concentração de sítios ativos para sorver espécies moleculares, sendo que a interação entre sorvente e molécula determina a especificidade da ligação (Hassanisaadi et al., 2023). Liu et al. (2023) utilizaram uma cocultura de *B.licheniformis* e *P.aeruginosa* resistentes a metais, em um solo contaminado com Cd e As, resultando em alta capacidade de sorção de Cd e capacidade de redução de As (V) a As (III). Segundo os autores, as interações de substâncias poliméricas extracelulares provavelmente afetam a sorção e a transformação de metais. As coculturas microbianas também vêm sendo utilizadas na degradação de compostos orgânicos em sistemas de água e solo (Liu et al., 2023).

A utilização de materiais alternativos como sorvente para a remoção de contaminantes do solo também vem sendo estudada. O biochar é um material rico em carbono e ecológico, produzido a partir da pirólise da biomassa sem a presença de oxigênio, possuindo alta porosidade e superfícies ricas em grupos funcionais (Kamdar et al., 2023; Wu et al., 2019). O uso do biochar tem resultados favoráveis ao longo do tempo no solo, como melhora do pH, capacidade de troca catiônica e conteúdo de nutrientes (Burachevskaya et al., 2023). Yapa et al. (2022) descobriram que o biochar,



especificamente feito de madeira e de casca de pinheiro e carvalho a 400–450° C, adsorve metais pesados, incluindo Pb, As e Cd. Burachevskaya et al. (2023) destacam a importância da reutilização de resíduos de biomassa como um método de tratamento e utilização de recursos econômicos e ecologicamente corretos. Estudos também relatam que o biochar aumentou significativamente a eficiência de biodegradação de óleo no solo, incluindo hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), hidrocarbonetos voláteis de petróleo e óleo diesel (Wei et al., 2023).

A quitosana é um biopolímero que pode ser obtido através da desacetilação da quitina, polissacarídeo presente no exoesqueleto de insetos e crustáceos e na parede celular de fungos (Vakili et al., 2014). A quitosana possui grupos funcionais receptivos como a amina primária ( $\text{NH}_2$ ), que são sítios de adsorção (Negm et al., 2020). Li et al. (2022a) produziram esferas porosas compostas de celulose e quitosana carregadas com ferro de valência zero em nanoescala para remoção de cádmio em solo contaminado. Os resultados mostraram que a remediação utilizando esse material poderia melhorar a imobilização de cádmio, permitindo a conversão da maioria das espécies de cádmio em óxidos de Fe-Mn e matérias orgânicas no solo depois do processo de remediação.

Dessa forma, a sorção se apresenta como uma técnica com potencial de uso para remediação de poluentes. O uso de microrganismos e de materiais com menor impacto ambiental foi evidenciado. A maioria dos estudos objetivou remediar metais do solo. Assim, para que esse método se torne competitivo aos métodos tradicionais de remediação, mais estudos são necessários no sentido da remoção de diferentes poluentes e também no desenvolvimento de novos sorvetes com melhores propriedades.

## 5 AVALIAÇÃO DA REMEDIAÇÃO SUSTENTÁVEL

A maioria dos métodos tradicionais de remediação pode destruir o equilíbrio ecológico do solo e resultar em impactos ambientais secundários (Li et al., 2022b). Dessa forma, é de extrema importância o desenvolvimento de tecnologias de remediação econômicas, sustentáveis e ecologicamente corretas. O Quadro 1 faz uma comparação entre as técnicas apresentadas previamente, com relação a suas respectivas vantagens e desvantagens.

Quadro 1. Técnicas de remediação sustentáveis e respectivas vantagens e desvantagens.

| <b>Técnica</b>  | <b>Vantagens</b>  | <b>Desvantagens</b>  | <b>Referências</b>   |
|-----------------|---|--|--|
| Sorção          | Permite o uso de diferentes materiais sorventes;<br>Baixo consumo energético.   | Necessidade de disposição adequada do sorvente contaminado;<br>Dificuldade de acesso do contaminante em camadas profundas.                       | Ahmad et al. (2019)<br>Vakili et al. (2014)  |
| Fitorremediação | Simplicidade de execução;<br>Sustentabilidade;<br>Custo relativamente baixo;<br>Baixo consumo energético;<br>Fácil adaptação;<br>Aplicação em grandes áreas contaminadas;<br>Melhoria da fertilidade do solo. | Limitada ao ciclo biológico das plantas;<br>Os níveis de concentração de contaminantes não podem ser elevados devido à toxicidade para a planta. | Paes et al. (2023)<br>Li et al. (2022b)<br>Gavrilescu et al. (2022)<br>Njoku; Nwani (2022) |
| Biorremediação  | Baixo custo;<br>Processo seguro;<br>Sustentável.  | Difícil degradação microbiana de contaminantes de alto peso molecular;<br>Produção de produtos intermediários mais tóxicos e móveis.             | Megharaj;<br>Venkateswarlu;<br>Naidu (2014)<br>Vaishnav; Demain (2009)                     |
| Lavagem do solo | Simplicidade de operação;<br>Rápidos resultados de remediação;<br>Baixo custo operacional;<br>Aumento da atenuação natural.   | Possibilidade de lixiviação do contaminante residual.  | Ni et al. (2023)<br>Piccolo et al. (2021)  |

Através do Quadro 1, pode-se observar que todas as técnicas apresentam suas limitações e potencialidades. Assim, é importante avaliar o contaminante que se deseja remover, o tipo de solo e as características do ambiente, para que a técnica mais adequada possa ser empregada. Além disso, pode-se utilizar duas ou mais técnicas combinadas para que seja possível chegar nos resultados esperados.

Os solos poluídos em maior profundidade não podem ser remediados exclusivamente por fitorremediação, assim são necessárias técnicas para intensificar a eficiência, alguns exemplos são: crescimento sinérgico de plantas e microrganismos promotores

de crescimento vegetal, aplicação de campo elétrico e padrões espaciais de plantio de diferentes espécies vegetais (Gavrilescu et al., 2022). Zhu et al. (2023) avaliaram a utilização de fertilizantes para promover o crescimento de bactérias catabolizadoras de ácido abscísico com o objetivo de melhorar a fitorremediação de metais pesados de solos. Segundo os autores, o uso do fertilizante nitrato-nitrogênio ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) em combinação com o microrganismo *R. qingshengii* foi considerado o mais eficaz no aumento do enriquecimento de Cd, Zn e Pb em *B. juncea* e na melhoria da biomassa vegetal.

Apenas o processo de biorremediação pode ser inviável para a remoção de contaminantes orgânicos persistentes, devido aos altos pesos moleculares, por exemplo. Fan et al. (2022) demonstraram que a efetividade de degradação do pireno, um hidrocarboneto aromático policíclico, apenas com o tratamento biológico é provável que seja reduzida devido à estrutura complexa do contaminante, alta hidrofobicidade e baixa biodisponibilidade. Por conta disso, os autores avaliaram a utilização da biorremediação em conjunto com a eletrocinética e obtiveram resultados de 82,1% de remoção do pireno no solo. Isso se dá por conta da técnica de eletrocinética induzir a eletromose, eletromigração e eletroforese, este campo elétrico auxilia a promover a biodegradação de poluente orgânicos, ou seja, aumentando a difusão de poluentes e degradando as bactérias funcionais (Fan et al., 2022).

A lavagem de solo, para poder acelerar a lixiviação do contaminante, necessita de agentes lixiviadores, porém, para isso, exige que o material seja escavado do solo. Por conta desse alto uso de agentes lixiviadores, é necessário que haja uma recirculação, já que são produtos que reduzem a qualidade do solo. Para isso, a utilização de métodos em conjunto se torna inevitável. Fedje e Stromvall (2019) utilizaram a precipitação química, após a lavagem de solo, para realizar a extração de cobre dos lixiviados de cinzas de cascas. Foi constatado que o pH é um dos fatores mais importantes para o controle da lixiviação do Cu, sendo necessários pH abaixo de três para a eficiência de 100% da precipitação química. Os autores indicaram, também, que os produtos das cinzas de cascas são de interesse das indústrias metalúrgicas para refinamento.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta as vantagens, desvantagens e eficiências de diferentes técnicas sustentáveis de remediação relacionadas aos solos. Conforme demonstrado, as técnicas de lavagem do solo, biorremediação, fitorremediação e sorção destacam-se como as mais amplamente empregadas para a recuperação de áreas contaminadas.

Essas abordagens são eficazes na remoção de diferentes tipos de contaminantes, como metais, metais pesados e hidrocarbonetos, oferecendo soluções versáteis e específicas para a restauração ambiental. Tanto individualmente, quanto em consórcio com outras técnicas de remediação, todas as técnicas analisadas são eficientes na remoção dos poluentes. Contudo, muitas vezes quando as técnicas são utilizadas singularmente podem possuir desvantagens para o solo e organismos vivos das proximidades, por conta disso, a associação com outras técnicas pode auxiliar nestes casos, quando ainda há resquícios da contaminação. Dessa forma, a remediação sustentável voltada à descontaminação de solos está diretamente relacionada e impactada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, dentre eles o ODS 15 (Vida Terrestre), ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis), ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) e ODS 14 (Vida na Água).

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código Financeiro 001), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS 07/2021 – Programa Pesquisador Gaúcho – PqG, 21/2551-0002165-9) e a Universidade de Passo Fundo (UPF).

---

## AN ASSESSMENT OF SUSTAINABLE REMEDIATION TECHNIQUES FOR THE REMOVAL OF SOIL CONTAMINANTS: A REVIEW

**ABSTRACT:** Soil contamination can result from various human activities, including industry, agriculture, waste disposal, and chemical use. Conventional soil remediation methods often involve high costs, substantial energy and resource consumption, and limitations in effectively removing persistent contaminants. Consequently, sustainable remediation is emerging as an alternative approach. This literature review aims to evaluate the most commonly used sustainable remediation techniques for soil contaminant removal. Through bibliometric analysis, it was observed that soil washing, bioremediation, phytoremediation, and sorption techniques are among the most commonly employed,

each with its respective advantages and disadvantages. The most frequently encountered inorganic contaminants in the studies were metals and heavy metals, while hydrocarbons were the primary organic contaminants. The review also highlighted the use of combined sustainable remediation techniques, which offer a more effective approach to removing soil contaminants.

**Keywords:** Metals. Hydrocarbons. Soil washing. Bioremediation. Phytoremediation. Sorption.

---

## REFERÊNCIAS

Ahmad, Z. U., Yao, L., Wang, J., Gang, D. D., Islam, F., Lian, Q. & Zappi, M. E. (2019). A sustainable Decision Support System for soil bioremediation of toluene incorporating UN sustainable development goals. *Chemical Engineering Journal*, 259, 814–826.

Akbarian, H., Jalali, F. M., Gheibi, M. & Hajiaghahi-Keshteli, M. (2022). A sustainable Decision Support System for soil bioremediation of toluene incorporating un sustainable development goals. *Environmental Pollution*, 307, 119587.

Anderson, K. A., Hillwalker, W. E. (2008). Bioavailability. *Ecotoxicology*, 348.

Aouf, M. & Salah, D. (2022). Remediation of aged hydrocarbon contaminated soil by washing in fluidized bed column. *Archives of Environmental Protection*, 48, 15–23.

Burachevskaya, M., Minkina, T., Bauer, T., Lobzenko, I., Fedorenko, A., Mazarji, M., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Nazarenko, A., Butova, V., Wong, M. H. & Rajput, V. D. (2023). Fabrication of biochar derived from different types of feedstocks as an efficient adsorbent for soil heavy metal removal. *Scientific reports*, 13.

Borga, L. (2008). Ecotoxicology: Bioaccumulation. In: *Encyclopedia of Ecology*, 346–348.

Cui, X., Mao, P., Sun, S., Huang, R., Fan, Y., Li, Y., Li, Y., Zhuang, P. & Li, Z. (2021). Phytoremediation of cadmium contaminated soils by *Amaranthus Hypochondriacus* L.: The effects of soil properties highlighting cation exchange capacity. *Chemosphere*, 283, 131067.

Chojnacka, K., Mikulewicz, M. (2014). Bioacumulação. In *Enciclopedia de Toxicologia: Terceira Edição*: 456–460.

De Lorenzo, V. (2011). Systems Biology Approaches to Bioremediation. In *Comprehensive Biotechnology, Second Edition*, 6, 15–24.

Fan, R., Tian, H., Wu, Q., Yi, Y., Yan, X. & Liu, B. (2022). Mechanism of bio-electrokinetic remediation of pyrene contaminated soil: Effects of an electric field on the degradation pathway and microbial metabolic processes. *Journal of Hazardous Materials*, 422.

Fedje, K. K., Modin, O. & Strömvall, A. M. (2015). Copper recovery from polluted soils using acidic washing and bioelectrochemical systems. *Metals*, 5, 1328–1348.

Fedje, K. K. & Strömvall, A. M. (2019). Enhanced soil washing with copper recovery using chemical precipitation. *Journal of Environmental Management*, 236, 68–74.

Futughe, A. E., Jones, H. & Purchase, D. (2023). A novel technology of solarization and phytoremediation enhanced with biosurfactant for the sustainable treatment of PAH-contaminated soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 3847–3863.

Gavrilescu, M. (2022). Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Current Opinion in biotechnology*, 74, 21–31.

Han, X., Wang, L., Wang, Y., Yang, J., Wan, X., Liang, T., Song, H., Elbana, T. A. & Rinklebe, J. (2022). Mechanisms and influencing factors of yttrium sorption on paddy soil: Experiments and modeling. *Chemosphere*, 307, 135688.

Harms, H. (2011). Bioavailability and Bioaccessibility as Key Factors in Bioremediation. In *Comprehensive Biotechnology, Second Edition*, 6, 83–94.

Hassanisaadi, M., Riseh, R. S., Rabiei, A., Varma, R. S. & Kennedy, J. F. (2023). Nano/micro-cellulose-based materials as remarkable sorbents for the remediation of agricultural resources from chemical pollutants. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125763.

Kamdar, B. A., Solanki, H. & Reddy, K. R. (2023). Moringa Seed Cake Biochar: A Novel Binder for Sustainable Remediation of Lead-Contaminated Soil. *Journal of Environmental Engineering*, 149, 4023059.

Kumar, A., Mohan, D., Paramkusam, B. R. & Singh, A. P. (2023). Efficacy of surfactants in the sustainable restoration of the geotechnical properties of diesel-contaminated soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21, 867–874.

Megharaj, M., Venkateswarlu, K. & Naidu, R. (2014). Bioremediation. In *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition 1*, 485–489.

Nazari, M. T., Simon, V., Machado, B. S., Crestani, L., Marchezi, G., Concolato, G., Ferrari, V., Colla, L. M. & Piccin, J. S. (2022). *Rhodococcus*: A promising genus of actinomycetes for the bioremediation of organic and inorganic contaminants. *Journal of Environmental Management*, 323, 116220.

Negm, N. A., Hefni, H. H. H, Abd-Elaal, A. A. A., Badr, E. A. & Kana, M. T. H. A. (2020). Advancement on modification of chitosan biopolymer and its potential applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 681–702.

Ni, S., Rahman, S., Kasai, S., Yoshioka, S., Wong, K. H., Mashio, A. S. & Hasegawa, H. (2023). Remediation of lead-contaminated shooting range soil: biodegradable chelator-assisted washing and subsequent post-treatment using FeCl<sub>3</sub> and CaO. *Environmental Technology and Innovation*, 31, 103172.

Njoku, K. L. & Nwani, S. O. (2022). Phytoremediation of heavy metals contaminated soil samples obtained from mechanic workshop and dumpsite using *Amaranthus spinosus*. *Scientific African*, 17, 1278.

Pei, P., Xu, Y., Zheng, S., Liang, X., Sun, Y., Lin, D. & Wang, L. (2020). The use of bentonite and organic amendments for remediation of Cd contaminated fields: an environmental perspective. *Land Degradation & Development*, 32, 3639–3652.

Lee, Yun-Yeong, Soo Yeon Lee & Kyung-Suk Cho. (2023). Phytoremediation and bacterial community dynamics of diesel-and heavy metal-contaminated soil: long-term monitoring on a pilot scale. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 183, 105642.

Li, B., Ming, Li, Zhang, P., Yuanfeng, P., Huang, Z. & Xiao, H. (2022). Remediation of Cd (II) ions in aqueous and soil phases using novel porous cellulose/chitosan composite spheres loaded with zero-valent iron nanoparticles. *Reactive and Functional Polymers*, 173, 105210.

Li, N., Hongwei, J. & Su, Y. (2022). Phytoremediation of arsenic contaminated soil based on drip irrigation and intercropping. *Science of the Total Environment*, 850, 157970.

Liu, H., Hong, Z., Lin, J., Huang, D., Ma, L. M., Xu, J. & Dai, Z. (2023). Bacterial coculture enhanced Cd sorption and as bioreduction in co-contaminated systems. *Journal of Hazardous Materials*, 444, 130376.

- Paes, É. de C., Veloso, G. V., Castro Filho, M. N. de, Barroso, S. H., Fernandes-Filho, E. I., Fontes, M. P. F. & Soares, E. M. B. (2023). Potential of plant species adapted to semi-arid conditions for phytoremediation of contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 449, 131034.
- Parnian, A., Pirasteh-Anosheh, H., Furze, J. N., Prasad, M. N. V., Race, M., Hulisz, P. & Ferraro, A. (2022). Full-scale bioremediation of petroleum-contaminated soils via integration of co-composting. *Journal of Soils and Sediments*, 22, 2209–2218.
- Piccolo, A., Martino, A. de, Scognamiglio, F., Ricci, R. & Spaccini, R. (2021). Efficient simultaneous removal of heavy metals and polychlorobiphenyls from a polluted industrial site by washing the soil with natural humic surfactants. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 25748–25757.
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehim, A. & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721.
- Testa, G., Corinzia, S. A., Cosentino, S. L. & Ciaramella, B. R. (2023). Phytoremediation of Cadmium-, Lead-, and Nickel-Polluted Soils by Industrial Hemp. *Agronomy*, 13, 995.
- Vadivel, V. & Pitchamuthu, S. (2019). Accumulation efficiency of sunflower for lead and cadmium along with sustainable crop productivity under soil stress. *Journal of Applied and Natural Science*, 11, 636–644.
- Vaishnav, P.; Demain, A. L. (2009). Industrial Biotechnology, (overview). In *Applied Microbiology: Industrial*, 335–348.
- Vakili, M., Rafatullah, M., Salamatinia, B., Abdullah, A. Z., Ibrahim, M. I., Tan, K. B., Gholami, Z. & Amouzgar, P. (2014). Application of chitosan and its derivatives as adsorbents for dye removal from water and wastewater: A review. *Carbohydrate Polymers*, 113, 115–130.
- Yapa, N., Du, W., Madhushan, A., Yan, K., Asad, S., Karunarathna, S. C. & Bamunuarachchige, S. (2022). Potential of biofertilizers and natural soil amendments to mitigate heavy metal contents of soil in lowland rice (*Oryza sativa* L.) farming. *ScienceAsia*, 48, 326–334.



Wei, Z., Wei, Y., Liu, Y., Niu, S., Xu, Y., Park, J.-H. & Wang, J. J. (2023). Biochar-based materials as remediation strategy in petroleum hydrocarbon-contaminated soil and water: Performances, mechanisms, and environmental impact. *Journal of Environmental Sciences*, 138, 350–372.

Wu, P., Cui, P., Alves, M. E., Peijnenburg, W. J. G. M., Liu, C., Zhou, D., Wang, H., Okh, Y. S. & Wang, Y. (2019). Interactive effects of rice straw biochar and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on immobilization of Zn. *Journal of Hazardous Materials*, 373, 250–257.

Zhu, Y., Wang, Y., Zheng, H., Xiang, X., Wang, H., Xie, M., Liu, H., Fang, Z., Liu, L. & Du, S. (2023). N fertilizers promote abscisic acid-catabolizing bacteria to enhance heavy metal phytoremediation from metalliferous soils. *Science of the Total Environment*, 164964.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# AVALIAÇÃO DO PERFIL BIOQUÍMICO POR ESPECTROSCOPIA FTIR DA BIOMASSA DE *CHLORELLA* SP. CULTIVADA SOB DIFERENTES FERTILIZANTES AGRÍCOLAS À BASE DE NPK

*Camila Rafaela Rathke\**, Valeria Louzada Leal Butzke, Lisianne Brittes Benitez, Valeriano Antonio Corbellini, Rosana de Cassia de Souza Schneider

---

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, UNISC, 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.  
\*E-mail: [camilar3@mx2.unisc.br](mailto:camilar3@mx2.unisc.br)

# RESUMO

As microalgas são fontes promissoras de metabólitos de alto valor com aplicações nos setores de biocombustíveis, alimentos, cosméticos e farmacêuticos. Entre elas, *Chlorella* sp. destaca-se pela adaptabilidade a diferentes condições e potencial para biossíntese de compostos específicos. Contudo, a viabilidade econômica da produção em larga escala é limitada pelos altos custos dos insumos, sendo o uso de fertilizantes de baixo custo uma alternativa promissora. Este trabalho avaliou o comportamento e a composição da biomassa de *Chlorella* sp. cultivada com seis tipos de fertilizantes NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) ( $3 \text{ g L}^{-1}$ ) em meio de cultura. Durante 28 dias, monitoraram-se DC (densidade Celular), DO (densidade óptica) e pH. Os meios foram caracterizados quanto a nitrogênio, carbono orgânico e inorgânico e fósforo solúvel. A biomassa seca foi analisada por ATR-FTIR (infravermelho com transformada de Fourier com acessório de Reflectância Total Atenuada) para identificar alterações bioquímicas. Os resultados mostraram que o fertilizante NPK-4 (caracterizado em  $\text{P} = 105,32 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{COT} = 26,94 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{Cl} = 3,12 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{NT} = 69,77 \text{ mg L}^{-1}$ ) promoveu maior DC, DO e estabilidade do pH que os demais ao final do experimento. A análise FTIR da biomassa revelou a presença de proteínas, lipídios e carboidratos sendo que NPK-4 promoveu o maior acúmulo desses compostos, indicando seu potencial biotecnológico. O fertilizante NPK-6 também se destacou pela maior intensidade nas bandas de proteínas, sugerindo uma biomassa com potencial para aplicações específicas. Estes resultados indicam que a escolha do fertilizante pode influenciar significativamente o perfil bioquímico da biomassa de *Chlorella* sp., com implicações para seu uso em biotecnologia.

**Palavras-chave:** Microalga. FTIR. *Chlorella*. Fertilizantes. Crescimento.

---

## 1 INTRODUÇÃO

As microalgas são uma fonte promissora de metabólitos de alto valor agregado, incluindo uma variedade de compostos bioativos, como proteínas, aminoácidos, enzimas, pigmentos, ácidos graxos, polissacarídeos, vitaminas, antioxidantes e fitormônios (Chabili et al., 2024; Uma et al., 2023). Estes compostos fizeram com que as microalgas se tornassem altamente atrativas para o desenvolvimento de produtos em diversos setores, incluindo de biocombustíveis, alimentos, ração animal, produtos farmacêuticos, nutracêuticos, cosméticos e agricultura (Ronga et al., 2019; Uma et al., 2023). Dentre a

vasta gama de microalgas pesquisadas, as espécies do gênero *Chlorella* destacam-se como fontes especialmente promissoras de compostos de interesse comercial, sendo hoje uma das mais amplamente estudadas e cultivadas globalmente (Fang et al., 2024).

O gênero *Chlorella* pertence ao grupo das algas verdes (*Chlorophyta*), que são organismos unicelulares eucarióticos, possuindo forma esférica com diâmetro de 2,0–10,0  $\mu\text{m}$  (Piasecka et al., 2022; Coronado-Reyes et al., 2020). Apresentam uma estrutura semelhante à das plantas superiores, com parede celular, mitocôndrias e cloroplastos (Coronado-Reyes et al., 2020). Podem organizar-se de forma isolada ou em colônias e, por não possuírem estruturas de mobilidade, permanecem imóveis no meio de cultivo. A reprodução é assexuada e ocorre por autoesporulação, processo que leva aproximadamente 24 horas para completar a divisão celular (Coronado-Reyes et al., 2020; Phukan et al., 2011). *Chlorella* é amplamente distribuída, sendo encontrada tanto em ambientes de água doce quanto marinhos, o que reflete sua capacidade adaptativa a diferentes condições ambientais (Phukan et al., 2011).

A composição da biomassa de *Chlorella* é rica em diversos nutrientes, como clorofila, proteínas, polissacarídeos, vitaminas, minerais e aminoácidos essenciais, contendo aproximadamente 53% de proteínas, 23% de carboidratos, 9% de lipídios e 5% de minerais. No entanto, essas concentrações de compostos podem variar em função da manipulação das condições de cultivo (De Moraes et al., 2015).

Foi relatado que as cepas do gênero *Chlorella* têm a capacidade de se adaptar a uma variedade de condições ambientais e a diferentes formas de carbono, permitindo-lhes crescer de maneira autotrófica, heterotrófica, fotoheterotrófica e mixotrófica (Piasecka et al., 2022). Graças à sua flexibilidade metabólica, essas microalgas podem ser cultivadas em diversos modelos de crescimento e sistemas de produção, dependendo das fontes de energia e carbono (Chabili et al., 2024). Fatores como a concentração de nutrientes (especialmente N, P e C), salinidade, temperatura, intensidade luminosa, fotoperíodo, pH e agitação influenciam o crescimento e a composição química da biomassa das microalgas (Ronga et al., 2019; De Moraes et al., 2015; Braun & Colla, 2023). Isto ocorre devido às microalgas responderem às alterações em seu ambiente externo com modificações em seu ambiente intracelular. Assim, a manipulação das condições de cultivo, bem como a presença ou ausência de nutrientes, pode estimular a biossíntese de compostos específicos de interesse (De Moraes et al., 2015).

No entanto, a viabilidade econômica da produção de biomassa e bioprodutos de microalgas depende fortemente de baixos custos de cultivo, sendo a fonte de nutrientes uma das principais limitações para o cultivo em larga escala. Para que este seja

economicamente viável, é necessário o uso substancial de fertilizantes de baixo custo, como os fertilizantes à base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK). Dessa forma, a utilização de fertilizantes como fonte de nutrientes oferece uma alternativa prática para minimizar os custos de produção (Nayak et al., 2016).

Atualmente, para a obtenção de produtos de microalgas, as análises dos principais biocompostos da biomassa, como lipídios, proteínas e carboidratos, são realizadas por métodos tradicionais que determinam e quantificam esses compostos individualmente. Esses métodos geralmente requerem grandes quantidades de biomassa para garantir uma determinação precisa e utilizam solventes orgânicos perigosos, tornando o processo prejudicial ao meio ambiente (Meng et al., 2014). A espectroscopia de absorção molecular no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica de espectroscopia vibracional molecular que permite a análise de grupos funcionais químicos ao longo de diversas regiões de absorbância, entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$ . Esse método é especialmente útil para identificar as principais composições celulares, como lipídios, proteínas e carboidratos, uma vez que cada um desses componentes possui padrões de absorbância característicos em regiões específicas do espectro de infravermelho médio. Dessa forma, a FTIR apresenta grande potencial como ferramenta eficaz para o monitoramento e análise das composições bioquímicas em microalgas, utilizando uma massa de amostra menor, assim como, evitando o uso de reagentes (Meng et al., 2014). Desse modo, a espectroscopia FTIR é amplamente reconhecida como uma técnica de química verde, sensível e confiável, amplamente utilizada para detectar alterações na composição da biomassa de microalgas (Meng et al., 2014).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o crescimento de *Chlorella* sp. em escala laboratorial em meios de cultura preparados com diferentes fertilizantes NPK e analisar o perfil bioquímico da biomassa resultante por meio da FTIR, visando contribuir para a otimização do cultivo e o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis para a produção de biomassa de microalgas.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 CULTIVOS E CONDIÇÕES DE CULTURA

Neste estudo, foi utilizado um inóculo a 15% da cepa de microalga *Chlorella* sp. fornecida pela Universidade Federal do Ceará (Sisgen A72DB15). Os cultivos foram conduzidos em frascos Erlenmeyer de 250 mL, com volume de trabalho de 200 mL e

densidade óptica inicial  $\sim 0,2$ , medido a absorvância aferida em 680 nm. Os frascos foram mantidos em incubadora *shaker* com agitação orbital a 185 rpm, sob iluminação contínua (24:0, horas de claro:escuro) proporcionada por lâmpadas fluorescentes brancas. A temperatura foi mantida a, aproximadamente, 23 °C durante todo o experimento.

Para o experimento foram utilizadas seis diferentes marcas de fertilizantes tipo NPK com composições distintas. Os meios de cultivo alternativos foram preparados na concentração de 3 g L<sup>-1</sup> de cada fertilizante. As amostras de fertilizantes, nominadas de NPK-1 a NPK-6, foram inicialmente maceradas, pesadas e dissolvidas em água com o auxílio de aquecimento e agitação magnética. As soluções resultantes foram então filtradas utilizando um sistema de filtração a vácuo, para remover quaisquer partículas insolúveis. Em seguida, os meios de cultivo foram esterilizados em autoclave (121 °C, 1 atm, 15 min).

## 2.2 AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO

O crescimento de *Chlorella* sp. foi monitorado semanalmente durante um período de 28 dias pela medida da densidade celular (DC) e da densidade óptica (DO). A DC (células mL<sup>-1</sup>) foi realizada através da contagem de células utilizando uma câmara de Neubauer em microscópio óptico. E a DO dos cultivos foi determinada pela absorvância a 680 nm, utilizando um espectrofotômetro UV/VIS. Também foi monitorado o comportamento do pH durante as semanas de cultivo.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS DE CULTIVO

Para a determinação da composição dos meios de cultivo alternativos à base de fertilizantes comerciais, foram avaliados os teores de Nitrogênio Total (NT), Carbono Orgânico Total (COT), Carbono Inorgânico (CI) e fósforo solúvel. A concentração de NT, COT e CI foi analisada utilizando o Analisador TOC/TN (Shimadzu). A quantificação de fósforo solúvel foi determinada utilizando o método espectrofotométrico fosfomolibdato, através da construção de uma curva de calibração (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; e 1,0 mg L<sup>-1</sup>, R<sup>2</sup> = 0,9977) e as leituras foram realizadas a 880 nm.

## 2.4 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA

Após 28 dias de cultivo, a biomassa microalgal foi centrifugada a 3200 rpm por 10 minutos e, em seguida, seca em estufa a 45 °C por 48 horas. A biomassa seca foi analisada para determinar o perfil bioquímico utilizando FTIR com acessório de Reflectância Total Atenuada (ATR-FTIR). Este método se baseia na absorção da energia na região do

infravermelho e nos padrões de vibração molecular dos grupos funcionais presentes na amostra, servindo como ferramenta para identificar as mudanças na biomassa de *Chlorella* sp. cultivada nos diferentes fertilizantes testados. Os espectros de ATR-FTIR foram obtidos por reflexão única de reflexão total atenuada (ATR), utilizando um espectrômetro Spectrum 400 FTIR/FT-NIR (Perkin Elmer), equipado com um acessório de amostragem universal com cristal de diamante/ZnSe. As medições foram realizadas no intervalo espectral de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ , força de pressão de 75  $\text{N m}^{-2}$  e 4 varreduras por amostra.

## 2.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

As análises quimiométricas de espectroscopia FTIR foram conduzidas com base nas triplicatas espectrais utilizando o *software* ChemoStat® v2 (Helfer et al., 2015). Os espectros médios de cada amostra foram obtidos após correção e normalização vetorial de cada triplicata. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para identificar tendências discretas entre amostras e visualizar associações dentro dos conjuntos de dados; foi realizada utilizando as triplicatas espectrais que foram pré-processadas através da normalização vetorial e centralização média.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 CRESCIMENTO

A evolução dos cultivos de *Chlorella* sp. foi monitorada ao longo de 28 dias em meios contendo diferentes fertilizantes comerciais. A DC (células  $\text{mL}^{-1}$ ) foi registrada em uma curva de crescimento microbiano. Observou-se que a DC aumentou ao longo do tempo de cultivo, atingindo a fase logarítmica, seguida pela fase estacionária e, posteriormente, pela fase de declínio. Esse padrão refletiu o ciclo típico de crescimento celular, influenciado pelos nutrientes disponíveis em cada tipo de fertilizante testado.

O cultivo com NPK-3, NPK-4 e NPK-5 mostrou crescimento ao longo dos 28 dias, superando os demais fertilizantes. O NPK-4 alcançou a maior DC ao final do experimento (Figura 1a), indicando ainda estar na fase logarítmica de crescimento. Os fertilizantes NPK-1, NPK-2 e NPK-6 não demonstraram desenvolvimento celular ao longo do tempo, uma vez que as DCs nas semanas de cultivo foram próximas à DC inicial. Avaliando a DC, o cultivo com NPK-5 atingiu a fase log aos 14 dias e após entrou na fase de declínio.

Pela DO (Figura 1b) observa-se comportamento similar para a maioria dos nutrientes, comprovando o declínio de crescimento da microalga no NPK-5, e mostrando a dificuldade de crescimento de *Chlorella* sp. no NPK-1 e NPK-2. A DO do NPK-4 comprovou que o sistema ainda estava na fase exponencial e com um maior valor final de DO em comparação aos demais meios.

Em todos os cultivos, o pH diminui gradualmente ao longo do tempo (Figura 1c). No cultivo com NPK-4 houve um aumento de pH na primeira semana, em seguida uma diminuição lenta e gradual atingindo pH final 3,28. Essa maior estabilidade do pH pode ter contribuído para o melhor crescimento de *Chlorella* sp. em comparação aos outros meios.

Em estudo de Shekh et al. (2016), foi avaliado para *Chlorella* sp. o efeito do pH na produtividade de biomassa e teor de lipídios. Constataram que a melhor produtividade de biomassa foi obtida em pH superior a 7,0. Um dos fatores que influencia a variação de pH no cultivo de microalgas é a presença de nitrogênio amoniacal, reconhecido por promover o crescimento de microalgas. No entanto, sua assimilação pode levar à acidificação do meio, o que limita a proliferação das microalgas (Fang et al., 2024).

O registro fotográfico dos sistemas testados (Figura 2) mostra que em NPK-1, NPK-2 e NPK-5 a coloração verde é menos intensa ao final do experimento, indicando o declínio de crescimento, corroborando com o resultado da Figura 1 a e b.

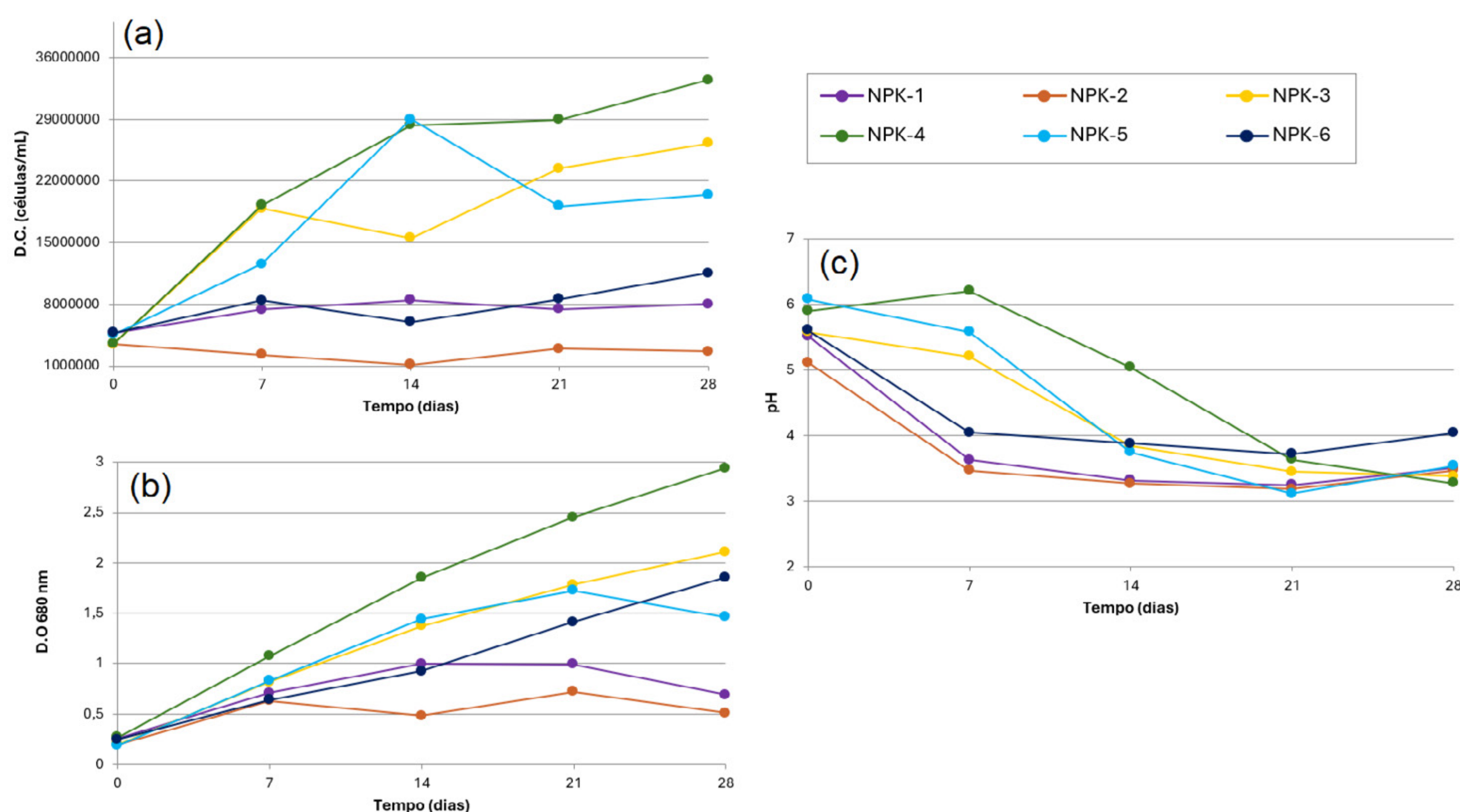


Figura 1. Crescimento celular e variação de pH do cultivo de *Chlorella* sp. nos meios NPK. **(a)** Densidade celular (células mL<sup>-1</sup>); **(b)** Densidade óptica (680nm); e **(c)** pH.



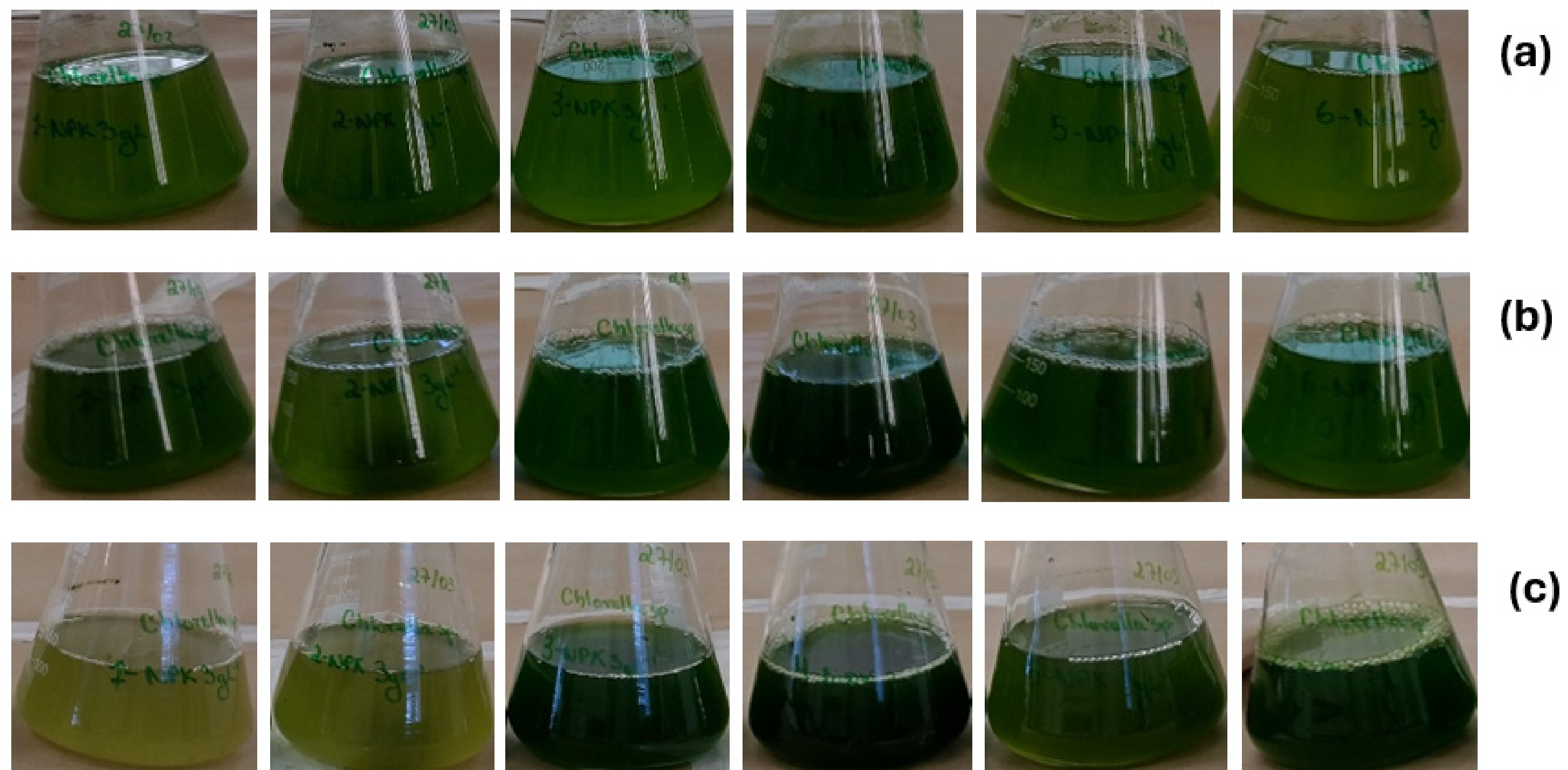


Figura 2. Cultivos de *Chlorella* sp. nos meios com diferentes fertilizantes NPK (1-6 da esquerda para a direita) após (a) 7 dias, (b) 14 dias; e, (c) 28 dias.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS DE CULTIVO

A Tabela 1 apresenta a caracterização química dos seis meios de cultivo preparados com diferentes fertilizantes NPK na concentração de  $3 \text{ g L}^{-1}$ . Foram determinados os níveis de fósforo solúvel (P solúvel), carbono orgânico total (COT), carbono inorgânico (CI) e nitrogênio total (NT) em cada meio de cultivo.

O fertilizante NPK-3 destaca-se por apresentar o maior valor de P solúvel ( $740,73 \pm 30,47 \text{ mg L}^{-1}$ ), além de uma das maiores concentrações de NT ( $201,33 \pm 2,48 \text{ mg L}^{-1}$ ), o que pode ter contribuído para o seu desempenho no crescimento de *Chlorella* sp. observado nos experimentos.

Em contraste, o NPK-4 apresenta o maior valor de carbono total (COT =  $26,94 \pm 0,64$ ; CI =  $3,12 \pm 0,14 \text{ mg L}^{-1}$ ), porém valores menores para NT e fósforo ( $69,77 \pm 1,48$  e  $105,32 \pm 0,72 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente). Já foi registrado na literatura que células de *Chlorella vulgaris* cultivadas sob suplementação de carbono orgânico são superiores em termos de tamanho e densidade celular em comparação às cultivadas somente com  $\text{CO}_2$  como fonte de carbono (Yu et al., 2020), o que corrobora o fato de que a fonte de carbono pode ter contribuído para o maior crescimento da microalga nesta condição.

O fertilizante NPK-6 é o fertilizante testado com maior concentração de NT ( $360,17 \pm 10,19 \text{ mg L}^{-1}$ ), conseqüentemente com uma maior razão molar N:P (6,70:1), além de valores mais baixos de carbono total em comparação aos demais. O efeito do teor de nitrogênio

utilizado no meio NPK pode ser explicado pelo fato de que em fertilizantes são utilizadas diferentes fontes de nitrogênio (amoniacal, nitrato ou ureia). Ademais, para *Chlorella* o nitrogênio amoniacal pode ser limitante para o acúmulo de biomassa (Slinksienė et al., 2022).

Lai et al. (2019) avaliaram que *C. vulgaris* mostrou um maior rendimento de biomassa quando cultivada com nitrato em comparação aos cultivos utilizando ureia e cloreto de amônio, especialmente ao manter o pH em uma faixa neutra. Também, Chen et al. (2023) relataram que o aumento de nitrato e fontes de carbono orgânico no meio de cultivo de *Chlorella* sp. resultaram em um maior acúmulo de biomassa.

Maltsev et al. (2023) apresentaram condições adequadas ou limitantes para a produção de lipídios. Concentrações de NT entre 200–400 mg L<sup>-1</sup> são consideradas níveis moderados de nitrogênio em meios de cultura, concentrações de 100–190 mg L<sup>-1</sup> indicam uma limitação nutricional moderada, e valores abaixo de 99 mg L<sup>-1</sup> são considerados efetivamente uma condição limitada de nitrogênio para produção de lipídio. Uma relação similar é feita para a concentração de fósforo como nutriente para microalgas. Entre 200–20 mg L<sup>-1</sup> é uma condição nutricional moderada, 19–10 mg L<sup>-1</sup> é considerada uma limitação moderada e níveis abaixo de 9 mg L<sup>-1</sup> está em condição de limitação do nutriente para produção de lipídios.

Ao avaliar os meios de cultura testados, é possível perceber que todos estão com níveis moderados a enriquecidos de fósforo. Contudo, ao avaliar os níveis de NT, somente NPK-3 e NPK-6 estão dentro da faixa de níveis moderados, os demais meios estão com níveis de limitação do nutriente.

A interação entre as concentrações de nitrogênio e fósforo em meios de cultura é complexa. Diversas combinações de proporções de N:P na faixa de 0,26–494:1 foram testadas e as descobertas revelaram que a proporção de N:P tiveram uma grande influência no crescimento de microalgas em comparação com outros parâmetros (Magyar et al., 2024). A proporção N:P ideal para o cultivo de microalgas *Chlorella* pode variar conforme a cepa específica, as condições de crescimento e com base no objetivo do cultivo (produção de biomassa, acumulação de lipídios, carboidratos, proteínas etc.). Contudo, a proporção de Redfield (N:P = 16:1) é frequentemente utilizada como ponto de referência (Magyar et al., 2024).

Mao et al. (2023) avaliaram os efeitos de diferentes proporções N:P no crescimento de *Chlorella pyrenoidosa* cultivadas em águas residuárias mistas e observaram que a proporção N:P de 18 foi a ideal para essa cepa, promovendo maior DO e maior rendimento

de biomassa. Huo et al. (2021) observaram que o cultivo de *Chlorella* sp. com diferentes proporções N:P resultou em maior produtividade de biomassa e de proteína quando a proporção N:P foi de 8:1, em comparação com as proporções de 16:1 e 32:1. Jiang e Nakano (2022) relataram que baixas relações N:P, caracterizadas pela limitação de nitrogênio e altas concentrações de fósforo, foram essenciais para alcançar alta produção de carotenoides em cultivos de *Chlorella vulgaris*. Estes resultados demonstram que a proporção N:P é uma variável importante não apenas no rendimento de biomassa, mas também na composição bioquímica das microalgas.

Tabela 1. Caracterização dos meios de cultura à base de fertilizantes NPK utilizados, valores para fósforo solúvel, carbono orgânico total, carbono inorgânico, nitrogênio total (média  $\pm$  desvio padrão) e razão molar N/P aproximada.

| NPK 3 g L <sup>-1</sup> | Concentração (mg L <sup>-1</sup> )   |                                    |                                   |                                      | Razão N:P     |
|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------|
|                         | P solúvel                            | COT                                | CI                                | NT                                   |               |
| 1                       | 315,64 $\pm$ 1,33                    | 20,23 $\pm$ 0,38                   | 1,51 $\pm$ 0,17                   | 118,30 $\pm$ 3,06                    | 0,83:1        |
| 2                       | 401,44 $\pm$ 80,68                   | 13,97 $\pm$ 0,17                   | 2,09 $\pm$ 0,18                   | 59,70 $\pm$ 1,20                     | 0,33:1        |
| 3                       | <b>740,73 <math>\pm</math> 30,47</b> | 11,38 $\pm$ 0,40                   | 1,75 $\pm$ 0,10                   | 201,33 $\pm$ 2,48                    | 0,60:1        |
| 4                       | 105,32 $\pm$ 0,72                    | <b>26,94 <math>\pm</math> 0,64</b> | <b>3,12 <math>\pm</math> 0,14</b> | 69,77 $\pm$ 1,48                     | 1,46:1        |
| 5                       | 115,37 $\pm$ 16,90                   | 15,20 $\pm$ 0,30                   | 2,55 $\pm$ 0,24                   | 108,64 $\pm$ 1,61                    | 2,08:1        |
| 6                       | 118,87 $\pm$ 8,04                    | 8,25 $\pm$ 0,27                    | 1,26 $\pm$ 0,12                   | <b>360,17 <math>\pm</math> 10,19</b> | <b>6,70:1</b> |

### 3.2 PERFIL BIOQUÍMICO DA BIOMASSA POR ATR-FTIR

A Figura 3 apresenta os espectros de FTIR (4000 a 650 cm<sup>-1</sup>), mostrando um padrão de bandas de absorção em todos diferentes meios de cultivo, ocorrendo somente uma oscilação na intensidade dos sinais das bandas entre os cultivos.

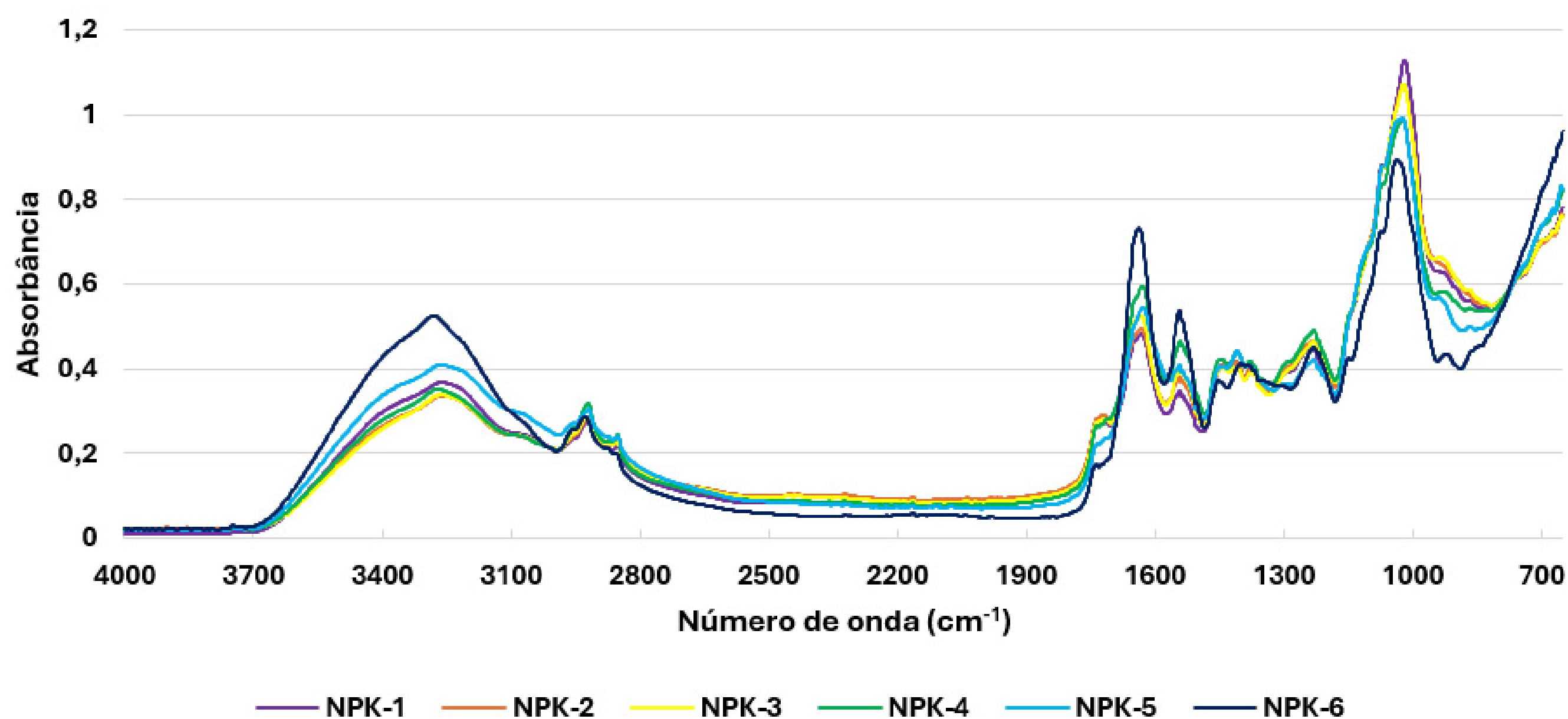


Figura 3. Espectros ATR-FTIR da biomassa de *Chlorella* sp. após 28 dias de cultivo em diferentes fertilizantes NPK. Cada espectro representa a média aritmética da absorção de três espectros após normalização vetorial.

Foram identificados picos associados a proteínas em  $\sim 1630$  e  $\sim 1540$   $\text{cm}^{-1}$ , sendo atribuídos ao grupo funcional amida I ( $\nu\text{C}=\text{O}$ ) e ao grupo amida II ( $\nu\text{C}-\text{N}$  e  $\text{dN}-\text{H}$  no plano), respectivamente (Ladjal-Ettoumi et al., 2024; Shekh et al., 2016; Meng et al., 2014).

A *Chlorella* é amplamente reconhecida por seu alto teor de proteínas e aminoácidos. No entanto, o conteúdo proteico e o perfil de aminoácidos podem variar significativamente conforme as condições de cultivo. Fontes de nitrogênio e carbono estão entre os principais fatores ambientais que influenciam o rendimento proteico, sendo que o aumento da fonte de nitrogênio tende a favorecer a produção de proteínas (Fang et al., 2024). Chen et al. (2023) observaram que o aumento da concentração de nitrato no meio de cultivo resultou em um aumento de 39% nas concentrações de biomassa e um aumento de 43% no conteúdo de proteína em *Chlorella* sp. De forma semelhante, as bandas associadas a proteínas e aminoácidos apresentaram maior intensidade na biomassa cultivada com NPK-6, o que pode sugerir uma produção proteica superior nesse meio, especialmente por ser o NPK com o maior teor de nitrogênio testado, e seu crescimento pode ter sido afetado pela condição de estresse.

A banda em  $\sim 1200-1000$   $\text{cm}^{-1}$  é típica de polissacarídeos e carboidratos ( $\nu\text{C}-\text{O}$ ,  $\nu\text{C}-\text{O}-\text{C}$  e  $\nu\text{C}-\text{C}$ ) (Ladjal-Ettoumi et al., 2024; Shekh et al., 2016; Meng et al., 2014). Os cultivos que expressaram maior intensidade das bandas nessa região foram o NPK-1, seguido do NPK-2 e NPK-3. Para produção de carboidratos em cepas de *Chlorella*, uma estratégia é a limitação ou a privação de nitrogênio (Fang et al., 2024), o que é corroborado pela baixa razão molar N:P destes meios. Além disso, o acúmulo de carboidratos observado

no cultivo com NPK-2 também pode ser associado ao fato de este meio apresentar os menores valores de NT.

A banda entre  $\sim 3500-3000\text{ cm}^{-1}$  corresponde à vibração nOH causada principalmente pela presença de polissacarídeos ou nNH de proteínas na biomassa (Yakoub et al., 2024; Zhu, Liu et al., 2024). Os polissacarídeos são muito importantes para a estrutura da parede celular das microalgas do gênero *Chlorella* (Coronado-Reyes et al., 2020). A biomassa do cultivo com NPK-6 apresentou um pico mais acentuado nesta região, o que pode indicar a banda de proteínas, alongamento N-H, sobreposta ao alongamento OH. Contribuições secundárias de proteínas ricas em serina e tirosina para absorção nOH não podem ser desconsideradas.

Um dos polissacarídeos mais importantes presentes em cepas de *Chlorella* é o  $\beta$ -1,3 glucano (Safi et al., 2014). Bandas características de ligações glicosídicas podem ser identificadas em  $\sim 890\text{ cm}^{-1}$  (atribuída à região anomérica) representa a ligação  $\beta$ -1,3 da ligação  $\beta$ -glicosídica. A banda em  $\sim 1160\text{ cm}^{-1}$  também pode indicar a presença de  $\beta$  e  $\alpha$ -glucano (Bikmurzin et al., 2022). É possível observar que todos os cultivos obtiveram sinais nesta região, sendo o NPK-6 o que apresentou menor intensidade.

Os lipídios têm bandas de absorção características em  $\sim 1740\text{ cm}^{-1}$  (estiramento C=O de ésteres de lipídios e ácidos graxos) e em  $\sim 3000-2800\text{ cm}^{-1}$  (alongamento C-H) (Meng et al., 2014; Phukan et al., 2011). A intensidade de absorção dessas duas regiões corresponde ao conteúdo lipídico da biomassa (Meng et al., 2014). O pico em  $\sim 1236\text{ cm}^{-1}$  também pode estar associado aos lipídios constituídos por ésteres de triacilglicerol (Yakoub et al., 2024).

As condições de cultivo que melhoram a produção lipídica em *Chlorella* consistiram no aumento da fonte de carbono, principalmente carbono orgânico e deficiência de nitrogênio (Fang et al., 2024; Shekh et al., 2016). Geralmente, o acúmulo de lipídios acontece quando a *Chlorella* cresce em um ambiente desfavorável e em condições de estresse (Coronado-Reyes et al., 2020; Je et al., 2020). A deficiência de fósforo também é um fator que contribui para o acúmulo de lipídios em biomassa de *Chlorella* (Je et al., 2020). As condições que tiveram maiores picos nesta região foram os cultivos em NPK-4 e NPK-5, o que pode ser uma resposta aos níveis de carbono, fósforo e nitrogênio.

O cultivo em NPK-6 produziu biomassa com menores intensidades nas regiões de carboidratos e lipídios, o que pode indicar a preferência de *Chlorella* sp. na biossíntese de proteínas nesta condição.

Para identificar padrões e *clusters* associados a essas variações, os espectros de FTIR foram analisados posteriormente por PCA, e o resultado foi ilustrado na Figura 4a. O gráfico de plotagem PC1 vs PC2 explica 94,22% da variação total (PC1 respondendo por 87,08% e PC2 por 7,14%). Os gráficos de *loadings* foram usados para identificar quais principais bandas espectrais infravermelhas eram responsáveis por agrupar as amostras nos lados positivos ou negativos dos eixos no gráfico de PCA.

O gráfico de *loadings* PC1 (Figura 4b) indica que amostras agrupadas no lado positivo do eixo PC1 estão relacionadas às bandas características de lipídios, como em  $\sim 1700$  e  $\sim 1236\text{ cm}^{-1}$ , e carboidratos, bandas em torno de  $\sim 1200\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ . Enquanto o lado negativo está relacionado às bandas de proteínas, bandas em  $\sim 1700\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ . Já no gráfico de *loadings* PC2 (Figura 4c), o lado positivo parece estar relacionado a ligações de lipídios, entre  $\sim 3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ , e proteínas, entre  $\sim 1630\text{--}1540\text{ cm}^{-1}$ , enquanto o lado negativo parece estar relacionado a bandas de alguns carboidratos específicos, com bandas entre  $\sim 3500\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ ,  $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$  e  $950\text{ cm}^{-1}$ .

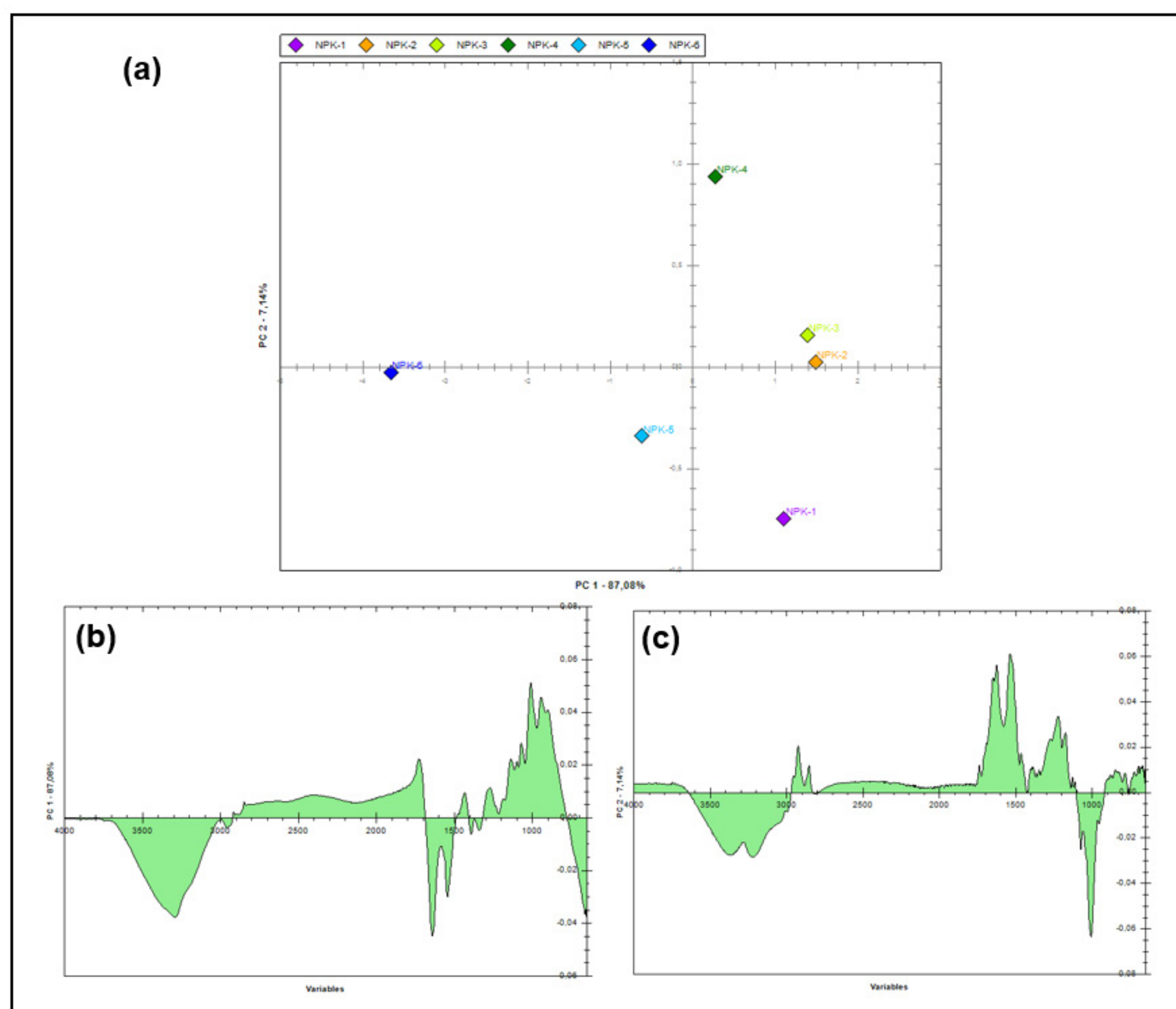


Figura 4. Análise de Componentes Principais (PCA) dos espectros AR-FTIR da biomassa de *Chlorella* sp. em diferentes meios de cultivo. (a) Gráfico PC1 vs PC2; (b) gráfico de *loadings* da PC1; (c) gráfico de *loadings* da PC2. A PCA foi conduzida sob a triplicata dos espectros, que foram pré-processadas usando normalização vetorial e centralização média.

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo investigou o crescimento de *Chlorella* sp. em meios de cultivo com diferentes fertilizantes NPK ao longo de 28 dias, avaliando a densidade celular, a densidade óptica, o pH e a composição bioquímica da biomassa por meio de análises de FTIR. Os resultados indicaram que o fertilizante NPK-4 promoveu um maior crescimento de *Chlorella* sp., mantendo a fase logarítmica até o final do experimento. Isso sugere que, entre os fertilizantes testados, o NPK-4 apresentou a maior produtividade de biomassa.

A análise de FTIR revelou bandas características de compostos bioquímicos, como proteínas, lipídios e carboidratos. A partir das intensidades dessas bandas, observa-se que o fertilizante NPK-4 favoreceu um maior acúmulo desses compostos, sendo considerado o mais eficiente para produzir uma biomassa com alto potencial biotecnológico. Contudo, o NPK-6 também se destacou, apresentando intensidades elevadas nas bandas associadas a proteínas.

Observou-se ainda uma tendência de redução do pH nos cultivos ao longo do tempo, resultando em um ambiente mais ácido ao final do período experimental. Essa acidificação pode impactar a disponibilidade de nutrientes e comprometer o crescimento da microalga e, portanto, com ajuste do pH próximo a 7.0, pode-se ter uma melhor condição de crescimento.

Além disso, destaca-se que a relação molar N:P dos fertilizantes comerciais pode limitar tanto o crescimento quanto a composição bioquímica de *Chlorella* sp. Contudo, em condições de manipulação controlada dos nutrientes, é possível obter uma relação N:P mais adequada. No entanto, fatores econômicos incentivam o uso de fertilizantes comerciais já disponíveis. Para reduzir os custos de produção de *Chlorella*, torna-se necessário investigar e desenvolver novos fertilizantes específicos para microalgas que possam ser viáveis em escala comercial.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) processo 306216/2022-1 e 400862/2019-0, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) código 001 e à UFCE por intermédio da pesquisadora Dra. Kelma M. dos Santos Pires Cavalcante que forneceu a cepa de *Chlorella* sp.

---

# BIOCHEMICAL PROFILE EVALUATION BY FTIR SPECTROSCOPY OF *CHLORELLA* SP. BIOMASS CULTIVATED WITH DIFFERENT NPK-BASED AGRICULTURAL FERTILIZERS

**ABSTRACT:** Microalgae are promising sources of high-value metabolites with applications in biofuels, food, cosmetics, and pharmaceuticals. Among them, *Chlorella* sp. stands out for its adaptability to different conditions and potential for biosynthesis of specific compounds. However, the economic feasibility of large-scale production is limited by high input costs, making the use of low-cost fertilizers a promising alternative. This study evaluated the behavior and composition of *Chlorella* sp. biomass cultivated with six types of NPK fertilizers (3 g L<sup>-1</sup>) in culture medium. Over 28 days, cell density (CD), optical density (OD), and pH were monitored. The media were characterized for nitrogen, organic and inorganic carbon, and soluble phosphorus. The dry biomass was analyzed using ATR-FTIR to identify biochemical changes. The results showed that the NPK-4 fertilizer (characterized by P = 105.32 mg L<sup>-1</sup>, TOC = 26.94 mg L<sup>-1</sup>, IC = 3.12 mg L<sup>-1</sup>, TN = 69.77 mg L<sup>-1</sup>) promoted higher CD, OD, and pH stability compared to the other fertilizers at the end of the experiment. FTIR analysis of the biomass revealed the presence of proteins, lipids, and carbohydrates, with NPK-4 promoting the highest accumulation of these compounds, indicating its biotechnological potential. NPK-6 also stood out for its higher intensity in protein-related bands, suggesting biomass with potential for specific applications. These results indicate that fertilizer selection can significantly influence the biochemical profile of *Chlorella* sp. biomass, with implications for its use in biotechnology.

**Keywords:** Microalgae. FTIR. *Chlorella*. Fertilizers. Growth.

---

## REFERÊNCIAS

Bikmurzin, R. et al. (2022). FT-IR method limitations for β-glucan analysis. *Molecules*, 27.14, 4616.

Braun, J. C. A. & Colla, L. M. (2023). Use of Microalgae for the Development of Biofertilizers and Biostimulants. *BioEnergy Research*, 16(1), 289-310.



Chabili, A. et al. (2024). A comprehensive review of microalgae and cyanobacteria-based biostimulants for agriculture uses. *Plants*, 13.2, 159.

Chen, Chun-Yen et al. (2023). Optimizing heterotrophic production of *Chlorella sorokiniana* SU-9 proteins potentially used as a sustainable protein substitute in aquafeed. *Bioresource technology*, 370, 128538.

Coronado-Reyes, J. A. et al. (2020). *Chlorella vulgaris*, a microalgae important to be used in Biotechnology: a review. *Food Science and Technology*, 42, e37320.

De Morais, M. G., Vaz, B. D. S., De Morais, E. G. & Costa, J. A. V. (2015). Biologically Active Metabolites Synthesized by Microalgae. *BioMed Research International*.

Fang, Y., Cai, Y., Zhang, Q., Ruan, R. & Zhou, T. (2024). Research status and prospects for bioactive compounds of *Chlorella* species: Composition, extraction, production, and biosynthesis pathways. *Process Safety and Environmental Protection*, 191, 345–359.

Helfer, G., Bock, F., Marder, L., Furtado, J., Costa, A., Ferrao, M. (2015). Chemostat: Exploratory multivariate data analysis software. *Química Nova*.

Je, S. & Yamaoka, Y. (2022). Biotechnological approaches for biomass and lipid production using microalgae *Chlorella* and its future perspectives. *Journal of microbiology and biotechnology*, 32.11, 1357.

Jiang, M. & Nakano, S. I. (2022). New insights into the stoichiometric regulation of carotenoid production in *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology Reports*, 20, 101227.

Ladjal-Ettoumi, Y. et al. (2024). Physicochemical, functional, and nutraceutical properties of *Spirulina* and *Chlorella* biomass: a comparative study. *Algal Research*, 81, 103561.

Magyar, T. et al. (2024). Improvement of N and P ratio for enhanced biomass productivity and sustainable cultivation of *Chlorella vulgaris* microalgae. *Heliyon*.

Maltsev, Y., Kulikovskiy, M. & Maltseva, S. (2023). Nitrogen and phosphorus stress as a tool to induce lipid production in microalgae. *Microbial Cell Factories*, 22.1, 239.

Mao, X. et al. (2023). Proteomic analysis reveals mechanisms of mixed wastewater with different N/P ratios affecting the growth and biochemical characteristics of *Chlorella pyrenoidosa*. *Bioresource Technology*, 381, 129141.

- Meng, Y. et al. (2014). Application of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in determination of microalgal compositions. *Bioresource technology*, 151, 347–354.
- Nayak, M., Thirunavoukkarasu, M. & Mohanty, R. C. (2016). Cultivation of freshwater microalga *Scenedesmus* sp. using a low-cost inorganic fertilizer for enhanced biomass and lipid yield. *The Journal of general and applied microbiology*, 62.1, 7–13.
- Phukan, M. M. et al. (2011). Microalgae *Chlorella* as a potential bio-energy feedstock. *Applied Energy*, 88.10, 3307–3312.
- Piasecka, A. & Baier, A. (2022). Metabolic and Proteomic Analysis of *Chlorella sorokiniana*, *Chloroidium saccharofilum*, and *Chlorella vulgaris* Cells Cultured in Autotrophic, Photoheterotrophic, and Mixotrophic Cultivation Modes. *Molecules*, 4817.
- Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E. & Tava, A. (2019). Microalgal Biostimulants and Biofertilisers in Crop Productions. *Agronomy*.
- Safi, C. et al. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 35, 265–278.
- Shekh, A. Y. et al. (2016). Stress enhances poly-unsaturation rich lipid accumulation in *Chlorella* sp. and *Chlamydomonas* sp. *Biomass and Bioenergy*, 84, 59–66.
- Slinksienė, R. et al. (2022). Use of microalgae biomass for production of granular nitrogen biofertilizers. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 15.2, 416–426.
- Uma, V. S., Usmani, Z., Sharma, M., Diwan, D., Guo, M., Tuohy, M. G., Makatsoris, C., Zhao, X., Thakur, V. K. & Gupta, V. K. (2023). Valorisation of algal biomass to value-added metabolites: emerging trends and opportunities. *Phytochemistry Reviews*, 22(4), 1015–1040.
- Zhu, L., Liu, M., Wang, Y., Zhu, Z. & Zhao, X. (2024). *Euglena gracilis* protein: effects of different acidic and alkaline environments on structural characteristics and functional properties. *Foods*, 13, 2050.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# CAROTENOIDES MICROBIANOS: EXPLORANDO O POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DA CAATINGA

*Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro Rodrigues<sup>1\*</sup>, Fábio Nildo dos Santos<sup>1</sup>, José Adeilson da Silva<sup>1</sup>, Gessica dos Santos Silva<sup>1</sup>, Jefferson Renan Pinheiro Rodrigues<sup>2</sup>, Krause Gonçalves Silveira Albuquerque<sup>2</sup>, Luciane Maria Colla<sup>3</sup>, Tayane de Cássia Dias Mendes Silva<sup>1</sup>, Maria Betânia Melo de Oliveira<sup>1</sup>, Thiago Henrique Napoleão<sup>1</sup>*

---

1 Universidade Federal de Pernambuco, 50670-420, Recife, Brasil.

2 Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, Brasil.

3 Universidade de Passo Fundo, 99052-900, Passo Fundo, Brasil.

\*E-mail: jaqueline.jss@ufpe.br

## RESUMO

O domínio Caatinga é considerado um dos biomas mais importantes do mundo. O clima é marcado por insolação mais intensa, pouca pluviosidade e altas temperaturas diurnas, enquanto o solo pode atingir temperaturas próximas a 60°C. Além disso, apresenta uma vegetação xerófila adaptada a inúmeras condições desfavoráveis. As características desse ambiente contribuem para a investigação de compostos bioativos presentes em plantas medicinais e no solo. Com base nisso, o objetivo desse trabalho é descrever a produção de carotenoides a partir de microrganismos, bem como o potencial biotecnológico do domínio Caatinga nesse contexto, fazendo uso da revisão narrativa da literatura. Estudos em português e inglês, publicados entre 2014 e 2024, foram selecionados nas bases eletrônicas: Periódicos CAPES, Pubmed e Científico Eletrônico Biblioteca Conectados (SCIELO). Foi realizado o cruzamento entre os principais descritores: caatinga, compostos bioativos e biotecnologia. Foi estabelecido como critério de exclusão publicações que não apresentaram adesão ao tema de estudo proposto. Um dos principais compostos produzidos por plantas da Caatinga são os carotenoides. Suas propriedades antioxidante, fotoprotetora, antimicrobiana, anti-inflamatória e anticancerígena têm despertado o interesse das indústrias farmacêuticas, cosméticas e de alimentos. Estudos têm relatado a correlação da atividade antioxidante e o sequestro de radicais livres com a presença de  $\beta$ -carotenos em plantas da Caatinga, como *Passiflora cincinnata*, *Chamaecrista repens*, *Rollinia leptopetala*, *Serjania glabrata*, *Diospyros gaultheriifolia* e *Mimosa ophthalmocentra*. Outra fonte importante de carotenoide está nos microrganismos carotenogênicos encontrados no solo da Caatinga, chamados de hostis ou extremos. Os microrganismos encontrados frequentemente nesse ambiente pertencem aos gêneros *Actinoplanes*, *Agrococcus*, *Arsenicococcus*, *Cellulomonas*, *Kocuria*, *Microbacterium*, *Rhodococcus*, *Serinicoccus* e *Streptomyces*. A síntese de carotenoides é uma das estratégias eficazes desenvolvidas para superar os fatores desfavoráveis. É importante destacar a presença de levedura no solo, mais especificamente *Rhodotorula glutinis*. Estudos a partir da extração de  $\beta$ -caroteno desse isolado mostrou inibir o crescimento celular de células tumorais, um dado importante para a comunidade científica. O domínio Caatinga é uma fonte potencial de compostos bioativos considerada região de interesse para biotecnólogos e indústrias em geral. Dessa forma, por constituir um hábitat rico, muitas pesquisas estão focadas em encontrar compostos e metabólitos secundários nas plantas e solo desse ambiente semiárido.

**Palavras-chave:** Caatinga. Compostos bioativos. Biotecnologia.

---

# 1 INTRODUÇÃO

O domínio Caatinga é marcado pelo clima semiárido, floresta tropical sazonalmente seca, chuvas baixas e irregulares, altas temperaturas e radiação solar. Localizado no nordeste do Brasil, esse bioma apresenta déficits hídricos durante a maior parte do ano, resultado da evaporação e a dessecação do solo (Mutti et al., 2019; Oliveira et al., 2017). A vegetação da Caatinga é composta por *Euphorbiaceae*, *Asteraceae*, *Rubiaceae* e *Malvaceae*, evidenciadas nos estudos florísticos que tratam da Caatinga (Fernandes et al., 2020). A grande variedade de plantas encontrada nessa região a torna importante para a comunidade local, uma vez que a maioria delas tem fins medicinais (Magalhães et al., 2019; Santos et al., 2017, 2018).

Dentre os compostos produzidos por algumas plantas da Caatinga, destaca-se os carotenoides. Além das plantas, os microrganismos carotenogênicos presentes no domínio Caatinga são outra fonte considerável de carotenoides. Contudo, o conhecimento a respeito desses microrganismos ainda é escasso, pois grande parte dos estudos concentra-se nos carotenoides sintetizados pelas plantas (Mendes-Silva et al., 2020). Estudos recentes revelam que microrganismos são excelentes fontes de carotenoides, já que possuem um ciclo de vida mais curto, não dependem de fatores sazonais, produzem diferentes tons de cores e propriedades biológicas. Além disso, é possível obter um alto rendimento de carotenoides microbianos a partir de estratégias como o uso de cepas específicas e adição de enzimas microbianas (Mendes-Silva et al., 2020; Sundararajan & Ramasamy, 2024; Wang et al., 2018).

Os carotenoides são biomoléculas naturais produtoras dos pigmentos amarelo brilhante, laranja e vermelho (Wang et al., 2018). Além disso, são encontrados com frequência em frutas e vegetais, podendo ser sintetizados por algas, fungos filamentosos, leveduras e bactérias (Ram et al., 2020). Grande parte dos carotenoides comercializados provém da extração vegetal e síntese química. No entanto, problemas como a variabilidade sazonal e geográfica, fatores esses que não podem ser controlados, interferem na produção e comercialização desse composto (Bogacz-Radomska et al., 2020). Já a síntese química envolve a formação de resíduos perigosos para a saúde, causando impactos negativos no meio ambiente (Valduga et al., 2009). Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é descrever a produção de carotenoides a partir de fontes renováveis, bem como o potencial biotecnológico do domínio Caatinga nesse contexto.

## 2 METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma revisão narrativa da literatura, realizada por meio de artigos coletados em inglês, português e espanhol nas bases de dados CAPES, Pubmed e Científico Eletrônico Biblioteca Conectados (SCIELO). Como Descritores em Ciências da Saúde (DeCs), foram utilizados os seguintes termos: caatinga, compostos bioativos e biotecnologia combinados com os operadores booleanos “AND” e “OR”. Como critério de inclusão, os artigos deveriam abordar assuntos relacionados aos descritores já mencionados. Foram excluídos materiais duplicados e aqueles que não respondiam à questão de pesquisa.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DO DOMÍNIO CAATINGA

O Brasil possui uma extensa área continental (8.510.000 km<sup>2</sup>), ocupando o 5º lugar entre os países com maior área territorial, perdendo apenas para Rússia, Canadá, China e Estados Unidos (IBGE, 2011, 2018). Os escudos cristalinos, bacias sedimentares e terrenos vulcânicos presentes no Brasil deram origem a seis núcleos biológicos ecológicos distintos (biomas) entre eles. O território brasileiro pode ser dividido em seis biomas distintos: i) Amazônia, ii) Mata Atlântica, iii) Cerrado, iv) Caatinga, v) Pantanal e vi) Pampa (MMA, 2011). A Caatinga é considerada um bioma exclusivamente brasileiro, não encontrado em nenhum outro país do mundo. Apresenta características como um clima semiárido, longos períodos de seca e uma vegetação xerófila adaptada a inúmeras condições desfavoráveis (Noutcheu et al., 2024; Oliveira Filho, 2024). A temperatura nesse hábitat pode variar entre 23°C e 27°C, enquanto o solo pode atingir temperaturas próximas a 60°C (Apgaua et al., 2014).

Nesse cenário, um dos compostos que chamam atenção por apresentarem efeitos benéficos à saúde e que são produzidos por algumas plantas da Caatinga são os carotenoides. Estudos como os de David et al. (2007) revelam a correlação de atividades antioxidante e citotóxica com a presença de  $\beta$ -carotenos em plantas da Caatinga. As plantas que expressaram melhor esses resultados podem ser vistas na tabela 1.

Tabela 1. Atividade de eliminação de radicais, antioxidante e citotóxica dos extratos metanólicos de plantas da Caatinga

|  |                 | IC 50 em mg/ml | Plantas   | Parte usada | Atividade de eliminação de radicais (ensaio DPPH) | Atividade antioxidante (teste de branqueamento do $\beta$ -caroteno) | BST (teste de letalidade de camarão de salmoura) |
|--|-----------------|----------------|-----------|-------------|---|--|--|
| <i>Passiflora cincinnata</i> Mast. (Passifloráceas), (Agra 5873)   | Partes aéreas   | 22,3           | 18,8-27,3 | 70,1        | 57,6-82,6   | 266,9  | 193,2-369,4                                      |
| <i>Chamaecrista repens</i> (Vog.) HS Irwin e Barneby var. multijuga (Benth.) HS Irwin et Barneby (Caesalpinaceae), (Agra 5924) | Partes aéreas   | 2,0            | 1,3-3,1   | 68,3        | 61,5-75,0   | 269,3  | 256,0-282,9                                      |
| <i>Rollinia leptopetala</i> RE Pe. (Annonáceas), (Agra 5700)   | Folhas e caules | 3,5            | 3,1-4,0   | 57,3        | 44,9-69,7   | 0,6  | 0,2-1,8  |
| <i>Serjania glabrata</i> Kunth (Sapindaceae), (Barbosa 2266)   | Partes aéreas   | 2,8            | 2,6-3,1   | 57,1        | 48,8-65,5   | 248,0  | 197,4-313,9                                      |
| <i>Diospyros gaultheriifolia</i> Mart. e Miq. (Ebenáceas), (Agra 5626)   | Partes aéreas   | 5,5            | 4,1-7,6   | 56,1        | 52,4-59,9   | 883,0  | 767,1-1015,4                                     |
| <i>Mimosa opthalmocent</i> Mart. ex Benth. (Mimosaceae), (Agra 5933)   | Partes aéreas   | 6,2            | 5,9-6,5   | 52,2        | 34,8-69,7   | 185,1  | 103,5-325,3                                      |

Fonte: David et al. (2007)

Outra fonte relevante de carotenoides são os microrganismos carotenogênicos encontrados no solo do Caatinga. No entanto, pouco se conhece sobre eles, pois apenas 1% das bactérias desse domínio (incluindo as pigmentadas e as não pigmentadas) já foram descobertas e descritas. Além disso, muitos trabalhos têm focado em estudar os carotenoides sintetizados pelas plantas, bem como suas respectivas atividades biológicas (Martin et al., 2003; Mendes-Silva et al., 2020).

## 3.2 MICRORGANISMOS ISOLADOS DO DOMÍNIO CAATINGA COMO NOVA FONTE DE CAROTENOIDES

Entende-se por hostis ou extremos os microrganismos obtidos de condições extremas ou desfavoráveis para sua sobrevivência (Tian & Hua, 2010). Como forma de garantir sua presença no ambiente, esses microrganismos desenvolvem mecanismos bioquímicos e produzem metabólitos para superar cenários nocivos. Uma estratégia eficaz para minimizar os efeitos dos danos oxidativos nas células e outros danos causados pela alta exposição solar é a síntese de pigmentos carotenoides (Ram et al., 2020). Por apresentar uma zona árida ou semiárida, o solo da Caatinga é apontado como um ambiente rico, possuindo microrganismos capazes de sintetizar substâncias naturais com potencial biotecnológico, cujas atividades biológicas são extremamente ricas e ainda pouco exploradas (Duarte et al., 2012; Rodrigues et al., 2018).

O filo que representa grande parte dos microrganismos encontrados na Caatinga é chamado de Actinobacteria, estes atuam no equilíbrio ecológico desse ambiente e são famosos pela sua riqueza e diversidade (Canganella & Wiegel, 2011; I. L. da Silva et al., 2015; V. M. A. Silva et al., 2015). Esse grupo é responsável por produzir diferentes cores de carotenoides, enzimas extracelulares e importantes metabólitos secundários que garantem sua resistência ambiental (Rodrigues et al., 2018). A partir do estudo realizado por Ramos (2015) com 28 cepas de actinobactérias oriundas de amostras de solo do estado do Ceará, limite com o estado do Piauí, foi possível analisar a produção de pigmentos, diversidade cromogênica, bem como classificar algumas linhagens quanto à coloração e concluir que apresentam potencial para produção de pigmentos de interesse industrial.

Além das actinobactérias, é possível destacar algumas leveduras presentes no solo da Caatinga. Em um trabalho realizado com amostras do solo semiárido pernambucano, a partir do isolamento da levedura *Rhodotorula glutinis*, foi possível obter  $\beta$ -caroteno com um baixo custo de produção. O estudo também avaliou o papel do carotenoide como inibidor do crescimento de células tumorais e ação sobre o câncer de mama e leucemia promielocítica (Andrade, 2016). Do ponto de vista comercial e econômico, a produção de carotenoides utilizando leveduras tem se mostrado promissora, visto que apresentam altas taxas de crescimento, capacidade de assimilar uma variedade de substratos e rápida taxa de produção de metabólitos secundários (Fakankun & Levin, 2023; Sereti et al., 2024a).



### 3.3 CAROTENOIDES

Os carotenoides são hidrocarbonetos sintetizados por plantas, algas, leveduras e algumas bactérias, responsáveis por produzir os pigmentos vermelho, amarelo e laranja. Fazem parte do grupo de moléculas incapazes de serem produzidas pelos animais, dependendo de fontes externas para absorção (Ram et al., 2020). O número de carotenoides já descobertos chega a mais de 1100, com diferentes cores e propriedades biológicas-funcionais (Yabuzaki, 2017). O surgimento de novas doenças ao longo dos anos despertou a necessidade de busca de compostos bioativos oriundos de fontes naturais. Quando comparados aos pigmentos sintéticos, os carotenoides naturais são considerados mais ecológicos e benéficos para a saúde (Li et al., 2024).

Durante a década de 70, houve um crescimento vigoroso nesse campo com a conscientização da sociedade pelo consumo de pigmentos “mais frescos”, “mais naturais” e “minimamente processados” ao invés dos sintetizados quimicamente, dada a preocupação crescente com os potenciais riscos carcinogênicos e mutagênicos associados a conservantes químicos. Dessa forma, houve um aumento no interesse das indústrias de alimentos e farmacêutica por alternativas sustentáveis e naturais como microalgas, leveduras e bactérias (Numan et al., 2018).

Os carotenoides apresentam várias atividades biológicas benéficas para a saúde, dentre elas a fotoproteção. Essa capacidade provém da sua predisposição de absorver o espectro visível da energia luminosa (400–500 nm), com isso eles podem ser encontrados frequentemente na clorofila, auxiliando a captação de luz em plantas verdes. Como uma resposta a estresses bióticos e abióticos, muitos organismos são propensos a acumular carotenoides através da regulação positiva da via biossintética dos carotenoides. Esses pigmentos destacam-se também por apresentar atividades de provitamina A, alto potencial antioxidante, permitindo ter ação sobre doenças fatais, como câncer e degeneração muscular relacionada à idade (Ram et al., 2020; Rojas-Garbanzo et al., 2017).

Além disso, os carotenoides naturais possuem atividade antimicrobiana contra vários agentes patogênicos (Vargas-Sinisterra & Ramírez-Castrillón, 2021). Em um estudo realizado por Sereti et al. (2024), os extratos de carotenoides obtidos de duas novas linhagens de *Rhodospiridium paludigenum* a saber NCYC 2663 e NCYC 2664, exibiram atividade antimicrobiana contra *Staphylococcus epidermidis*, *Klebsiella oxytoca*, *Listeria monocytogenes* e *Pseudomonas aeruginosa*, ainda que em graus diferentes como se pode ver na tabela 2.

Tabela 2. Atividade antibacteriana com concentrações diferentes de extrato de carotenoide (13,5, 18,0, 36,0, 54,0, 72,0mg/L) obtidos de *Rhodospiridium paludigenum* NCYC 2663

|                                   | Concentração de carotenoides (mg/L) |       |       |        |        |
|-----------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|--------|--------|
|                                   | 13,5                                | 18    | 36,0  | 54,0   | 72,0   |
| <i>Staphylococcus epidermidis</i> | 50,0%                               | 58,0% | 68,0% | 100,0% | 100,0% |
| <i>Klebsiella oxytoca</i>         | 0,0%                                | 0,0%  | 44,4% | 100%   | 100%   |
| <i>Listeria monocytogenes</i>     | 22,0%                               | 33,7% | 35,0% | 95,4%  | 100%   |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i>     | 30,8%                               | 31,4% | 36,5% | 41,9%  | 65,6%  |

\*Legenda: Em porcentagem (%) encontram-se os dados da Concentração Inibitória Mínima (MIC).  
Fonte: Sereti et al. (2024)

O desenvolvimento e a produção comercial de carotenoides existe desde 1954. São encontrados com frequência nos corantes alimentares, suplementos nutricionais, que ajudam a manter os aromas e as vitaminas dos alimentos (Marova et al., 2012). A aplicação dos carotenoides varia desde os cosméticos, corantes alimentícios, aditivos, aquicultura à indústria farmacêutica (Loureiro et al., 2016; McCusker et al., 2019; Suzuki et al., 2018). Estão presentes também na produção de margarina e manteiga, sucos e bebidas de frutas, sopas, laticínios, sobremesas, açúcar, molhos para salada, carnes, massas, ovos e maionese (Aksu & Eren, 2007; Schroeder & Johnson, 1995). A indústria farmacêutica faz uso para aplicação em probióticos, xaropes, agentes antimicrobianos, no controle de doenças e na modulação de reações imunológicas. Além disso, podem ser utilizados como marcadores de qualidade ambiental, protetor solar, bronzeadores, cremes, entre outros produtos (El-Banna et al., 2012; Latha, 2012).

## 4 CONCLUSÕES

A produção de carotenoides utilizando fontes microbianas permite a obtenção de compostos benéficos à saúde, pois a biossíntese feita pelos microrganismos elimina os riscos de toxicidade existentes nos pigmentos sintéticos. Estes corantes são comercialmente viáveis e podem ser expandidos nos diversos setores industriais. Muitas pesquisas estão sendo direcionadas para encontrar novas fontes sustentáveis de pigmentos com propriedades promissoras, bem como estratégias que possam aumentar seu rendimento. Nesse contexto, o bioma Caatinga tem se mostrado um habitat rico para a obtenção de carotenoides, devido à predisposição dos microrganismos existentes

nesse ambiente de produzirem pigmentos. Sendo, portanto, uma porta para a descoberta de novos ativos e novas tecnologias que contribuam para o desenvolvimento industrial e a promoção da sustentabilidade.

---

## MICROBIAL CAROTENOIDS: EXPLORING THE BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF CAATINGA

**ABSTRACT:** The Caatinga domain is considered one of the most important biomes in the world. The climate is characterized by more intense sunlight, little rainfall, and high daytime temperatures, while the soil can reach temperatures close to 60°C. In addition, it presents xerophilic vegetation adapted to numerous unfavorable conditions. The characteristics of this environment contribute to the investigation of bioactive compounds present in medicinal plants and in the soil. Based on this, the objective of this work is to describe the production of carotenoids from microorganisms, as well as the biotechnological potential of the Caatinga domain in this context, using a narrative review of the literature. Studies in Portuguese and English published between 2014 and 2024 were selected from the electronic databases: CAPES Journals, Pubmed, and Científico Eletrônico Biblioteca Conectados (SCIELO). The main descriptors were crossed: caatinga, bioactive compounds, and biotechnology. The exclusion criterion established were publications that did not adhere to the proposed study theme. One of the main compounds produced by Caatinga plants are carotenoids. Their antioxidant, photoprotective, antimicrobial, anti-inflammatory and anticancer properties have attracted the interest of the pharmaceutical, cosmetic and food industries. Studies have reported the correlation of antioxidant activity and free radical scavenging with the presence of  $\beta$ -carotenes in Caatinga plants, such as *Passiflora cincinnata*, *Chamaecrista repens*, *Rollinia leptopetala*, *Serjania glabrata*, *Diospyros gaultheriifolia* and *Mimosa ophthalmocentra*. Another important source of carotenoids is in the carotenogenic microorganisms found in the Caatinga soil, called hostile or extreme. The microorganisms frequently found in this environment belong to the genera *Actinoplanes*, *Agrococcus*, *Arsenicicoccus*, *Cellulomonas*, *Kocuria*, *Microbacterium*, *Rhodococcus*, *Serinicoccus* and *Streptomyces*. Carotenoid synthesis is one of the effective strategies developed to overcome unfavorable factors. It is important to highlight the presence of yeast in the soil, more specifically *Rhodotorula glutinis*. Studies based on the extraction of  $\beta$ -carotene from this isolate have shown that it inhibits the cell growth of tumor cells, an important

fact for the scientific community. The Caatinga domain is a potential source of bioactive compounds and is considered a region of interest for biotechnologists and industries in general. Thus, because it constitutes a rich habitat, many studies are focused on finding secondary compounds and metabolites in the plants and soil of this semiarid environment.

**Keywords:** Caatinga. Bioactive compounds. Biotechnology.

---

## REFERÊNCIAS

Aksu, Z. & Eren, A. T. (2007). Production of carotenoids by the isolated yeast of *Rhodotorula glutinis*. *Biochemical Engineering Journal*, 35(2), 107–113. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2007.01.004>

Andrade, R. F. S., Lima, R. A., Ribeaux, D. R., Araújo, H. W. C. A., Franco, L. O., Pessoa-Júnior, A. & Campos-Takaki, G. M. (2016). Production of  $\beta$ -Carotene by a Newly Isolated *Rhodotorula Glutinis* UCP1555 Strain and Cytotoxic Effect Evaluation. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 10(5). <https://doi.org/10.17265/1934-7375/2016.05.003>

Apgaua, D. M. G., dos Santos, R. M., Pereira, D. G. S., de Oliveira Menino, G. C., Pires, G. G., Fontes, M. A. L. & Tng, D. Y. P. (2014). Beta-diversity in seasonally dry tropical forests (SDTF) in the Caatinga Biogeographic Domain, Brazil, and its implications for conservation. *Biodiversity and Conservation*, 23(1), 217–232. <https://doi.org/10.1007/S10531-013-0599-9/TABLES/4>

Bogacz-Radomska, L., Harasym, J. & Piwowar, A. (2020). Commercialization aspects of carotenoids. *Carotenoids: Properties, Processing and Applications*, 327–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817067-0.00010-5>

Canganella, F. & Wiegel, J. (2011). Extremophiles: from abyssal to terrestrial ecosystems and possibly beyond. *Naturwissenschaften*, 98(4), 253–279. <https://doi.org/10.1007/S00114-011-0775-2>

David, J. P., Meira, M., David, J. M., Brandão, H. N., Branco, A., de Fátima Agra, M., Barbosa, M. R. V., de Queiroz, L. P. & Giulietti, A. M. (2007). Radical scavenging, antioxidant and cytotoxic activity of Brazilian Caatinga plants. *Fitoterapia*, 78(3), 215–218. <https://doi.org/10.1016/J.FITOTE.2006.11.015>

Duarte, R. T. D., Nóbrega, F., Nakayama, C. R. & Pellizari, V. H. (2012). Brazilian research on extremophiles in the context of astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 11(4), 325–333. <https://doi.org/10.1017/S1473550412000249>

El-Banna, A. A., El-Razek, A. M. A., El-Mahdy, A. R., El-Banna, A. A., El-Razek, A. M. A. & El-Mahdy, A. R. (2012). Some Factors Affecting the Production of Carotenoids by *Rhodotorula glutinis* var. *glutinis*. *Food and Nutrition Sciences*, 3(1), 64–71. <https://doi.org/10.4236/FNS.2012.31011>

Fakankun, I. & Levin, D. B. (2023). Oleaginous Red Yeasts: Concomitant Producers of Triacylglycerides and Carotenoids. *Encyclopedia 2023, Vol. 3, Pages 490–500*, 3(2), 490–500. <https://doi.org/10.3390/ENCYCLOPEDIA3020034>

Fernandes, M. F., Cardoso, D. & de Queiroz, L. P. (2020). An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism. *Journal of Arid Environments*, 174, 104079. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2019.104079>

IBGE. (2011). *IBGE | Biblioteca*. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=284481>

IBGE. (2018). *Atlas Geográfico Escolar - IBGE*. <https://atlasescolar.ibge.gov.br/>

Latha, B. & Jeevaratanm, K. (2012). *Estudo de toxicidade oral de treze semanas do pigmento carotenoide de Rhodoturula glutinis DFR-PDY em ratos*. 50. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/233392260\\_Thirteen-week\\_oral\\_toxicity\\_study\\_of\\_carotenoid\\_pigment\\_from\\_Rhodoturula\\_glutinis\\_DFR-PDY\\_in\\_rats](https://www.researchgate.net/publication/233392260_Thirteen-week_oral_toxicity_study_of_carotenoid_pigment_from_Rhodoturula_glutinis_DFR-PDY_in_rats)

Loureiro, R. J., Roque, F., Teixeira Rodrigues, A., Herdeiro, M. T. & Ramalheira, E. (2016). O uso de antibióticos e as resistências bacterianas: breves notas sobre a sua evolução. *Revista Portuguesa de Saúde Pública*, 34(1), 77–84. <https://doi.org/10.1016/J.RPSP.2015.11.003>

Magalhães, K. do N., Guarniz, W. A. S., Sá, K. M., Freire, A. B., Monteiro, M. P., Nojosa, R. T., Bieski, I. G. C., Custódio, J. B., Balogun, S. O. & Bandeira, M. A. M. (2019). Medicinal plants of the Caatinga, northeastern Brazil: Ethnopharmacopeia (1980–1990) of the late professor Francisco José de Abreu Matos. *Journal of Ethnopharmacology*, 237, 314–353. <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2019.03.032>

Marova, I., Haronikova, A., Petrik, S., Dvorakova, T. & Breierova, E. (2012). Production of enriched biomass by red yeasts of *Sporobolomyces* sp. Grown on waste substrates. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 1(4), 534–551. <https://office2.jmbfs.org/index.php/JMBFS/article/view/7249>

Martin, V. J. J., Piteral, D. J., Withers, S. T., Newman, J. D. & Keasling, J. D. (2003). Engineering a mevalonate pathway in *Escherichia coli* for production of terpenoids. *Nature Biotechnology*, 21(7), 796–802. <https://doi.org/10.1038/nbt833>

McCusker, M. P., Alves Ferreira, D., Cooney, D., Martins Alves, B., Fanning, S., Pagès, J. M., Martins, M. & Davin-Regli, A. (2019). Modulation of antimicrobial resistance in clinical isolates of *Enterobacter aerogenes*: a strategy combining antibiotics and chemosensitisers. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 16, 187–198. <https://doi.org/10.1016/J.JGAR.2018.10.009>

Mendes-Silva, T. de C. D., Andrade, R. F. da S., Ootani, M. A., Mendes, P. V. D., Sá, R. A. de Q. C. de, Silva, M. R. F. da, Souza, K. S., Correia, M. T. dos S., Silva, M. V. da, Oliveira, M. B. M. de, Mendes-Silva, T. de C. D., Andrade, R. F. da S., Ootani, M. A., Mendes, P. V. D., Sá, R. A. de Q. C. de, Silva, M. R. F. da, Souza, K. S., Correia, M. T. dos S., Silva, M. V. da & Oliveira, M. B. M. de. (2020). Biotechnological Potential of Carotenoids Produced by Extremophilic Microorganisms and Application Prospects for the Cosmetics Industry. *Advances in Microbiology*, 10(8), 397–410. <https://doi.org/10.4236/AIM.2020.108029>

MMA. (2011). *Ministério do Meio Ambiente. Primeiro Relatório Nacional da Convenção sobre Diversidade Biológica*. Recuperado de [https://www.acaatinga.org.br/wp-content/uploads/Conhe%C3%A7a\\_e\\_Conserve\\_a\\_Caatinga\\_Volume\\_1\\_O\\_Bioma\\_Caatinga.pdf](https://www.acaatinga.org.br/wp-content/uploads/Conhe%C3%A7a_e_Conserve_a_Caatinga_Volume_1_O_Bioma_Caatinga.pdf)

Mutti, P. R., da Silva, L. L., Medeiros, S. de S., Dubreuil, V., Mendes, K. R., Marques, T. V., Lúcio, P. S., Santos e Silva, C. M. & Bezerra, B. G. (2019). Basin scale rainfall–evapotranspiration dynamics in a tropical semiarid environment during dry and wet years. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 29–43. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2018.10.007>

Noutcheu, R., Oliveira, F. M. P., Wirth, R., Tabarelli, M. & Leal, I. R. (2024). Chronic human disturbance and environmental forces drive the regeneration mechanisms of a Caatinga dry tropical forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 22(1), 79–92. <https://doi.org/10.1016/J.PECON.2024.01.002>

Numan, M., Bashir, S., Mumtaz, R., Tayyab, S., Rehman, N. U., Khan, A. L., Shinwari, Z. K. & Al-Harrasi, A. (2018). Therapeutic applications of bacterial pigments: a review of current status and future opportunities. *3 Biotech*, 8(4), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S13205-018-1227-X/FIGURES/4>

Oliveira Filho, J. de S. (2024). Soil science research in Brazilian terrestrial biomes: A review of evolution, collaboration, current topics, and impact. *Journal of Soils and Sediments*, 24(5), 2023–2039. <https://doi.org/10.1007/S11368-024-03778-X/TABLES/1>

Oliveira, P. T., Santos e Silva, C. M. & Lima, K. C. (2017). Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1–2), 77–90. <https://doi.org/10.1007/S00704-016-1865-Z/FIGURES/14>

Ram, S., Mitra, M., Shah, F., Tirkey, S. R. & Mishra, S. (2020). Bacteria as an alternate biofactory for carotenoid production: A review of its applications, opportunities and challenges. *Journal of Functional Foods*, 67, 103867. <https://doi.org/10.1016/J.JFF.2020.103867>

Ramos, K. A., De Brito, F. A. E., Janielle, K., Nunes, F., Martins, S. C. S. (2015). Caracterização e diversidade cromogênica de actinobactérias de um nicho microbiano preservado no bioma caatinga. *Enciclopédia Biosfera*, 11, 2115–2125.

Rodrigues, J. P., Prova, S. S., Moraes, L. A. B. & Ifa, D. R. (2018). Characterization and mapping of secondary metabolites of *Streptomyces* sp. from caatinga by desorption electrospray ionization mass spectrometry (DESI–MS). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410(27), 7135–7144. <https://doi.org/10.1007/S00216-018-1315-0/FIGURES/5>

Rojas-Garbanzo, C., Gleichenhagen, M., Heller, A., Esquivel, P., Schulze-Kaysers, N. & Schieber, A. (2017). Carotenoid Profile, Antioxidant Capacity, and Chromoplasts of Pink Guava (*Psidium guajava* L. Cv. 'Criolla') during Fruit Ripening. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(18), 3737–3747. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.6B04560>

Santos, M. de O., De Almeida, B. V., Ribeiro, D. A., De Macêdo, D. G., Macêdo, M. J. F., Macedo, J. G. F., De Sousa, F. F. S., De Oliveira, L. G. S., Saraiva, M. E., Araújo, T. M. S. & Souza, M. M. A. (2017). The conservation of native priority medicinal plants in a Caatinga area in Ceará, northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89(4), 2675–2685. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160633>

- Santos, M. O., Ribeiro, D. A., De Macêdo, D. G., Macêdo, M. J. F., Macedo, J. G. F., De Lacerda, M. N. S., Macêdo, M. S. & Souza, M. M. A. (2018). Medicinal Plants: versatility and concordance of use in the caatinga area, Northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(3), 2767–2779. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170594>
- Schroeder, W. A. & Johnson, E. A. (1995). Singlet oxygen and peroxy radicals regulate carotenoid biosynthesis in *Phaffia rhodozyma*. *Journal of Biological Chemistry*, 270(31), 18374–18379. <https://doi.org/10.1074/jbc.270.31.18374>
- Sereti, F., Alexandri, M., Papadaki, A., Papapostolou, H. & Kopsahelis, N. (2024a). Carotenoids production by *Rhodospiridium paludigenum* yeasts: characterization of chemical composition, antioxidant and antimicrobial properties. *Journal of Biotechnology*, 386, 52–63. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTEC.2024.03.011>
- Silva, I. L. da, Coel, L. C. B. B. & Silva, L. A. de O. da. (2015). Potencial biotecnológico do bioma Caatinga brasileiro. *Avanços na Pesquisa*, 5(1), 1–17. <https://doi.org/10.9734/AIR/2015/17426>
- Silva, V. M. A., Lima, J. V. L., Gondim, P. de M., Martins, C. M. & Martins, S. C. S. (2015). Efeito da irrigação e do tipo de cultivo sobre a riqueza e diversidade cromogênica de actinobactérias do solo de uma região do semiárido do Ceará. *Enciclopédia Biosfera*, 11(22), 2965–2979. [https://doi.org/10.18677/enciclopedia\\_biosfera\\_2015\\_016](https://doi.org/10.18677/enciclopedia_biosfera_2015_016)
- Sundararajan, P. & Ramasamy, S. P. (2024). Current perspectives on industrial application of microbial carotenoid as an alternative to synthetic pigments. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101353. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101353>
- Suzuki, K., Kato, Y., Yui, A., Yamamoto, S., Ando, S., Rubaba, O., Tashiro, Y. & Futamata, H. (2018). Bacterial communities adapted to higher external resistance can reduce the onset potential of anode in microbial fuel cells. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 125(5), 565–571. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOSEC.2017.12.018>
- Tian, B. & Hua, Y. (2010). Carotenoid biosynthesis in extremophilic *Deinococcus-Thermus* bacteria. *Trends in Microbiology*, 18(11), 512–520. <https://doi.org/10.1016/J.TIM.2010.07.007>



Valduga, E., Tatsch, P. O., Tiggemann, L., Treichel, H., Toniazzo, G., Zeni, J., Di Luccio, M. & Fúrigo, A. (2009). Carotenoids production: microorganisms as source of natural dyes. *Química Nova*, 32(9), 2429–2436. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000900036>

Vargas-Sinisterra, A. F. & Ramírez-Castrillón, M. (2021). Yeast carotenoids: production and activity as antimicrobial biomolecule. *Archives of Microbiology*, 203(3), 873–888. <https://doi.org/10.1007/S00203-020-02111-7/TABLES/3>

Wang, N., Manabe, Y., Sugawara, T., Paul, N. A. & Zhao, J. (2018). Identification and biological activities of carotenoids from the freshwater alga *Oedogonium intermedium*. *Food Chemistry*, 242, 247–255. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.09.075>

Yabuzaki, J. (2017). Carotenoids Database: structures, chemical fingerprints and distribution among organisms. *Database*, 2017(1). <https://doi.org/10.1093/DATABASE/BAX004>



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: TRANSFORMAÇÃO DE RESÍDUOS DE CELULOSE EM ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO COMO ALTERNATIVA RENOVÁVEL

*José Adeilson da Silva<sup>1\*</sup>, Elisabete Soares de Santana<sup>2</sup>, Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro Rodrigues<sup>3</sup>, Yhasminie Karine da Silva Xavier<sup>3</sup>, Tayane de Cassia Dias Mendes Silva<sup>3</sup>, Juliana Alves da Silva<sup>1</sup>, Edilayne Eduarda Ferreira Maciel<sup>1</sup>, Fábio Nildo dos Santos<sup>4</sup>, Wesllen David Silva Vila<sup>3</sup>*

---

1 Centro Universitário do Recife, 50070-070, Recife, Brasil.

2 Faculdade Santíssima Trindade, 55800-000, Nazaré Da Mata, Brasil.

3 Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901, Recife, Brasil.

4 Centro Universitário da Vitória de Santo Antão, 55602-000, Recife, Brasil.

\*E-mail: [adeilson.silva2@ufpe.br](mailto:adeilson.silva2@ufpe.br)

# RESUMO

O etanol de segunda geração, produzido a partir de resíduos lignocelulósicos como bagaço de cana, palha de milho e resíduos florestais, é uma alternativa renovável e sustentável para a produção de energia. Este biocombustível oferece benefícios ambientais significativos, ao reduzir o impacto ambiental e promover a economia circular, ao mesmo tempo em que evita a competição com a produção de alimentos e explora o potencial da transformação de resíduos lignocelulósicos em etanol de segunda geração, destacando sua viabilidade como uma alternativa sustentável para a produção de energia. A pesquisa visa analisar os avanços tecnológicos, as vantagens ambientais e econômicas e os desafios para a implementação dessa tecnologia em larga escala. Este estudo foi conduzido por meio de uma revisão narrativa da literatura, com base em artigos selecionados de 2020 a 2024 das bases de dados SciELO, PubMed e Web of Science. Foram utilizados descritores como “Resíduos Lignocelulósicos”, “Etanol de Segunda Geração” e “Sustentabilidade” para identificar os avanços tecnológicos e as barreiras econômicas e ambientais relacionados à produção de etanol a partir de resíduos. A transformação de resíduos lignocelulósicos em etanol de segunda geração tem se mostrado uma solução promissora para a produção de biocombustíveis sustentáveis. O processo envolve etapas complexas, como pré-tratamento da biomassa, hidrólise enzimática e fermentação, que, embora eficientes, ainda enfrentam desafios técnicos e econômicos. Avanços nas tecnologias de pré-tratamento e enzimas mais eficientes podem reduzir os custos e melhorar a competitividade do etanol em relação aos combustíveis fósseis. Além disso, a utilização de resíduos agrícolas não compete com a produção de alimentos, promovendo a sustentabilidade e gerando benefícios econômicos para regiões agrícolas. A produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos lignocelulósicos é uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia renovável. Embora existam desafios econômicos e técnicos a serem superados, como os custos de processamento e a necessidade de infraestrutura, o desenvolvimento contínuo de tecnologias e políticas públicas favoráveis pode tornar essa tecnologia competitiva e escalável. Com o apoio adequado, o etanol de segunda geração pode desempenhar um papel importante na matriz energética global, contribuindo para um futuro mais sustentável.

**Palavras-chave:** Biocombustíveis. Etanol. Resíduos lignocelulósicos. Sustentabilidade.

---

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir a dependência de recursos não renováveis têm impulsionado a busca por fontes alternativas de energia, como o etanol de segunda geração. Esse biocombustível é produzido a partir de resíduos lignocelulósicos, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho e resíduos florestais, que anteriormente eram descartados ou subutilizados. Da Silva et al. (2022) destaca que a utilização desses materiais contribui para a redução do impacto ambiental associado à produção de energia, ao mesmo tempo em que aproveita recursos abundantes e de baixo custo. Além disso, a conversão de resíduos em energia reforça o conceito de economia circular, essencial para promover a sustentabilidade.

O processo de produção de etanol de segunda geração envolve tecnologias avançadas, como o pré-tratamento físico-químico, hidrólise enzimática e fermentação, que permitem a conversão eficiente da biomassa em biocombustíveis. Segundo Fernandes et al. (2024), o pré-tratamento desempenha um papel fundamental ao tornar a celulose mais acessível às enzimas, aumentando a eficiência do processo. Além disso, avanços na engenharia enzimática têm reduzido os custos de produção, tornando o etanol mais competitivo. No entanto, o estudo também aponta que a viabilidade econômica depende de investimentos contínuos em pesquisa e inovação tecnológica, bem como na adaptação das indústrias para atender às exigências desse novo modelo de produção.

Um dos principais benefícios do etanol de segunda geração é que ele não compete diretamente com a produção de alimentos, ao contrário dos biocombustíveis de primeira geração, como o etanol de milho ou de cana. Oliveira et al. (2020) argumentam que a utilização de resíduos agrícolas contribui para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a pressão sobre os cultivos alimentares e minimizar o desmatamento. Além disso, a produção de etanol lignocelulósico pode estimular o desenvolvimento econômico de regiões agrícolas, promovendo a geração de empregos e criando novas oportunidades para pequenos produtores. Esse cenário favorece a integração de práticas sustentáveis com o fortalecimento das economias locais.

Apesar dos avanços, a implementação do etanol de segunda geração ainda enfrenta desafios significativos, como altos custos iniciais, infraestrutura limitada e a necessidade de políticas públicas consistentes. Nascimento et al. (2023) destacam que o sucesso dessa tecnologia depende de incentivos governamentais e parcerias entre setores público e privado. Esses esforços podem incluir subsídios para pesquisa, financiamento para plantas industriais e campanhas de conscientização sobre os benefícios ambientais

do biocombustível. Além disso, estratégias globais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa podem aumentar a demanda por tecnologias limpas, consolidando o etanol de segunda geração como uma alternativa viável e sustentável.

O objetivo deste estudo é explorar o potencial da transformação de resíduos lignocelulósicos em etanol de segunda geração, destacando sua viabilidade como uma alternativa renovável e sustentável para a produção de energia. Busca-se analisar os avanços tecnológicos envolvidos no processo, as vantagens ambientais e econômicas proporcionadas pela utilização de resíduos agrícolas, bem como os desafios para sua implementação em larga escala, promovendo a integração de práticas sustentáveis e o fortalecimento da economia circular.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi estruturada como uma revisão narrativa da literatura, com o objetivo de investigar e sintetizar as evidências científicas sobre os avanços tecnológicos e a viabilidade da transformação de resíduos lignocelulósicos em etanol de segunda geração como uma alternativa sustentável e renovável. A pesquisa foi realizada nas bases de dados *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), PubMed e *Web of Science*, utilizando descritores selecionados como “Biocombustíveis”, “Etanol”, “Resíduos Lignocelulósicos”, “Sustentabilidade”. Para garantir maior precisão na busca, foram aplicados operadores booleanos como “AND” e “OR”, permitindo a combinação estratégica dos termos relacionados ao tema central.

Nas buscas iniciais, foram identificados 720 artigos. Os critérios de inclusão envolveram a seleção de estudos publicados entre 2020 e 2024, disponíveis na íntegra em português, inglês ou espanhol, que abordassem explicitamente o uso de resíduos lignocelulósicos na produção de etanol de segunda geração. Foram excluídos artigos que tratavam de outras formas de biocombustíveis, que não apresentavam dados originais ou cujas amostras não eram relacionadas a resíduos lignocelulósicos.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foi realizada uma triagem inicial de 480 artigos, com análise minuciosa de títulos e resumos para identificar aqueles mais alinhados ao escopo do estudo. Posteriormente, 35 textos completos foram avaliados detalhadamente para identificar evidências relevantes, avanços tecnológicos e barreiras associadas à implementação do etanol de segunda geração. Ao final, 14 artigos foram considerados elegíveis para a análise aprofundada, devido à sua contribuição significativa em aspectos técnicos, ambientais e econômicos do tema.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 1. Artigos utilizados nos resultados e discussão

| Autor              | Título  | Ano  |
|--------------------|---|------|
| De Almeida et al.  | Evidências para um sistema nacional de (eco)inovação para o setor eólico  | 2022 |
| Guiducci et al.    | Avaliação de impacto ex ante da adoção do ativo tecnológico ‘Cana Flex’ para produção de etanol de segunda geração  | 2021 |
| Vasconcelos et al. | Aproveitamento da biomassa dos aguapés ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) para produção de etanol de segunda geração, e briquetes  | 2024 |
| Távora et al.      | Etanol de segunda geração (E2G) em relação à sociedade e à mídia  | 2023 |
| Perilli et al.     | ReActio-Soluções Enzimáticas: produção de enzimas para catálise na indústria de biodiesel e etanol de segunda geração via fermentação submersa a partir de resíduos agroindustriais | 2023 |
| Silva et al.       | Cianobactérias de interesse ambiental como relevante biondicador da qualidade da água em regiões com histórico de seca  | 2024 |
| Massardi et al.    | Caracterização química do bagaço de malte e avaliação do seu potencial para obtenção de produtos de valor agregado  | 2020 |
| De Lima et al.     | Cianeto de mandioca: viabilidade econômica do uso de manipueira para erradicação do mercúrio na mineração, e proposta para Bioeconomia Circular na Amazônia, Brasil                 | 2022 |
| Dos Santos et al.  | Uso de Microalgas no Setor Agrícola e Agroindustrial  | 2022 |
| De Moura et al.    | Biomassa proveniente da casca da banana <i>Musa sapientum</i> : pré-tratamento e hidrólise ácida para análise da viabilidade na produção de bioetanol                               | 2020 |
| Fernandes et al.   | Produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos de algaroba ( <i>Prosopis Juliflora</i> ), oriundos da poda de árvore da cidade de Campina Grande-Paraíba                | 2024 |

Fonte: O autor, 2024.

A transformação de resíduos lignocelulósicos em etanol de segunda geração tem se mostrado uma alternativa promissora para a produção de biocombustíveis, com consideráveis benefícios ambientais e econômicos. O processo envolve a utilização de resíduos agrícolas, como bagaço de cana, palha de milho, e resíduos florestais, para a produção de etanol, com o objetivo de reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis. De acordo com De Almeida et al. (2022), a utilização desses resíduos para

a produção de biocombustíveis não só diminui o impacto ambiental, como também promove a sustentabilidade ao maximizar o uso de materiais que, de outra forma, seriam descartados.

O processo de conversão de resíduos lignocelulósicos em etanol envolve etapas complexas, incluindo pré-tratamento da biomassa, hidrólise enzimática e fermentação. O pré-tratamento visa quebrar a estrutura da biomassa, tornando a celulose mais acessível para as enzimas. De acordo com Guiducci et al. (2021), o uso de pré-tratamento físico-químico, como o vapor ou a hidrólise ácida, melhora significativamente a eficiência do processo, mas ainda apresenta desafios quanto à produção de subprodutos que podem inibir a fermentação. O estudo destaca que avanços nas técnicas de pré-tratamento são essenciais para a redução dos custos operacionais e a melhoria dos rendimentos.

A hidrólise enzimática é outra etapa crítica no processo de conversão. Segundo Vasconcelos et al. (2024), as enzimas celulasas desempenham um papel crucial ao quebrar a celulose em açúcares fermentáveis, como glicose. Embora as enzimas comerciais sejam eficazes, o custo elevado de sua produção ainda limita a viabilidade econômica dessa tecnologia. Entretanto, estudos recentes indicam que a engenharia de enzimas pode reduzir esses custos, tornando o processo mais acessível para aplicações em larga escala (Távora et al., 2023). O desenvolvimento de enzimas mais eficientes pode, portanto, representar um avanço significativo para a indústria de biocombustíveis.

A fermentação, por sua vez, é a etapa final do processo, na qual os açúcares provenientes da hidrólise enzimática são convertidos em etanol por microrganismos. De acordo com Perilli et al. (2023), o uso de leveduras geneticamente modificadas ou microrganismos mais robustos pode aumentar a eficiência da fermentação, especialmente em condições que envolvem subprodutos tóxicos. Além disso, a escolha da cepa de levedura é fundamental para garantir a máxima produção de etanol, já que diferentes cepas podem ter capacidades distintas de fermentar açúcares complexos presentes na biomassa.

Em relação ao impacto ambiental, a produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos lignocelulósicos oferece várias vantagens sobre os biocombustíveis de primeira geração. Como afirma Silva et al. (2024), o uso de resíduos não compete com a produção de alimentos e pode reduzir significativamente a pressão sobre os ecossistemas agrícolas. Além disso, a utilização de resíduos como matéria-prima pode contribuir para a diminuição da quantidade de resíduos sólidos, promovendo uma gestão mais eficiente de resíduos agrícolas e florestais. Essa característica é essencial para garantir a sustentabilidade do processo a longo prazo.

Do ponto de vista econômico, a viabilidade da produção de etanol de segunda geração depende de diversos fatores, incluindo os custos de matéria-prima, processamento e infraestrutura. De acordo com Massardi et al. (2020), os custos elevados associados ao pré-tratamento e à hidrólise enzimática representam os maiores desafios econômicos para a produção de etanol a partir de resíduos lignocelulósicos. No entanto, o estudo sugere que, com o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e a adoção de políticas públicas favoráveis, o etanol de segunda geração pode se tornar mais competitivo com os combustíveis fósseis, especialmente considerando a crescente demanda por soluções de energia renovável.

A competitividade do etanol de segunda geração com os combustíveis fósseis também está relacionada ao seu potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa. De acordo com a Agência Internacional de Energia Renovável (De Lima et al., 2022), o uso de biocombustíveis, como o etanol de segunda geração, pode reduzir em até 70% as emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com os combustíveis fósseis, dependendo das tecnologias adotadas. Isso torna o etanol uma alternativa atrativa para os países que buscam cumprir suas metas de redução de emissões no âmbito do Acordo de Paris.

Além disso, a produção de etanol a partir de resíduos lignocelulósicos pode promover o desenvolvimento econômico de regiões agrícolas, especialmente em países em desenvolvimento. Como apontado por Dos Santos et al. (2022), a implementação de tecnologias de biocombustíveis pode gerar novos empregos no setor agrícola e industrial, além de estimular a economia local. O cultivo de culturas destinadas à produção de resíduos lignocelulósicos, como milho e cana-de-açúcar, pode ser uma fonte adicional de renda para pequenos produtores, contribuindo para a inclusão social e o fortalecimento das economias rurais.

Em relação à implementação em larga escala, um dos principais desafios identificados nos estudos é a necessidade de investimentos em infraestrutura e pesquisa. De acordo com De Moura et al. (2020), a construção de plantas industriais capazes de processar grandes volumes de resíduos lignocelulósicos requer um alto capital inicial, o que pode dificultar a expansão da produção de etanol de segunda geração. No entanto, o estudo sugere que parcerias público-privadas e incentivos governamentais podem facilitar a adoção dessas tecnologias, tornando-as mais acessíveis e sustentáveis a longo prazo.

Por fim, os desafios relacionados à aceitação do etanol de segunda geração pela sociedade e pela indústria também não devem ser subestimados. De acordo com Fernandes et al. (2024), a transição para fontes de energia renovável requer um esforço conjunto entre governo, setor privado e consumidores, que devem estar cientes dos benefícios



ambientais e econômicos associados à adoção de biocombustíveis. A conscientização sobre a importância do etanol de segunda geração pode desempenhar um papel crucial na aceleração de sua implementação, garantindo que a produção de biocombustíveis contribua para um futuro mais sustentável.

## 4 CONCLUSÕES

A produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos lignocelulósicos se apresenta como uma alternativa promissora para a geração de energia renovável, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do impacto ambiental. O aproveitamento de materiais anteriormente descartados, como bagaço de cana, palha de milho e resíduos florestais, oferece uma solução sustentável para a geração de biocombustíveis, alinhando-se com os princípios da economia circular e promovendo o uso eficiente de recursos. Além disso, ao evitar a competição com alimentos, essa tecnologia tem o potencial de minimizar os impactos sociais e ambientais associados à produção de biocombustíveis de primeira geração.

Apesar dos avanços significativos nas tecnologias de conversão, como o pré-tratamento da biomassa, a hidrólise enzimática e a fermentação, ainda existem desafios a serem superados, especialmente no que diz respeito aos custos de produção e à viabilidade econômica em larga escala. A redução dos custos de processamento e a melhoria da eficiência das enzimas, por meio de inovações tecnológicas, são passos cruciais para tornar o etanol de segunda geração mais competitivo em relação aos combustíveis fósseis. Além disso, a adoção de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de infraestrutura e a pesquisa em biocombustíveis será fundamental para garantir a escalabilidade e a sustentabilidade desse modelo de produção.

Em resumo, a transformação de resíduos lignocelulósicos em etanol de segunda geração oferece uma oportunidade única para diversificar as fontes de energia renovável, ao mesmo tempo em que promove benefícios ambientais e econômicos. O sucesso dessa tecnologia dependerá não apenas de avanços científicos e tecnológicos, mas também de uma abordagem integrada que envolva colaboração entre setores público e privado, além da conscientização e adoção por parte da sociedade. Com o apoio adequado, o etanol de segunda geração tem o potencial de desempenhar um papel importante na matriz energética global, contribuindo para a transição rumo a um futuro mais sustentável.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a cada uma das pessoas que fazem deste trabalho possível, em especial a Elisabete Soares, por todo seu empenho e suporte durante as pesquisas.

---

## D-GENERATION ETHANOL AS A RENEWABLE ALTERNATIVE

**ABSTRACT:** Second-generation ethanol, produced from lignocellulosic waste such as sugarcane bagasse, corn stover, and forest residues, is a renewable and sustainable alternative for energy production. This biofuel offers significant environmental benefits by reducing environmental impact and promoting the circular economy, while avoiding competition with food production. To explore the potential of transforming lignocellulosic waste into second-generation ethanol, highlighting its viability as a sustainable alternative for energy production. The research aims to analyze technological advancements, environmental and economic advantages, and the challenges for the large-scale implementation of this technology. This study was conducted through a narrative literature review based on selected articles from 2020 to 2024 from the SciELO, PubMed, and Web of Science databases. Descriptors such as “Lignocellulosic Waste,” “Second-Generation Ethanol,” and “Sustainability” were used to identify technological advancements and economic and environmental barriers related to ethanol production from waste. The transformation of lignocellulosic waste into second-generation ethanol has proven to be a promising solution for the production of sustainable biofuels. The process involves complex steps such as biomass pretreatment, enzymatic hydrolysis, and fermentation, which, although efficient, still face technical and economic challenges. Advances in pretreatment technologies and more efficient enzymes can reduce costs and improve the competitiveness of ethanol compared to fossil fuels. Additionally, the use of agricultural waste does not compete with food production, promoting sustainability and generating economic benefits for agricultural regions. The production of second-generation ethanol from lignocellulosic waste is a viable and sustainable alternative for renewable energy generation. While there are economic and technical challenges to overcome, such as processing costs and infrastructure needs, the continued development of technologies and supportive public policies could make this technology competitive and scalable. With the proper support, second-generation ethanol can play an important role in the global energy matrix, contributing to a more sustainable future.

**Keywords:** Biofuels, Ethanol, Lignocellulosic Waste, Sustainability.

---

## REFERÊNCIAS

- Da Silva, A. B. L. & De Souza Queiroz, E. (2022). Impactos econômicos e ambientais da produção do etanol de segunda geração no Brasil. *Engineering Sciences*, 10(2), 31-38.
- De Almeida Levino, N., Dos Santos Araújo, A. H. & De Amorim, J. F. O. (2022). Evidências para um sistema nacional de (eco) inovação para o setor eólico. *Redes. Revista do Desenvolvimento Regional*, 27, 1-35.
- De Lima, R. G. et al. (2022). Cianeto de mandioca: viabilidade econômica do uso de manipueira para erradicação do mercúrio na mineração, e proposta para Bioeconomia Circular na Amazônia, Brasil. *Research, Society and Development*, 11(7), e43211729981-e43211729981.
- De Moura, I. A. A. et al. (2020). Biomassa proveniente da casca da banana *Musa sapientum*: pré-tratamento e hidrólise ácida para análise da viabilidade na produção de bioetanol. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 1975-1987.
- Dos Santos, S. M. et al. (2022). Uso de microalgas no setor agrícola e agroindustrial. *Ensaio e Ciência Biológicas Agrárias e da Saúde*, 26(2), 164-170.
- Fernandes, D. B. et al. (2024). Produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos de algaroba (*Prosopis Juliflora*), oriundos da poda de árvore da cidade de Campina Grande-Paraíba. *Sustentabilidade, meio ambiente e responsabilidade social*, 72.
- Guiducci, R. do C. N. et al. (2021). Avaliação de impacto ex ante da adoção do ativo tecnológico 'Cana Flex' para produção de etanol de segunda geração. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 38(3), 26882.
- Massardi, M. M., Massini, R. M. M. & De Jesus Silva, D. (2020). Caracterização química do bagaço de malte e avaliação do seu potencial para obtenção de produtos de valor agregado. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 6(1), 0083-0091.
- Nascimento, M. A. et al. (2023). Produção de etanol de segunda geração a partir da celulose contida no coco verde. *Revista Processando o Saber*, 15, 16-31.

Oliveira, R. M. M., Nunes, M. T. A. S.; De Sousa, R. M. S. (2020). Pré-tratamento químico e caracterização do bagaço da cana: uma perspectiva para produção de etanol a partir de resíduos agroindustriais. *Brazilian Journal of Development*, 6(11), 87865–87879.

Perilli, A. L. de O. et al. (2023). *ReActio-Soluções Enzimáticas*: produção de enzimas para catálise na indústria de biodiesel e etanol de segunda geração via fermentação submersa a partir de resíduos agroindustriais.

Távora, C. G. & Morgado, E. M. (2023). Etanol de Segunda Geração (E2G) em relação à sociedade e à mídia. *Peer Review*, 5(21), 427–454.

Silva, A. G. S. et al. (2024). Cianobactérias de interesse ambiental como relevante bioindicador da qualidade da água em regiões com histórico de seca. *Novas tecnologias no tratamento de águas contaminadas e resíduos sólidos*, 53.

Vasconcelos, K. R. M. & Dos Santos, C. C. L. (2024). Aproveitamento da biomassa dos aguapés (*Eichhornia crassipes*) para produção de etanol de segunda geração e briquetes. *Química Industrial em ação*, 40.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# CAROTENOIDES NA FORMULAÇÃO DE PROTETORES SOLARES SUSTENTÁVEIS E BIODEGRADÁVEIS

*José Adeilson da Silva<sup>1\*</sup>, Elisabete Soares de Santana<sup>2</sup>, Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro Rodrigues<sup>3</sup>, Yhasminie Karine da Silva Xavier<sup>3</sup>, Tayane de Cassia Dias Mendes Silva<sup>3</sup>, Juliana Alves da Silva<sup>1</sup>, Edilayne Eduarda Ferreira Maciel<sup>1</sup>, Fábio Nildo dos Santos<sup>4</sup>, Wesllen David Silva Vila<sup>3</sup>*

---

1 Centro Universitário do Recife, 50070-070, Recife, Brasil.

2 Faculdade Santíssima Trindade, 55800-000, Nazaré Da Mata, Brasil.

3 Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901, Recife, Brasil.

4 Centro Universitário da Vitória de Santo Antão, 55602-000, Recife, Brasil.

\*E-mail: adeilson.silva2@ufpe.br

# RESUMO

A exposição da pele aos raios ultravioleta (UV) não só causa desconfortos desagradáveis, vermelhidão, rugas, pele áspera e pigmentação, mas também é responsável pelo aumento da incidência de câncer de pele. A exposição à luz UV aumenta o índice de produção de radicais livres, resultando em estresse oxidativo, os quais são responsáveis por danos causados ao DNA. O objetivo deste trabalho é investigar o uso de carotenoides em formulações cosméticas, identificando seu uso como fator de proteção solar, impactos e estratégias de mitigação ambiental. O estudo trata-se de uma revisão narrativa de literatura. Foram selecionados artigos publicados entre 2020 e 2024, nas bases de dados da Biblioteca Virtual de Saúde (BVS), Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS), *Medical Literature Analysis and Retrieval System Online* (MEDLINE) e *Scientific Electronic Library Online* (SCIELO). Protetores solares sintéticos possuem diversas substâncias tóxicas devido ao aumento do seu uso pela promoção da saúde e prevenção do câncer. Assim, os ambientes marinhos estão sofrendo um colapso graças a substâncias tóxicas que estão presentes nessas formulações. Com isso, a necessidade de se utilizar substâncias naturais se torna cada vez mais presente. A utilização de substâncias naturais na formulação de produtos cosméticos vem crescendo a cada dia e os carotenoides se demonstram como uma alternativa ambientalmente e ecologicamente atrativa, pois oferecem um elevado nível de proteção solar, bem como atividades antimicrobiana e antioxidantes. Os carotenoides, como  $\beta$ -caroteno, luteína e licopeno, demonstram eficácia na proteção da pele contra os danos causados pela radiação UV, graças às suas propriedades antioxidantes que ajudam a neutralizar os radicais livres. Além disso, a inclusão desses compostos naturais em protetores solares pode proporcionar uma proteção adicional contra queimaduras solares e o envelhecimento precoce da pele.

**Palavras-chave:** Carotenoides. Proteção Solar. Envelhecimento. Sustentabilidade.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A exposição da pele aos Raios Ultravioleta (UV) não só causa desconfortos desagradáveis, vermelhidão, rugas, pele áspera e pigmentação, mas também é responsável pelo aumento da incidência de câncer de pele (Anbualakan et al., 2022). A exposição à luz UV aumenta o índice de produção de radicais livres, resultando em

estresse oxidativo, os quais são responsáveis por danos causados ao DNA. Atualmente, há um aumento de pesquisas relacionadas a produtos de origem natural, dentre os quais os carotenoides se destacam como um fotobioprotetor natural (Flieger et al., 2024).

Os carotenoides são pigmentos naturais responsáveis pelas cores amarelo, vermelho e laranja, obtidos de origem vegetal e microrganismos (Mendes-Silva et al., 2020; Narita et al., 2022). São utilizados como corantes no enriquecimento de alimentos, atuam como percussores da vitamina A, possuem atividades antimicrobiana e antioxidante (Flieger et al., 2024; Mendes-Silva et al., 2020). Pesquisas atuais têm demonstrado sua atividade em fotoproteção solar (Kusmita et al., 2023a).

Produtos de origem sintética possuem diversos desafios devido ao grande número de compostos artificiais, o que a longo prazo pode causar alergias e dermatites alérgicas de contato (Ramos et al., 2022). Além disso, são relatados efeitos adversos como poluição nos corais devido a substâncias tóxicas que são utilizadas na fabricação desses produtos estéticos sintéticos, como oxibenzona e octinoxato, produtos que são amplamente utilizados em protetores solares (Miller et al., 2021).

Com isso, a utilização de produtos de origem natural vem despontando como uma alternativa a estes produtos sintéticos, pois oferecem um menor risco de alergias, como também menor dano ao ambiente marinho. Com isso, o objetivo desse estudo consiste em explorar a utilização de carotenoides na formulação de protetores solares sustentáveis e biodegradáveis, analisando sua eficácia e benefícios ambientais.

## 2 METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma revisão narrativa de literatura. Foram selecionados artigos publicados entre 2011 e 2024, nas bases de dados da Biblioteca Virtual de Saúde (BVS), Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS), *Medical Literature Analysis and Retrieval System Online* (MEDLINE) e *Scientific Electronic Library Online* (SCIELO).

Para a pesquisa, foram utilizados os descritores em saúde (DeCS): carotenoides, proteção solar, envelhecimento e sustentabilidade. A estratégia de busca foi estruturada utilizando os operadores booleanos “AND” e “OR”, permitindo uma abordagem ampla e abrangente. A pesquisa teve como objetivo identificar estudos relevantes que abordassem o uso de carotenoides em formulações cosméticas, investigando seu uso como fator de proteção solar, impactos e estratégias de mitigação ambiental. Os critérios de inclusão adotados foram: artigos completos, disponíveis gratuitamente nas bases de dados,

listados acima, que abordassem a temática principal do estudo, publicados entre 2011 e 2024, nos idiomas português, inglês e espanhol. Foram excluídos artigos incompletos, de acesso fechado, publicados em idiomas diferentes dos selecionados e aqueles que não se encaixavam no tema proposto.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quadro 1. Estudos utilizados nos resultados e discussão

| Autor               | Título do estudo   | Ano  |
|---------------------|--|------|
| Silva & Souza Filho | Sensibilidade ambiental das praias: um exemplo de análise para a península de Marau, sul do estado da Bahia, Brasil  | 2011 |
| Miller et al        | Toxic effects of UV filters from sunscreens on coral reefs revisited: regulatory aspects for “reef safe” products  | 2021 |
| Kusmita et al.      | Sun protection and antibacterial activities of carotenoids from the soft coral <i>Sizadaria</i> sp symbiotic bacterium from Panjang Island, North Java Sea | 2023 |
| Da Costa et al.     | The importance of photoprotectors in minimizing skin damage caused by solar radiation  | 2021 |
| Mendes-Silva et al. | Biotechnological potential of carotenoids produced by extremophilic microorganisms and application prospects for the cosmetics industry                    | 2021 |
| Patki et al         | Analysis of the applicative potential of pigments extracted from bacterial isolates of mangrove soil as topical UV protectants                             | 2021 |
| Bergman et al.      | Chitosan produced from Mucorales fungi using agroindustrial by products and its efficacy to inhibit <i>Colletotrichum</i> species                          | 2021 |
| Viana et al.        | Productive and market analysis of beta-carotene obtained from the microalga <i>Dunaliella</i> sp.: current scenarios and future perspectives               | 2024 |

Fonte: O autor, 2024.

### 3.1 POLUIÇÃO NOS AMBIENTES MARINHOS

Os recifes de coral tropical são alguns dos ecossistemas mais produtivos e biodiversos do planeta, oferecendo serviços ecossistêmicos essenciais que sustentam a vida de milhões de pessoas globalmente (Silva & De Souza Filho, 2011). A saúde desses ecossistemas está profundamente conectada à saúde dos corais construtores de recifes, que são as espécies-chave nesses ambientes. Preservar a saúde desses corais e proteger a simbiose entre coral e alga é crucial para a conservação dos recifes de coral (Miller et



al., 2021). Embora tenham persistido por milhões de anos, estudos recentes indicam que os recifes de coral estão entre os primeiros e mais impactados ecossistemas devido aos múltiplos estressores, como a poluição aquática, o que pode levar ao colapso desses ecossistemas (Kusmita et al., 2023a).

Protetores solares sintéticos possuem diversas substâncias tóxicas devido ao aumento do seu uso pela promoção da saúde e prevenção do câncer; os ambientes marinhos estão sofrendo um colapso graças a substâncias tóxicas que estão presentes nessas formulações (Da Costa et al., 2021; Miller et al., 2021). Com isso, a necessidade de se utilizar substâncias naturais se torna cada vez mais presente.

A utilização de substâncias naturais na formulação de produtos cosméticos vem crescendo a cada dia, e os carotenoides se demonstram como uma alternativa ambiental e ecologicamente atrativa, pois oferecem um elevado nível de proteção solar, bem como atividades antimicrobiana e antioxidantes (Mendes-Silva et al., 2020). Os carotenoides estão entre os compostos mais estudados dadas suas atividades biológicas e sua utilização em formulações cosméticas, como protetores solares (Patki et al., 2021a).

## 3.2 PRODUÇÃO DE CAROTENOIDES BACTERIANOS

A produção de carotenoides ganha destaque quando utilizadas bactérias na sua produção, uma vez que apresenta rápida produção, baixos ou até mesmo nenhum efeito adverso que cause poluição no meio ambiente (Mendes-Silva et al., 2020; Patki et al., 2021a). Além disso, é possível utilizar matérias que seriam descartados para produção de carotenoides, como cascas de frutas, e isso promove a economia circular desses substratos, que seriam descartados no ambiente (Bergman et al., 2021). Dessa forma, a economia circular gera lucros sobre substratos que seriam descartados e além disso promove a utilização desses substratos.

Outra alternativa de produção de carotenoides é através da produção de microalgas, pois apresentam diversas vantagens como baixo custo de produção, utilização de recursos mínimos, como água e terra, possuem uma rápida taxa de crescimento, e podem ser cultivadas em ambientes controlados, o que permite uma produção consistente e escalável (Viana et al., 2024). Além de produzirem carotenoides como  $\beta$ -caroteno e astaxantina que são potentes antioxidantes naturais (Mendes-Silva et al., 2020).

### 3.3 EFICIÊNCIA DOS CAROTENOIDES NA PROTEÇÃO SOLAR

Diversos estudos têm avaliado a eficácia dos carotenoides como fatores de proteção solar. Essas pesquisas investigam como esses pigmentos naturais podem contribuir para a defesa da pele contra os danos causados pela radiação UV. Como exemplo podemos citar o estudo realizado por Kusmita et al. (2023b), que avaliou a proteção solar do carotenoide obtido da bactéria *Sinularia* sp, resultando em uma proteção equivalente à categoria Fator de Proteção Solar (FPS) com proteção extra, indicando um protetor solar de categoria Ultravioleta A (UVA).

Outros estudos relatam as vantagens da utilização de carotenoides em cosméticos (Patki et al., 2021b), avaliaram o FPS de duas cepas encontradas no solo de manguezal, identificadas como *Flavobacterium* sp. e *Brevibacterium* sp. Os pesquisadores observaram que ambas as cepas produziam carotenoides com atividade FPS. Além disso, também avaliaram a estabilidade dos carotenoides por um longo período de tempo e observaram que, mesmo após uma hora de exposição, os pigmentos continuavam atuando, demonstrando com isso sua viabilidade para formulações contra raios UV.

## 4 CONCLUSÕES

O presente estudo sobre a incorporação de carotenoides na formulação de protetores solares sustentáveis e biodegradáveis revelou resultados promissores. Os carotenoides, como  $\beta$ -caroteno, luteína e licopeno, demonstram eficácia na proteção da pele contra os danos causados pela radiação UV, graças às suas propriedades antioxidantes que ajudam a neutralizar os radicais livres. Além disso, a inclusão desses compostos naturais em protetores solares pode proporcionar uma proteção adicional contra queimaduras solares e o envelhecimento precoce da pele.

A utilização de carotenoides em formulações de protetores solares não só melhora a eficácia do produto, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental. Ao substituir ingredientes sintéticos por alternativas naturais e biodegradáveis, se reduz o impacto ambiental associado ao uso de produtos convencionais. Este é um passo significativo para a indústria cosmética que busca se alinhar com práticas mais ecológicas e responsáveis.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro, por todo seu empenho em auxiliar tornando este trabalho possível.

---

## CAROTENOIDS IN THE FORMULATION OF SUSTAINABLE AND BIODEGRADABLE SUNSCREENS

**ABSTRACT:** Skin exposure to Ultraviolet (UV) rays not only causes unpleasant discomforts such as redness, wrinkles, rough skin, and pigmentation but is also responsible for the increased incidence of skin cancer. Exposure to UV light increases the rate of free radical production, resulting in oxidative stress, which is responsible for DNA damage. To investigate the use of carotenoids in cosmetic formulations, examining their use as a sun protection factor, impacts, and environmental mitigation strategies. This study is a narrative literature review. Articles published between 2020 and 2024 were selected from the Virtual Health Library (BVS), Latin American and Caribbean Health Sciences Literature (LILACS), Medical Literature Analysis and Retrieval System Online (MEDLINE), and Scientific Electronic Library Online (SCIELO) databases. Synthetic sunscreens contain various toxic substances due to their increased use for health promotion and cancer prevention. Marine environments are collapsing due to toxic substances present in these formulations. Hence, the need to use natural substances becomes increasingly necessary. The use of natural substances in cosmetic product formulations is growing daily, and carotenoids are proving to be an environmentally and ecologically attractive alternative as they offer a high level of sun protection, as well as antimicrobial and antioxidant activities. Carotenoids, such as  $\beta$ -carotene, lutein, and lycopene, demonstrate efficacy in protecting the skin against damage caused by UV radiation, thanks to their antioxidant properties that help neutralize free radicals. Additionally, the inclusion of these natural compounds in sunscreens can provide additional protection against sunburn and premature skin aging.

**Keywords:** Carotenoids. Sun Protection. Aging. Sustainability.

---

# REFERÊNCIAS

- Anbualakan, K., Tajul Urus, N. Q., Makpol, S., Jamil, A., Mohd Ramli, E. S., Md Pauzi, S. H. & Muhammad, N. (2022). A Scoping Review on the Effects of Carotenoids and Flavonoids on Skin Damage Due to Ultraviolet Radiation. *Nutrients*, 15(1), 92. <https://doi.org/10.3390/nu15010092>
- Da Costa, M. M., Farias, A. P. A. & De Oliveira, C. A. B. (2021). A importância dos fotoprotetores na minimização de danos a pele causados pela radiação solar / The importance of photoprotectors in minimizing skin damage caused by solar radiation. *Brazilian Journal of Development*, 7(11), 101855–101867. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-011>
- Flieger, J., Raszewska-Famielec, M., Radzikowska-Büchner, E. & Flieger, W. (2024). Skin Protection by Carotenoid Pigments. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(3), 1431. <https://doi.org/10.3390/ijms25031431>
- Kusmita, L., Nur Prasetyo Edi, A., Dwi Franyoto, Y., Mutmainah, Haryanti, S. & Dwi Retno Nurcahyanti, A. (2023a). Sun protection and antibacterial activities of carotenoids from the soft coral *Sinularia* sp. symbiotic bacteria from Panjang Island, North Java Sea. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 31(8), 101680. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2023.06.013>
- Kusmita, L., Nur Prasetyo Edi, A., Dwi Franyoto, Y., Mutmainah, Haryanti, S. & Dwi Retno Nurcahyanti, A. (2023b). Sun protection and antibacterial activities of carotenoids from the soft coral *Sinularia* sp. symbiotic bacteria from Panjang Island, North Java Sea. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 31(8), 101680. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2023.06.013>
- Mendes-Silva, T. de C. D., Andrade, R. F. da S., Ootani, M. A., Mendes, P. V. D., Sá, R. A. de Q. C. de, Silva, M. R. F. da, Souza, K. S., Correia, M. T. dos S., Silva, M. V. da & Oliveira, M. B. M. de. (2020). Biotechnological Potential of Carotenoids Produced by Extremophilic Microorganisms and Application Prospects for the Cosmetics Industry. *Advances in Microbiology*, 10(08), 397–410. <https://doi.org/10.4236/aim.2020.108029>
- Miller, I. B., Pawlowski, S., Kellermann, M. Y., Petersen-Thiery, M., Moeller, M., Nietzer, S. & Schupp, P. J. (2021). Toxic effects of UV filters from sunscreens on coral reefs revisited: regulatory aspects for “reef safe” products. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 74. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00515-w>

Narita, I. M. P., Filbido, G. S., Ferreira, B. A., Pinheiro, A. P. de O., Silva, D. da C. e, Nascimento, E., Villa, R. D. & Oliveira, A. P. de. (2022). Bioacessibilidade *in vitro* de carotenoides e compostos fenólicos e capacidade antioxidante de farinhas do fruto pequi (*Caryocar brasiliense Camb.*). *Brazilian Journal of Food Technology*, 25. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.06821>

Patki, J. M., Singh, S., Singh, S., Padmadas, N. & Dasgupta, D. (2021a). Analysis of the applicative potential of pigments extracted from bacterial isolates of mangrove soil as topical UV protectants. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 57. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902020000419127>

Patki, J. M., Singh, S., Singh, S., Padmadas, N. & Dasgupta, D. (2021b). Analysis of the applicative potential of pigments extracted from bacterial isolates of mangrove soil as topical UV protectants. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 57. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902020000419127>

Ramos, P. da S., Góis, G. V. de A., Cavalcanti, É. B. V. S., Beltrão, D. M., Pires, E. A. de M. & Reis, M. Y. de F. A. (2022). Compostos fitoquímicos com atividade fotoprotetora: uma revisão integrativa. *Research, Society and Development*, 11(14), e567111436286. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36286>

Silva, I. R. & De Souza Filho, J. R. (2011). Sensibilidade ambiental de praias: um exemplo de análise para a península de Maraú, sul do estado da Bahia, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 38(2), 147. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.26380>

Viana, N. M., Da Silva Júnior, J. J., Bueno, G. W., Machado, L. P., Ferreira, M. F. N. & Trombeta, T. D. (2024). Análise produtiva e mercadológica de betacaroteno obtido da microalga *Dunaliella* sp.: cenários atuais e perspectivas futuras. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(2), e04891. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-065>



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# TECNOLOGIAS GEOESPACIAIS NO MONITORAMENTO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM LUANDA: DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

*Albano Dias Malundo*

---

Unespar Câmpus de Campo Mourão, 87303-100, Campo Mourão, Paraná.  
\*E-mail: malundodias@gmail.com

# RESUMO

A região de Luanda há muito vem sofrendo um crescimento populacional sem precedente, causando expansão desordenada e perda de espaços verdes com o surgimento de novos territórios autoproduzidos, impactando o meio ambiente e a qualidade de vida das populações. Dados de 2017 indicam que a mancha urbana de Luanda cresceu 57.867,96 hectares, que, em 6 anos, expandiu-se para 87.604,99 hectares, em 2023, refletindo aumento significativo das áreas construídas e redução do solo exposto. Ao longo do texto, observa-se a intensa urbanização oferecida em imagens de satélite multitemporais, que evidenciam também um nível crescente dessa cobertura do solo pelo parque habitacional. A pesquisa pretende analisar como as tecnologias geoespaciais auxiliam no monitoramento do uso e ocupação do solo em Luanda. Do ponto de vista metodológico, utilizou-se uma abordagem de natureza mista (quanti-qualitativa), para analisar os impactos do uso e ocupação do solo, entre 2017 e 2023, com recursos das técnicas geoespaciais como imagens de satélite e sistemas de informação geográfica (SIG).

**Palavras-chave:** SIG. Uso e ocupação do solo. Habitação. Luanda.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O modelo de desenvolvimento urbano adotado em muitos países africanos, em particular Angola, onde Luanda se destaca pelo seu rápido crescimento e expansão urbana, caracteriza-se por uma lógica de produção do espaço sustentado por uma matriz capitalista que segrega cada vez mais às populações, sobretudo de baixa renda, em espaços sem condições de infraestruturas, sociais e ambientais. Diante desse cenário, verifica-se um déficit habitacional e as políticas públicas sociais, muitas vezes, falham em atender à demanda crescente por moradia. Como resposta, essas populações produzem seus próprios territórios em zonas sem condições para habitabilidade. Considerando as duas Agendas Mundiais (Agenda 2030 e a Nova Agenda Urbana), que apresentam diretrizes para um desenvolvimento urbano, social e ambiental sustentável, parece utópico para o caso de Angola, em especial a cidade de Luanda, a implementação delas, num contexto em que se assiste a um crescimento urbano acelerado, acompanhado da expansão da mancha urbana.

Em termos demográficos, a cidade de Luanda representa 31% do total da população do país e, com base nas projeções das Nações Unidas, até 2030, Luanda fará parte das 40 megacidades com mais de 10 milhões de habitantes. Como considera CREA (2002), o rápido crescimento demográfico nos centros urbanos, acompanhado da ausência de planejamento e de instrumento de gestão urbana, tem provocado consequências desastrosas para o meio ambiente. Ordenar o espaço, diante dessa realidade, implica adotar práticas de planejamento e gestão que considerem as complexidades e os desafios que decorrem dos diferentes processos de produção do espaço, que não preservam os recursos naturais. Por isso, em cidades como o nosso caso de análise, planejar sem os modos de uso e ocupação do solo sem comprometer o meio ambiente é uma tarefa bastante complexa, mas fundamental para adequar as nossas políticas locais de sustentabilidade aos marcos internacionais, permitindo uma urbanização mais equilibrada, na qual o crescimento demográfico não proporcione implicações negativas sobre o meio ambiente.

Diante disto, o uso das tecnologias geoespaciais permitirá a detenção de mudanças ocorridas através do tempo sobre a superfície terrestre (Medeiros, 1986). A detenção dessas mudanças por interpretação de fotografias aéreas, apesar de ser uma técnica válida, apresenta limitações significativas como: erros de omissão, alguns elementos podem passar despercebidos devido à fadiga visual ou interpretação subjetivas; escalas, fotografias de grandes escalas, geralmente, detalham áreas pequenas, exigindo um trabalho exaustivo para cobrir grandes regiões. Com isso, “sabe-se que o modelo de desenvolvimento ambiental, que vem ocorrendo nas cidades, é caracterizado pela degradação ambiental. Esta degradação é o reflexo dos impactos decorrentes da urbanização predatória sobre o ecossistema” (Bueno, 2020, p. 37).

Para isso, faz-se necessário recorrer às tecnologias geoespaciais para garantir o mapeamento e monitoramento das áreas onde a vegetação está sendo substituída pela construção de novas residências. Por meio do uso de imagens de satélites, sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), juntamente com *drones*, permite-se identificar com maior precisão as áreas afetadas pela ação humana. Por isso, podemos dizer que essas ferramentas surgem num contexto de inovação e permitem um acompanhamento real das mudanças na cobertura vegetal do solo, permitindo que agentes de planejamento e gestão das cidades atuem de maneira mais ativa e coordenada para mitigar os impactos causados pela ocupação irregular de terra e garantir a proteção do ecossistema. Esta pesquisa pretende analisar como as tecnologias geoespaciais auxiliam no monitoramento do uso e na ocupação do solo em Luanda.



Diante de um crescimento descoordenado da população e da mancha urbana, com destaque para as zonas consideradas ambientalmente sensíveis, o uso de tecnologias, como as já mencionadas, torna-se essencial para garantir um planejamento e gestão territorial mais eficiente e sustentável.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL OU METODOLOGIA

Para o quadro metodológico, a área de estudo localiza-se entre os paralelos 8° 50' 00" latitude Sul e 13° 14' 00" longitude Leste. Tem uma extensão territorial de aproximadamente 18.826 km<sup>2</sup> e se limita a norte pela província do Bengo, a sul pela província do Kwanza Sul, a leste pelas províncias do Bengo e Kwanza Norte e a oeste pelo Oceano Atlântico (Figura 1).

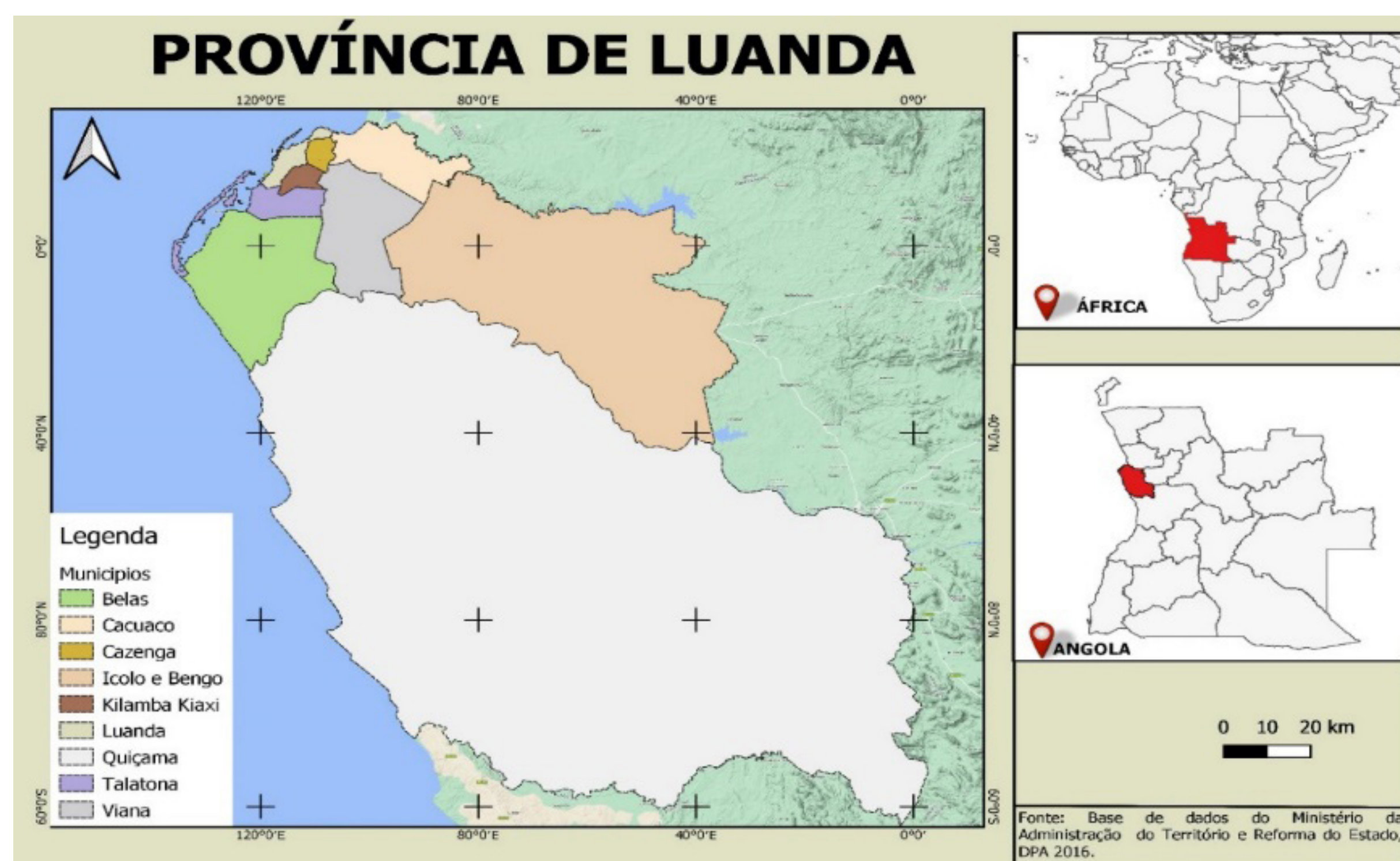


Figura 1. Localização da província de Luanda

Para esta pesquisa, utilizou-se a abordagem mista (quantitativa e qualitativa), do tipo experimental e descritivo. Para determinar o impacto de uso e ocupação do solo, recorreu-se a uma análise transversal, tendo como período base 2017 até 2023. A escolha da abordagem mista justifica-se pela necessidade de analisar os dados quantitativos e qualitativos que determinam o uso e a ocupação do solo em Luanda. A parte qualitativa desta pesquisa foi sustentada pela pesquisa bibliográfica. Segundo Lakatos e Marconi (2001, p. 183),

[...] a pesquisa bibliográfica, ou fontes secundárias, abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicações avulsas,

[...] livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico, etc., [...] sua finalidade é colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências seguidas de debates que tenham sido transcritas por algumas formas, quer publicadas, quer gravadas.

Para realização da busca de literatura, foram definidas “uso e ocupação do solo”, “tecnologias geoespaciais”, como termos chaves, e LUANDA que facilitaram na busca, e, com destaque para o portal periódico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), SciELO e Google Acadêmico. Após a busca dessa bibliografia, fez-se o fichamento de alguns conceitos que se julgam importantes para embasar o aporte teórico deste artigo.

A classificação de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir da utilização dos recursos de análise geoespacial, como imagens de satélite e sistemas de informação geográfica.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado das pesquisas no Google Acadêmico e outros portais, foram encontrados cerca de mil textos, entre dissertações, monografias, livros eletrônicos, artigos, resumos expandidos e resenhas críticas. Considerando a quantidade, foram escolhidos textos que dão ênfase na avaliação/monitoramento do uso e ocupação do solo com recurso às tecnologias geoespaciais, pressão demográfica sobre o meio ambiente, expansão urbana e suas implicações ambientais, relatórios ambientais, entre outros.

O crescimento urbano de Luanda, impulsionado pelo rápido crescimento populacional, tem gerado influência significativa sobre os recursos naturais e o meio ambiente (Maiala, 2022). A cidade aprecia uma ocupação desordenada do solo e uma expansão acelerada da mancha urbana, que, em consequência, resulta em uma pressão crescente sobre o meio ambiente, causando, entre os problemas, a redução dos espaços verdes e a alteração do ecossistema local, impactando na qualidade de vida das populações.

Diante desse problema, a utilização de uma abordagem integrada que envolve o uso de *softwares* de análise geoespacial pode ser de extrema importância para o monitoramento do uso e ocupação do espaço, de modo a contribuir para uma melhor preservação dos espaços verdes para mitigar os impactos negativos da expansão urbana de Luanda.

Por esta razão, o uso de tecnologias geoespaciais, como imagens de satélite, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensoriamento remoto surgem como ferramentas estratégicas para monitorar e gerenciar o uso e a ocupação do solo de forma sustentável, contribuindo para um planejamento urbano mais eficiente.

De acordo com Trevisan et al. (2018, p. 2216), a compreensão integrada dos fatores biofísicos e sociodemográficos no processo de uso e cobertura do solo é necessária para compreender as transformações do ambiente, uma vez que podem interagir e operar sob uma escala de tempo e espaço, o que pode cominar significativamente o meio ambiente.

Para Pessi et al. (2021), a vegetação é uma parte essencial em todo o ambiente geofísico, sendo responsável pela importante tarefa de intercâmbio biogeoquímico e energético entre solo, atmosfera e água, e desempenha um papel de coordenação no equilíbrio do ecossistema terrestre, das alterações climáticas e do ciclo da água.

O cenário demográfico em Luanda, desde os tempos coloniais, vem mostrando uma certa influência dentro do quadro quantitativo do país. As primeiras tendências de crescimento dessa população surgiram num contexto de grandes pressões sociais, políticas e econômicas. Com o eclodir dos conflitos armados, verificou-se uma forte tendência nas dinâmicas populacionais em direção à cidade capital em busca de segurança. Esta forte dinâmica do crescimento populacional traduziu-se em um fenômeno de ocupação desordenada das áreas urbanas e periféricas da cidade (Secuma, 2012).

Segundo Maia (2022), as zonas urbanas de Luanda sofreram um declínio na sua capacidade produtiva do solo, com a perda de mais de 245,5 km<sup>2</sup> de cobertura vegetativa. Esse processo, que pode ser lido como desflorestação, resulta da pressão demográfica que tem impulsionado a expansão do parque habitacional que transformou a paisagem de cidade (Figura 2).

Estas ocupações desordenadas resultam numa transformação do espaço natural. Os resultados destas modificações podem levar a consequências socioambientais negativas, que se traduzem quando a normalidade do meio é afetada pelas consequências de suas escolhas. Em relação às áreas construídas, notadamente, essas situam-se no contexto do espaço urbano da província de Luanda. No ano de 2017, totaliza-se um crescimento da mancha urbana de 57.867,96 hectares, permeadas por espaços de terra nua (solo exposto), que somava áreas com proporções semelhantes.

Nas figuras 2 e 3, é possível observar que, em 2023, observa-se que as áreas construídas assumiram espaços de maior destaque e se desenvolveram em detrimento da terra nua

que se tornou inexpressiva neste ano e a mancha urbana aumentou para 87.604,99 hectares (Figura 3 e 4).

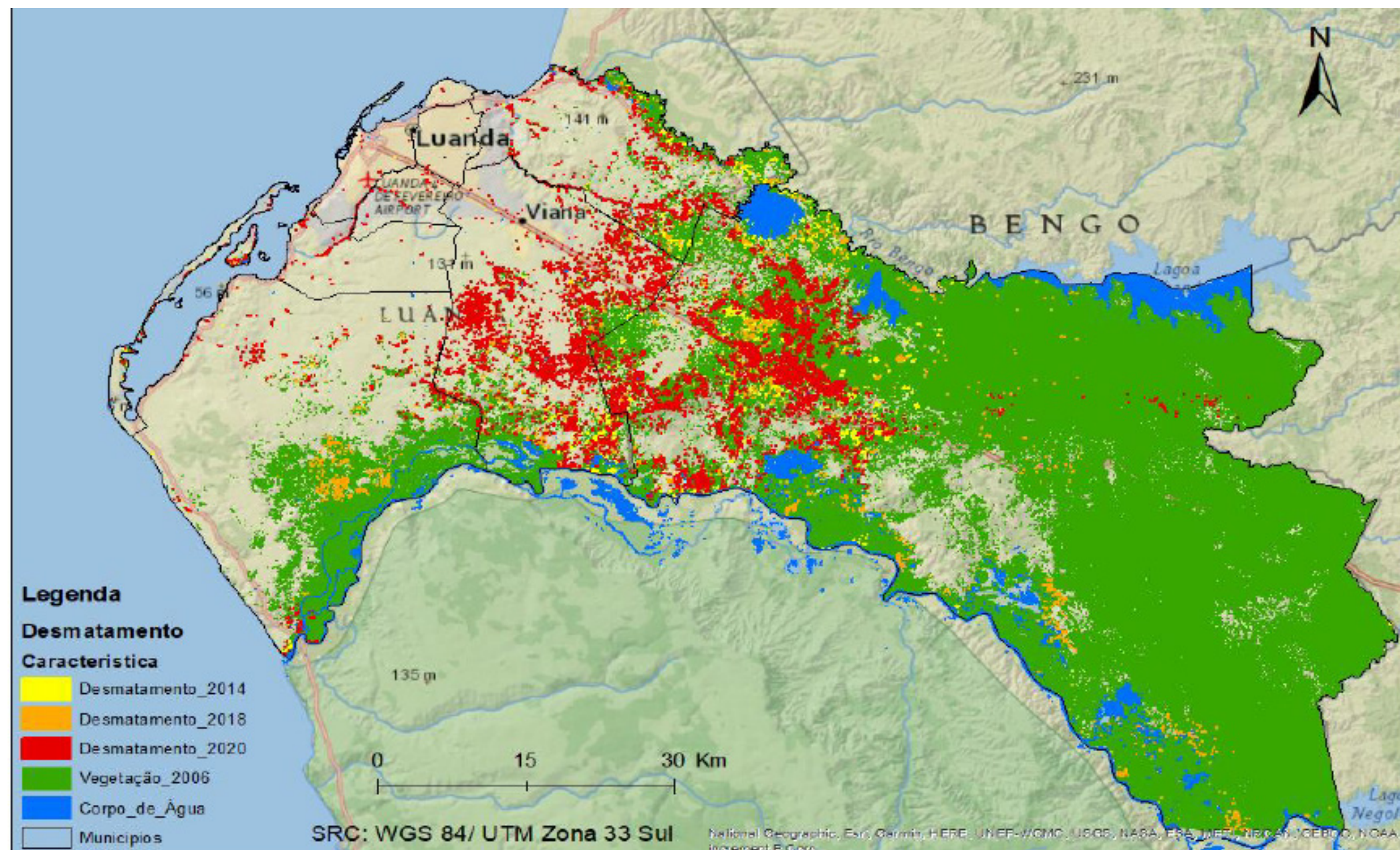


Figura 2. Cartograma sobre a perda da cobertura vegetal em Luanda entre 2014 e 2020. Fonte: Maiala

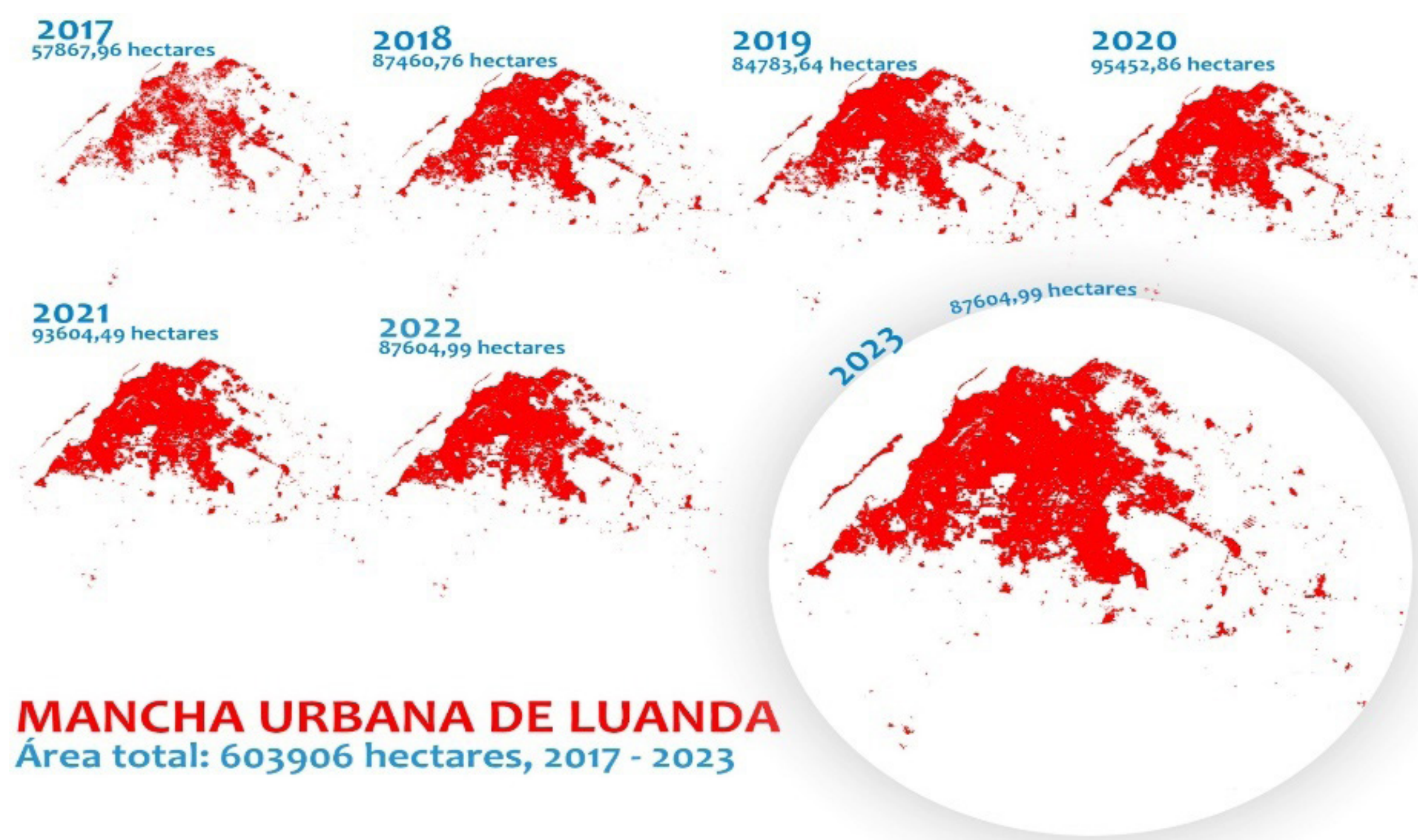


Figura 3. Expansão da mancha urbana da província de Luanda

Na análise das dinâmicas populacionais em Luanda durante o período em análise, como se pode verificar na figura anterior, a expansão urbana revela uma intensa pressão populacional sobre o território. Dessa combinação, entre o crescimento populacional e as transformações espaciais que dela resultam, apresenta-se, com evidências, esta realidade. Nas figuras, é possível verificar a representação espacial de como o crescimento populacional impacta na organização e gestão do território.

Na figura 4, é possível visualizar que pouco a pouco a malha urbana se densificou, com a criação de novas vias, no geral, essas se tornaram mais proeminentes na paisagem e também o número de construções foi ampliado. Houve, nesses 7 anos de representação nas imagens, a densificação das áreas construídas, bem como a demarcação mais expressiva do desenho urbano.

No quadro de imagens (figura 3) de satélites multitemporais (elaborado a partir da seleção de uma área ilustrativa de como procedeu à evolução do espaço urbano de Luanda), é possível observar que, em 2017, nesta área já havia um início de ocupação e organização infraestrutural urbana, mas que ainda dividia espaço com a categoria de terra nua, sendo que esta predominava. Ainda sobre 2017, as construções eram esparsas e distribuía-se nas proximidades das vias. Sobre as áreas de vegetação, definidas no mapa como a categoria árvores, no contexto geral houve ampliação de 2017 para 2023 em relação a este tipo de cobertura do solo. Observam-se três áreas/regiões nas quais as alterações foram mais significativas. A área com maior expressão situa-se na porção centro - noroeste do município de Luanda, onde é perceptível a ampliação de áreas vegetadas e também sua densificação. Pequena ampliação e densificação também podem ser observadas na porção centro-sul e nordeste do município.

O modo de uso e ocupação do solo em Luanda tem causado mudanças de forma brusca no ecossistema natural da cidade e a ausência de estratégias para mitigar os efeitos negativos possibilita que a cidade enfrente diversas consequências das alterações climáticas como: ilhas de calor, chuvas intensas, poluição do ar, dispersão de gases tóxicos, como amônia, que afetam diretamente a qualidade de vida dos moradores.

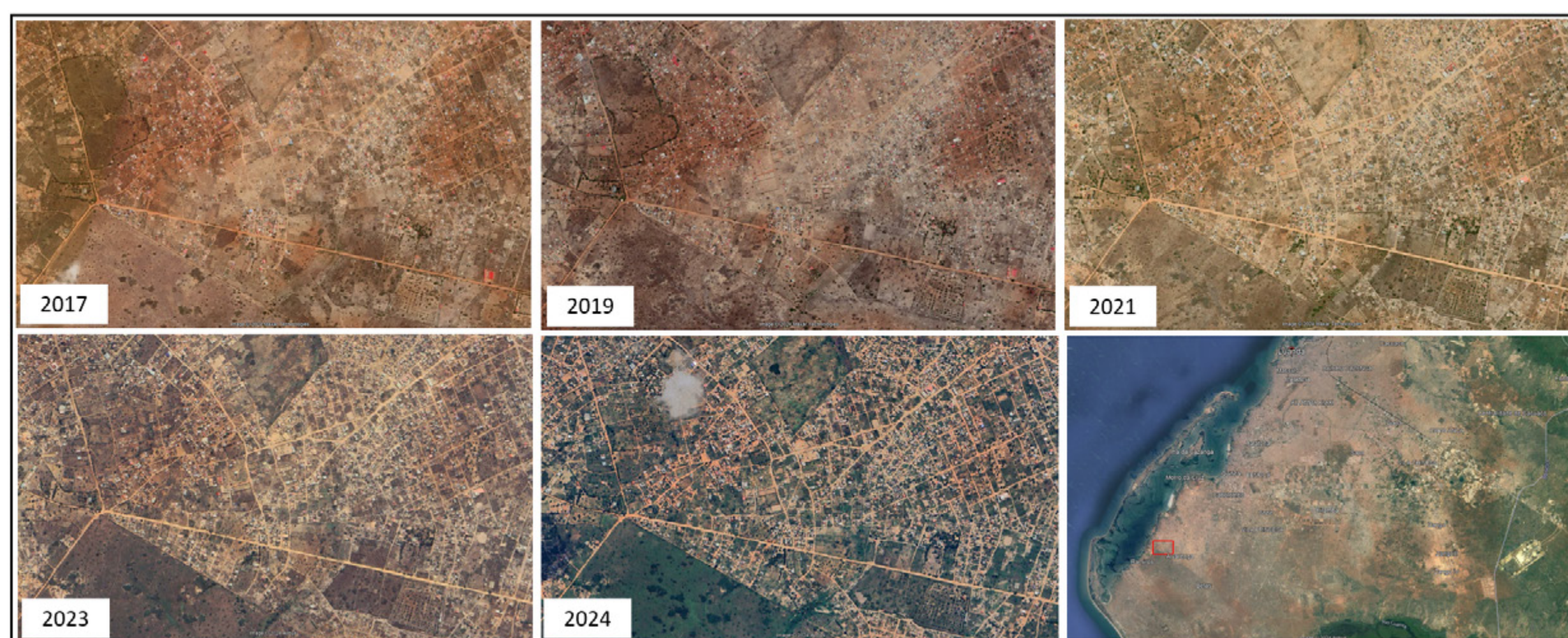


Figura 4. Expansão da mancha urbana da província de Luanda

Neste contexto, a fisionomia ambiental de Luanda mudou significativamente nos últimos anos. As vastas áreas de domínio natural diminuíram consideravelmente. A forma de urbanização de Luanda, que resulta, conseqüentemente, da pressão demográfica, tem influenciado na aceleração da degradação ambiental (Minua, 2006).

As tecnologias geoespaciais são fundamentais para o mapeamento e monitoramento em tempo real do uso e ocupação do solo, identificação de mudanças e alterações das características da paisagem urbana. Com base nos recursos tecnológicos, é possível observar que, nos anos 2017 e 2023, a expansão descontrolada da ocupação de terra contribuiu para a redução de áreas com vegetação e aumentou as áreas construídas. Diante disso, esses dois fatores (redução da cobertura vegetal e expansão do parque habitacional) tem implicações significativas na sustentabilidade ambiental de Luanda. A diminuição da cobertura vegetal expõe as vulnerabilidades às alterações climáticas, a erosão dos solos e permite a formação de ilhas de calor.

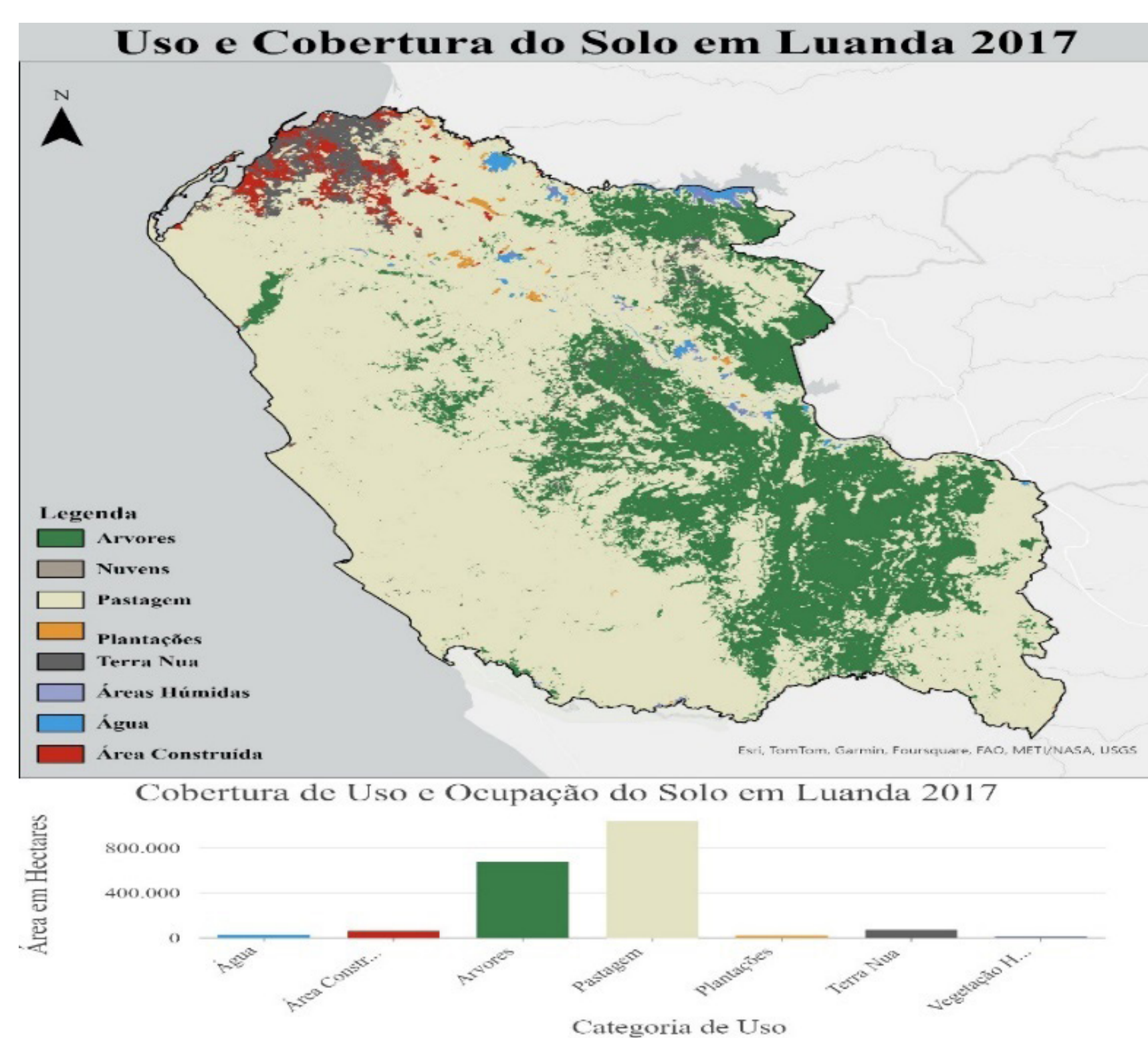


Figura 5. Cobertura de uso e ocupação do solo em Luanda 2017

Em 2017, a região noroeste de Luanda apresenta muitos espaços expostos e, em 2023, nota-se um aumento significativo da expansão do parque habitacional, o que explica como a rápida urbanização está alterando o uso e a ocupação do solo. Mesmo diante dessa realidade, verifica-se um silêncio, quer seja das instituições públicas, privadas e da Universidade, sobre as implicações ambientais da expansão urbana. A ausência de textos que problematizam essa temática pode ser justificada pelo fraco envolvimento das academias no enfrentamento dos problemas sociais e ambientais enfrentados pelas comunidades.

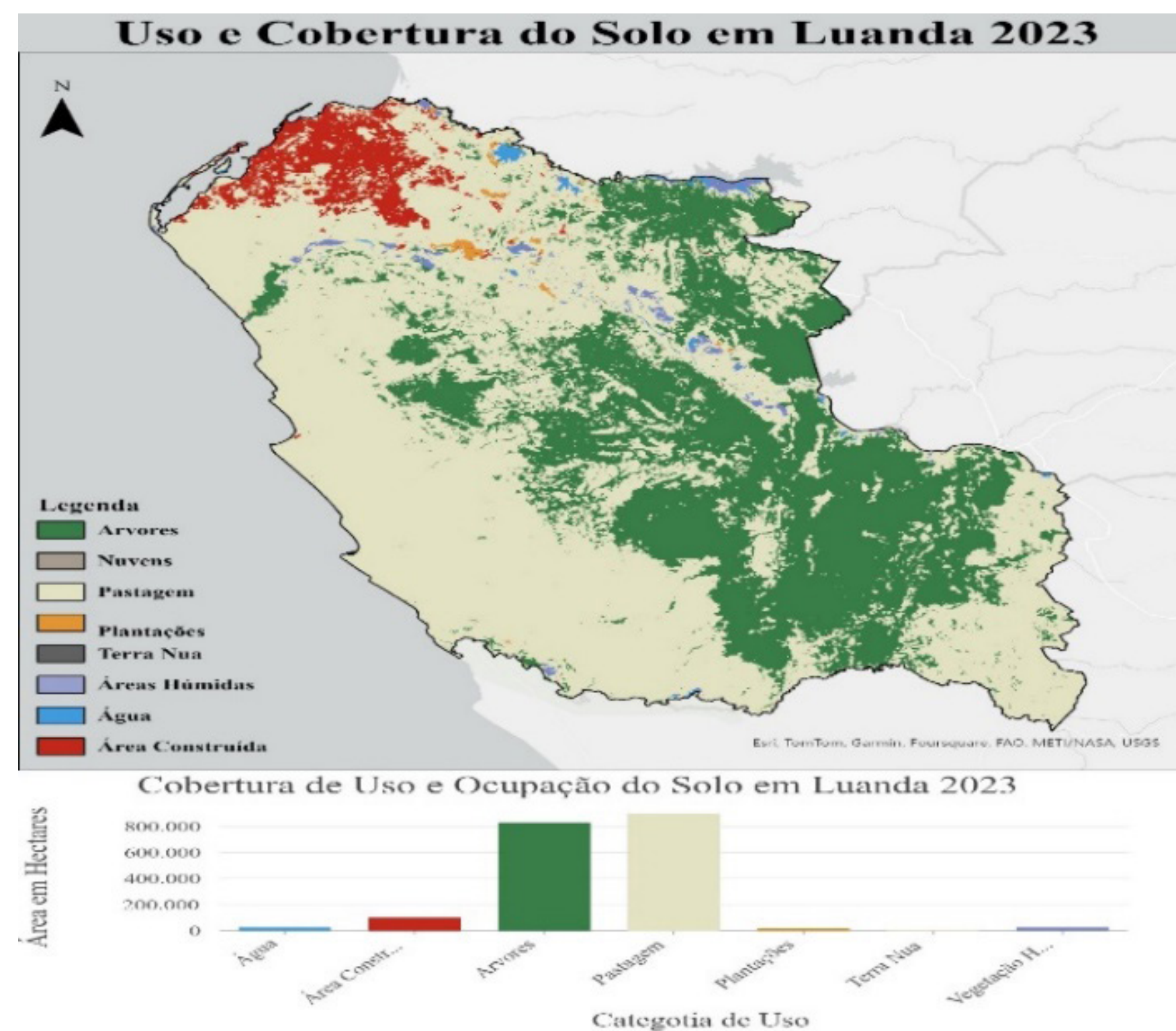


Figura 6. Cobertura de uso e ocupação do solo em Luanda 2017

## 4 CONCLUSÕES

É nítido que Luanda está cada vez mais urbana, com cerca de 97,3% da população a viver em zonas urbanas. Os desafios decorrentes desse crescimento são bem visíveis. A mancha urbana da cidade cresce em decorrência da produção de bairros informais, sobretudo aqueles de gênese ilegal, que reconfiguram a paisagem da cidade com suas residências de chapa de zinco, em espaços sem atratividade paisagística. Através das análises apresentadas, é possível observar que, entre 2017 e 2023, se nota um crescimento significativo do parque habitacional e do desmatamento da vegetação que possibilita um desequilíbrio ecológico da região. Ainda sobre 2017, as construções eram esparsas e distribuíam-se nas proximidades das vias. Sobre as áreas de vegetação, definidas no mapa como a categoria árvores, no contexto geral houve ampliação de 2017 para 2023 em relação a este tipo de cobertura do solo.

Sobre as áreas de vegetação, definidas no mapa como a categoria árvores, no contexto geral houve ampliação de 2017 para 2023 em relação a este tipo de cobertura do solo. Observam-se três áreas/regiões nas quais as alterações foram mais significativas. A área com maior expressão situa-se na porção centro-noroeste do município de Luanda, onde é perceptível a ampliação de áreas vegetadas e também sua densificação. Pequena ampliação e densificação também podem ser observadas na porção centro-sul e nordeste do município.

Esta análise só foi possível com a utilização de tecnologias geoespaciais. Entretanto, o recurso a essas tecnologias é de extrema importância para garantir o mapeamento e o monitoramento das áreas onde a vegetação está sendo substituída com a construção de novas residências.

---

## GEOSPATIAL TECHNOLOGIES IN MONITORING LAND USE AND OCCUPATION IN LUANDA: CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY

**ABSTRACT:** The province of Luanda has been witnessing unprecedented population growth for a long time, causing disorderly expansion and loss of green spaces with the emergence of new self-produced territories, impacting the environment and the population's quality of life. Data from 2017 indicate that Luanda's urban area grew by 57 867,96 hectares, which in 6 years expanded to 87 604,99 hectares in 2023, resulting in a significant increase in built areas and a reduction in exposed soil. Throughout the text, it is possible to observe the dense urbanization offered in multi-temporal satellite images, which also show an increasing level of soil coverage by the housing stock. The research aims to analyze how geospatial technologies help in monitoring land use and occupation in Luanda. From a methodological point of view, a mixed quantitative-qualitative approach was used to analyze the impacts of land use and occupation between 2017 and 2023, using geospatial techniques such as satellite images and geographic information systems (GIS).

**Keywords:** SIG. Land use and occupation. Housing. Luanda

---

## REFERÊNCIAS

Bueno, L. da S. (2020). *Uso e ocupação do solo: uma estratégia para o zoneamento sustentável*. Caçador – SC: EdUNIARP.

CREA. Crescem as cidades e os problemas ambientais. Recuperado de [www.crea-rj.org.br/noticias2001/docs/not0038.htm](http://www.crea-rj.org.br/noticias2001/docs/not0038.htm).



Marconi, M. de A. & Lakatos, Eva Maria. (2003). *Fundamentos de metodologia científica*. 5. ed. São Paulo: Atlas S.A.

Maiala, F. E. (2022). *As implicações ambientais provocadas pela pressão demográfica na província de Luanda (2014-2020)*. Monografia – Universidade Agostinho Neto, Luanda.

Medeiros, J. S. (1987). *Desenvolvimento metodológico para detecção de alterações da Cobertura vegetal através da análise digital de dados*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

Ministério do Urbanismo e Ambiente. MINUA (2006). Programa de Investigação Ambiental: relatório de estado geral do ambiente em Angola, Luanda. Recuperado de <https://pt.scribd.com/document/459141285/325767->.

Pessi, D. D., José, J. V., Mito, C. L. & Silva, N. M. (2021). *Monitoramento de mudanças climáticas: sensoriamento remoto comparado a estações meteorológicas automáticas*. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande.

Secuma, A. J. J. (2012). *Modelação do crescimento urbano da província de Luanda*. Dissertação – Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# OLHAR AMBIENTAL EM CITIES: SKYLINES: FERRAMENTAS E POSSIBILIDADES

*Marcelo Vieira Albuquerque<sup>1</sup>, Ana Paula Colavite<sup>2</sup>*

---

1 Universidade Estadual do Paraná, Programa Interdisciplinar Sociedade e Desenvolvimento, 87300-001, Campo Mourão, Brasil.

2 Universidade Estadual do Paraná, 87300-001, Campo Mourão, Brasil

1 albuquerquee.m.v@gmail.com

2 ana.colavite@unespar.edu.br

# RESUMO

Cities: Skylines, um jogo de simulação de cidades, lançado em 2015, é atualmente considerado o melhor simulador no quesito realismo. O jogo abrange competências para desenvolver a infraestrutura urbana, além de trazer ferramentas que possibilitam ao jogador analisar aspectos ambientais, como a utilização do solo e seus elementos naturais, geração de energia ecológica, gerenciamento de corpos hídricos e o próprio planejamento, implementado por meio de políticas públicas presentes no jogo. O objetivo deste artigo é demonstrar como Cities: Skylines abrange potencialidades e competências através de suas ferramentas para discutir questões ambientais. A metodologia deste trabalho consiste em pesquisa bibliográfica de artigos que abordam tópicos de sustentabilidade e meio ambiente, na etapa prática deu-se a exploração do jogo Cities: Skylines considerando as ferramentas e possibilidades de uso na temática ambiental, com capturas de tela dentro do jogo para exemplificar e debater as ferramentas e informações disponíveis. Os resultados deste trabalho indicam que há eficiência na análise de elementos que colaboram para o debate sobre meio ambiente e sustentabilidade no desenvolvimento urbano. Além disso, busca-se colaborar com as produções científicas como referencial para o objeto de estudo, considerando a escassez de trabalhos científicos sobre o tema.

**Palavras-chave:** Cities: Skylines. Meio ambiente. Sustentabilidade. Simulação. Tecnologia.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Cities: Skylines, desenvolvido pela Colossal Order e publicado pela Paradox Interactive, lançado em 10 de março de 2015 para PC, é um jogo de simulação e gerenciamento de cidades, que oferece ao jogador pleno controle e autonomia nas decisões que abrangem o desenvolvimento da cidade, desde o momento em que surgem os primeiros moradores até se tornar uma megalópole. Com isso, o desenvolvimento urbano é o foco deste simulador, mas, através de suas ferramentas, torna-se possível analisar diversos índices, como poluição do ar, paisagismo, urbanização, processamento de resíduos, fluxo de corpos hídricos, entre outros.

As questões ambientais estão cada vez mais pautadas em favor de novidades tecnológicas que consigam atender às complexidades emergentes do mundo contemporâneo. Altos índices de urbanização e a própria dinamização do espaço

geográfico trazem desafios à tona, como desmatamento, questões de gerenciamento de resíduos sólidos, rios sendo contaminados e o próprio aquecimento global.

Este trabalho tem como objetivo demonstrar como Cities: Skylines pode ser útil como um jogo simulador de cidades, mas que também traz potencialidades para discutir questões ambientais que envolvem toda a dinâmica do espaço geográfico onde se manifesta.

O referencial teórico deste trabalho baseia-se em artigos e livros encontrados através de plataformas como Google Acadêmico, SciELO e Capes. As capturas de tela do jogo serão realizadas na íntegra, utilizando a versão Cities: Skylines – Mayor’s Favorites (conjunto disponibilizado na Steam, com conteúdos adicionais pagos [intitulados de DLC – Downloadable Content/Conteúdo para baixar]). Espera-se contribuir cientificamente para discussões a respeito de como tecnologias emergentes e práticas como gamificação podem contribuir para questões ambientais.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL OU METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado Cities: Skylines, na sua versão Mayor’s Favorites disponibilizada para compra na plataforma Steam – PC, devido à disponibilidade da DLC Green Cities no pacote. Com essa DLC, conteúdos como edifícios ecológicos, produção de energia ecológica, tratamento de água, centro de reciclagem, entre outros, são disponibilizados para utilização.

Foi utilizado um arquivo de jogo salvo (*save game*) já planejado pelo autor. A obtenção de informações através do jogo se deu pela análise das ferramentas disponíveis, como a barra de construção na parte inferior da tela, as informações no canto superior esquerdo da tela e a opção de políticas, sendo o último ícone da barra de construção (figura 1).

As opções de água, eletricidade, resíduos, saúde, vento, poluição, proteção contra incêndios, recursos naturais e altura do terreno, disponíveis na seção de informações, foram representadas no mapa individualmente. Desta forma, a captura de tela (Print Screen) foi realizada e representada neste trabalho. Já as construções disponíveis na barra de ferramentas foram selecionadas conforme o impacto no quesito de sustentabilidade ambiental, focando nas categorias de eletricidade, água e esgoto para a análise.

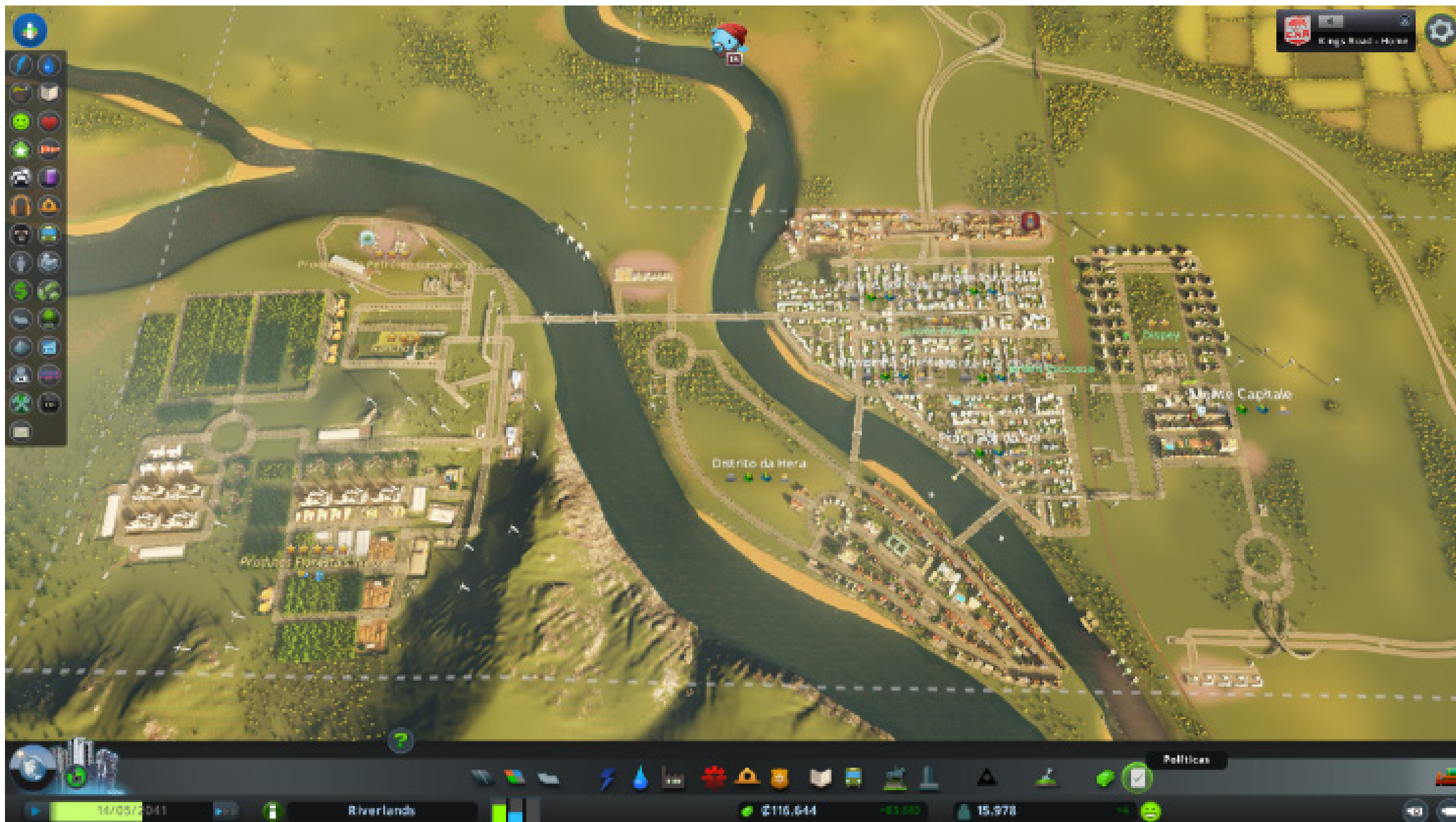


Figura 1. Tela do jogo Cities: Skylines, *layout* e ferramentas

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em momentos contemporâneos, problemas ambientais se encontram cada vez mais eminentes nas manifestações telecomunicativas (TV, rádio, *podcasts*) e meios de propagação de informações, seja por redes sociais ou aplicativos de mensagens. Queimadas se tornaram tópicos eminentes atualmente. Em comparação a 10 anos, há uma eminente aparição em pesquisas a partir de 2019 até 2024 (figura 2, dados retirados do Google Trends).



Figura 2. Pesquisas sobre queimadas em todo o mundo, no período de 2014 a 2024.

As queimadas desencadeiam problemáticas em questão social (problemas de saúde, como os respiratórios) e ambientais (devastação de habitats, refletindo em flora e fauna, além de afetar florestas nativas de perfil único globalmente). Além disto, questões como contaminação de corpos hídricos, gestão de resíduos e poluição do ar são pautas que permeiam o meio ambiente.

“O meio ambiente, concebido inicialmente como as condições físicas e químicas, junto com ecossistemas do mundo natural e que constitui o hábitat do homem, também é, por outro lado, uma realidade com dimensão de tempo e espaço” (Cavalcante & Garcia, 2024, p. 91). Conforme as autoras, o meio ambiente é aquele que se molda conforme a construção histórica do espaço geográfico que se encontra, com as influências humanas ou naturais, podendo divergir de uma realidade a outra, que por sua vez, “essa realidade pode ser tanto histórica (do ponto de vista do processo de transformação dos aspectos estruturais e naturais desse meio pelo próprio homem, em razão de suas atividades) como social (na medida em que o homem vive e se organiza em sociedade)” (Cavalcante & Garcia, 2024, p. 91).

Desta forma, a preservação do meio ambiente não pode ser confundida apenas como um aspecto material específico (como uma floresta, mar, ou espécie específica), ele deve ser levado em consideração como uma entidade complexa, composta por bens materiais e imateriais que interagem entre si, formando um sistema em que todas as partes estão interconectadas e refletindo suas reações em todas as partes deste sistema (Cavalcante & Garcia, 2024). Este senso de conciliar a preservação do meio ambiente e atender às necessidades humanas é o que se pauta no conceito de sustentabilidade.

Segundo os ideais de Torresi, Pardini e Ferreira (2010), o termo de desenvolvimento sustentável abriga paradigmas de uso de recursos com a intenção de atender as necessidades humanas sem comprometer gerações futuras com o alto consumo, sendo visto pela primeira vez, em 1987, no *Relatório Brundtland* da Organização das Nações Unidas, considerando a sustentabilidade ambiental, econômica e sociopolítica, com foco na sustentabilidade ambiental, para que as outras possam coexistir.

Como uma tecnologia que pode ser utilizada para o planejamento ambiental e sustentável, *Cities: Skylines* disponibiliza ferramentas que ultrapassam a gestão urbana. Na visão dos autores Droll e Söbke (2021), o jogo que se destaca atualmente é *Cities: Skylines*, com seu maior grau de realismo nos modelos de simulação mais detalhada, abarcando uma abundância de aprendizado por parte do jogador. Isso se dá pelas complexas ferramentas que o jogo disponibiliza, além da complexidade de fatores que compõem a dinâmica do jogo, inclusive para a gestão ambiental.

“Jogos de computador e outras simulações têm sido utilizados há muito tempo como método de ensino em todo o mundo. Eles oferecem uma visão abrangente, mas simplificada, da realidade aos estudantes, com uma abordagem prática para a resolução de problemas” (Hahtela et al., 2015, p. 11, tradução própria). Desta forma, a representação de uma realidade, ou um fator que se deseja analisar em um jogo que

consiga abarcar as suas competências, se demonstram práticas viáveis à discussão e planejamento teórico, “Considerando que os jogos são mídias potentes, pois, por meio da imersão em ambientes virtuais, os usuários (sujeitos de linguagem) (re)aprendem a pensar e a lidar com problemáticas ambientais” (Milantoni & Mota, 2022, p. 12).

Dentro de Cities: Skylines, várias ferramentas e informações podem contribuir para uma simulação de fatores ambientais e práticas sustentáveis, como, por exemplo, a quantidade de produção de resíduos (figura 3).



Figura 3. Informações sobre resíduos da cidade, parâmetros e construções.

As informações sobre resíduos abarcam os usos de aterro disponível na cidade, além de sua capacidade, e também a produção de resíduos de toda a cidade e sua capacidade de processamento. Uma das opções ecológicas disponíveis no jogo é o centro de reciclagem, como contraponto aos aterros. Este não gera poluição ao entorno que se localiza na cidade.

A geração de resíduos urbanos, para Rêgo et al. (2002, p. 1584), se faz “proporcional ao crescimento populacional, suscita uma maior demanda por serviços de coleta pública e esses resíduos, se não coletados e tratados adequadamente, provocam efeitos diretos e indiretos na saúde, além da degradação ambiental”. As informações simuladas do jogo disponibilizam mapear locais para coleta de resíduos e gerenciamento de uma melhor infraestrutura urbana.

Os resíduos se tornaram uma problemática mundial, através do descarte sem tratamento e em locais inadequados, acaba-se desencadeando problemas como contaminação do solo, água e ar, além de favorecer a proliferação de doenças por agentes naturais, inundações, entre outros, promovendo assim a degradação ambiental e

comprometendo a qualidade de vida dos cidadãos de suas proximidades e em diferentes escalas, dependendo do grau de contaminação (Soares et al., 2024).

A poluição causada por práticas empresariais pode ser observada no jogo (figura 4).



Figura 4. Informações sobre poluição.

A poluição é vista principalmente em torno das empreitadas por setores industriais do jogo, gerando assim o índice “poluição do terreno”. As proximidades aos setores que constam com muita poluição não se fazem viáveis para a construção de residências, pois, ao fazer isso, há um crescente índice de doenças por quem reside nesta condição, viabilizando assim maneiras de planejamento urbano.

Além disto, a “poluição de água potável” se dá através do despejo de águas provenientes do esgoto diretamente ao rio. Este processo pode ser gerenciado mediante construções como escoamento de água ecológico, estação de tratamento de água e estação de tratamento de água ecológica (figura 5). Desta forma, a poluição diminui drasticamente comparada ao escoamento de esgoto padrão, evitando a contaminação da água que seguirá o fluxo do rio, que, por sua vez, se não for bem planejado, contamina a cidade (figura 6).

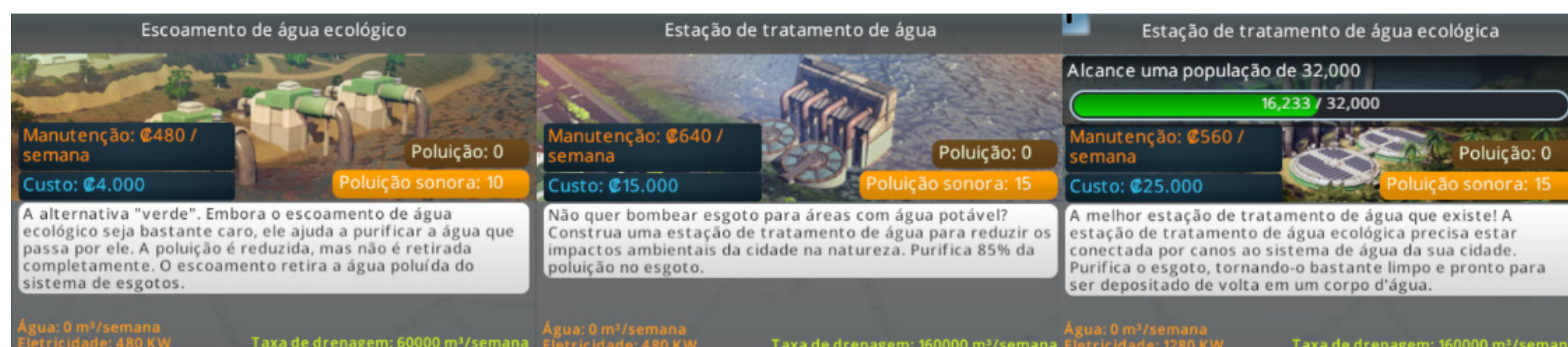


Figura 5. Estruturas ecológicas para o sistema de esgoto



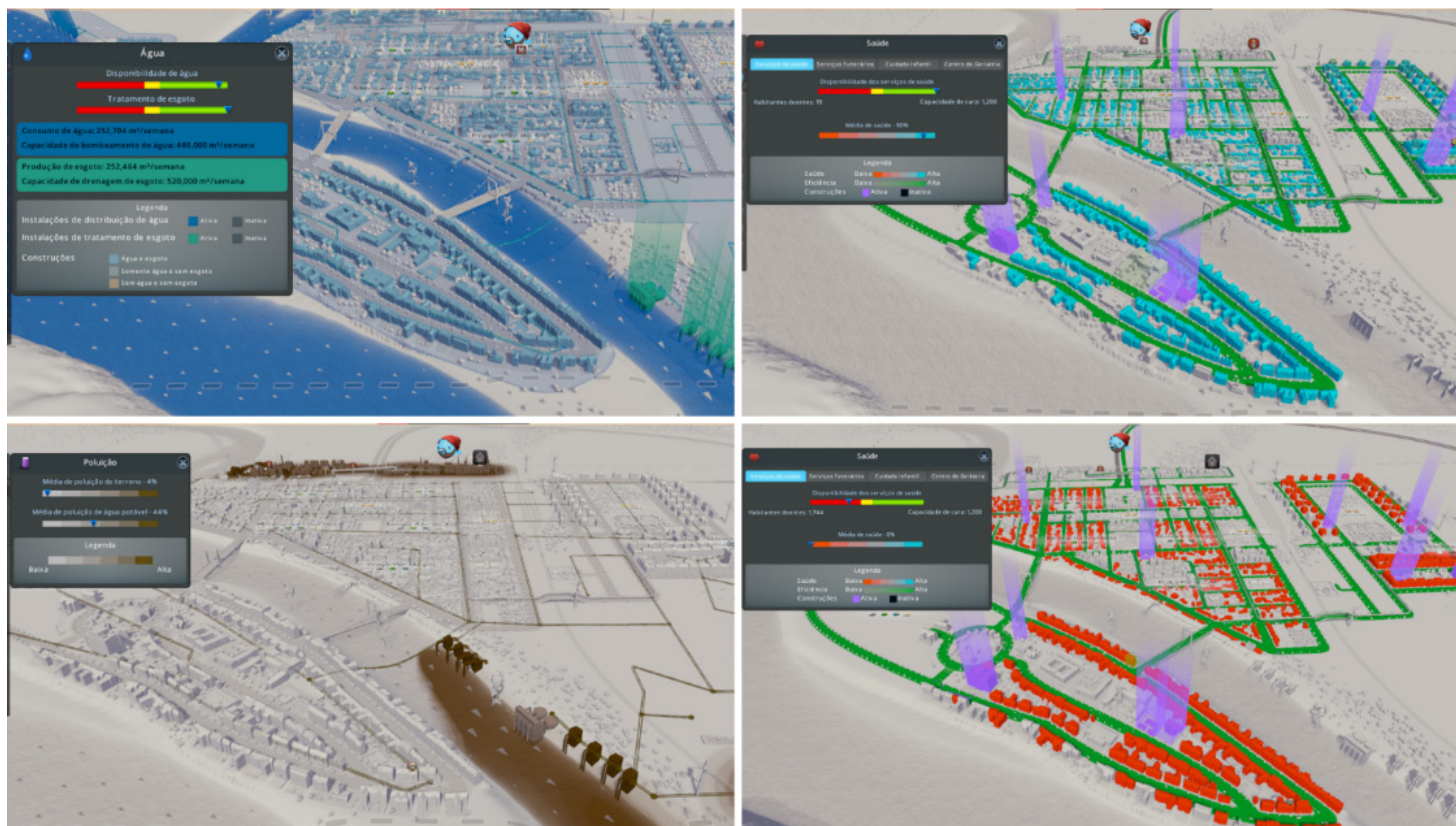


Figura 6. Exemplo de planejamento ambiental para a captação de água urbana

Um exemplo visível de como a infraestrutura ambiental se torna importante (figura 6) é como a disposição do esgoto é feita; se for bem planejado, a cidade não se contamina, mas quando as tubulações de escoamento de esgoto se encontram próximas às bombas de captação de água (ou que permeiam o fluxo do rio), a cidade inteira se contamina e disparam-se as taxas de doença, necessitando de atendimento médico imediatamente, além disto, vários cidadãos abandonam a cidade.

O jogo também disponibiliza informações sobre recursos naturais, como petróleo, minérios, florestas, terra fértil, entre outros. O que colabora para o planejamento de áreas de cultivo, exploração e até esquematizações de florestas, proporcionando um debate teórico visível e palpável para ideias de planejamento (figura 7).



Figura 7. Recursos naturais do jogo, índices

Outra ferramenta contemplada em Cities: Skylines é a altura do terreno e os fluxos de vento (figura 8). A altura do terreno pode ser modelada pelo jogador, possibilitando assim construções que atendam às necessidades de seus projetos. Além disto, o jogo demonstra curvas de linha de relevo de forma prática e visível, o que possibilita conversas sobre utilizações de morro para vegetação e até questões de construções civis a estas encostas. O vento é um fator que influencia diretamente a produção de energia eólica (figura 9).

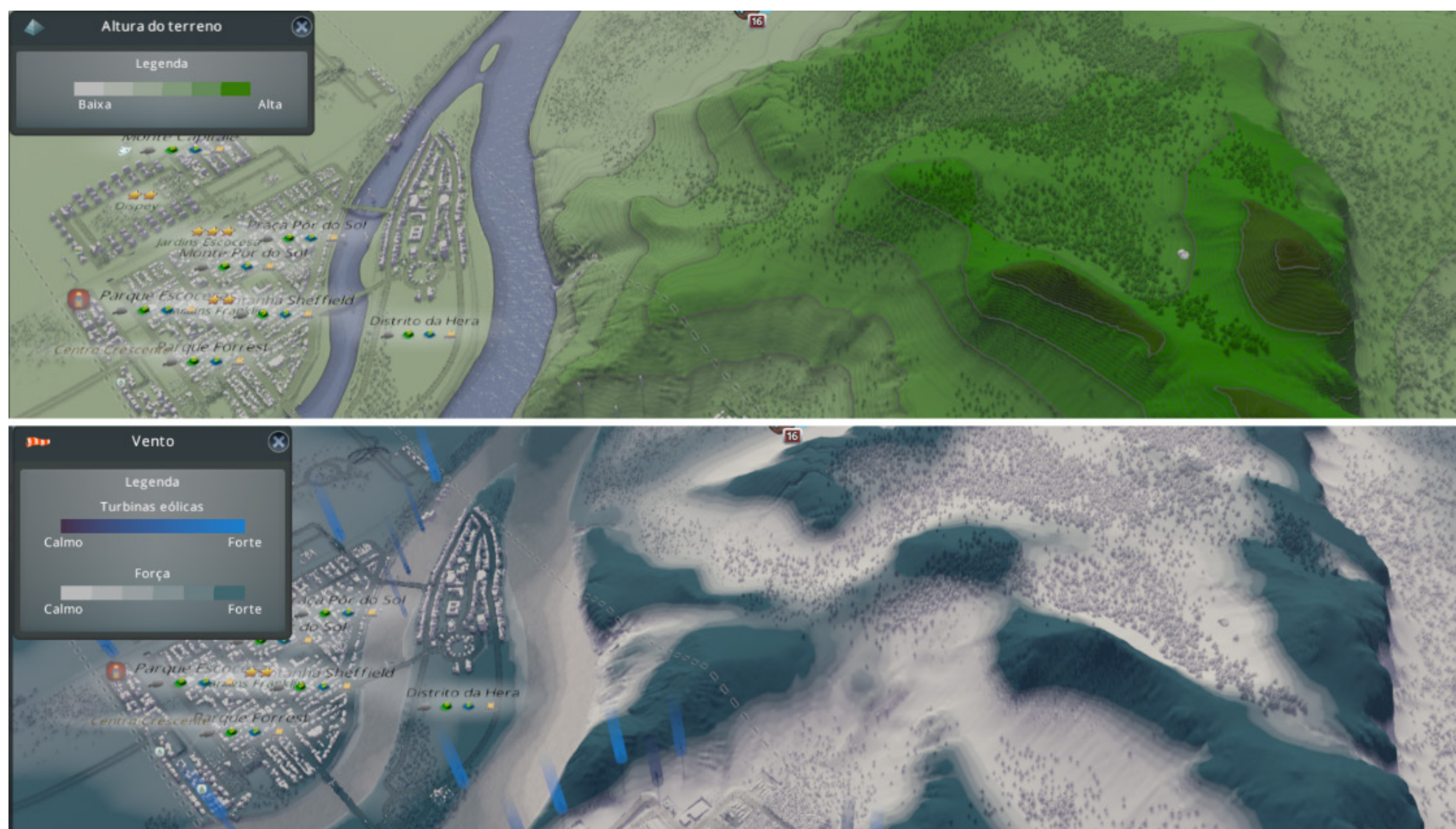


Figura 8. Informações sobre altura do terreno e vento

A produção eólica é influenciada diretamente pelos fluxos de vento, com zonas com maior eficiência e outras com menores, conforme a figura 8. As turbinas disponibilizadas são a turbina eólica e a turbina eólica avançada, que pode ser instalada nos rios do mapa, produzindo diferentes quantidades de energia.

Outras fontes de energia sustentáveis que podem ser vistas no jogo (figura 9) são as usinas hidroelétricas, que modificam a dinâmica do rio, podendo criar barragens e infraestruturas elaboradas; a usina de energia geotermal, que produz energia através do calor do núcleo da terra; e as torres solares, utilizando o calor emitido pelos raios solares como principal meio para gerar energia. Todas essas construções divergem na quantidade de eficiência na geração de energia, no preço de instalação, manutenção, mas todas não geram poluição (apenas sonora).

Áreas de controle a incêndios (figura 10) também são representadas através da informação “proteção contra incêndios”, que por meio das estruturações de vias na malha urbana possibilita aos corpos de bombeiros instalados fazer seus trabalhos. Conforme

a inacessibilidade a lugares remotos, menores são as taxas de eficiência, podendo ser representativo na opção “riscos” e “eficiência dos bombeiros”. Este aspecto demonstra visualmente como poderia ser feito o planejamento urbano para melhor eficiência em cidades de diversas escalas.



Figura 9. Construções que possibilitam a produção de energia ecológica, sem gerar poluição.



Figura 10. Demonstração da proteção contra incêndios.

Outra mecânica observada em Cities: Skylines são as políticas da cidade. Dentro destas pode-se encontrar políticas de uso de energia; uso de água; distribuição de detectores de fumaça; reciclagem; parques e recreação; transporte público gratuito; reciclar plástico, entre outros, que remetem a questões ambientais e de sustentabilidade, modificando assim a dinâmica de como as relações sociais e econômicas vão ocorrer na cidade.

Cities: Skylines apresenta diversas ferramentas que possibilitam uma visualização e análise para elementos ambientais e discussões que viabilizem questões sustentáveis. Por se tratar de uma simulação em um computador, é possível baixar ou fazer *mods* (modificações) que adicionem mais parâmetros ambientais, ou mesmo vegetações divergentes das que estão disponíveis, podendo atender desta forma as necessidades do jogador. Tanto para questões ambientais, quanto para propriedades urbanas, “seria possível fazer uma modificação no jogo que melhore a simulação de propriedade da terra” (Haahtela et al., 2015, p. 9, tradução própria).

## 4 CONCLUSÕES

Cities: Skylines, um jogo simulador de cidades, apresenta diversas competências em sua composição, desde a simulação fiel do dia a dia de um cidadão até o gerenciamento complexo de linhas de trânsito, distribuição de produtos e pessoas, e questões ambientais relacionadas à sustentabilidade.

Por meio de suas ferramentas e informações disponibilizadas, foi possível analisar aspectos da gestão energética da cidade, com meios sustentáveis para a geração; distribuição/abastecimento de água, considerando as complexidades do fluxo hídrico e sua composição; infraestrutura de saneamento básico, incluindo estruturas que buscam formas ecológicas para esses processos; análises do terreno, levando em conta elementos naturais encontrados na paisagem, incluindo a elevação, que interfere diretamente nos fluxos de vento, trazendo maior dinamismo para o gerenciamento dos recursos que dele dependem; e, por fim, estruturas e políticas que possibilitam a imaginação de cenários que proporcionem melhor infraestrutura urbana de forma sustentável.

As simulações proporcionam melhor percepção/representação das informações, facilitando a compreensão para aqueles que possuem capacidade de explorar suas potencialidades, e também se tornam uma ferramenta válida para aqueles que desejam analisar elementos específicos em diferentes escalas ou representações.

Este trabalho pretende colaborar teoricamente no que diz respeito às simulações no âmbito ambiental e sustentável, considerando a escassez de informações sobre o objeto de estudo (Cities: Skylines), com destaque para a predominância de produções em línguas estrangeiras (Milantoni e Mota [2022] também enfatizam a deficiência em estudos remetentes ao viés ambiental).

# ENVIRONMENTAL PERSPECTIVE IN CITIES: SKYLINES: TOOLS AND POSSIBILITIES

**ABSTRACT:** Cities: Skylines, a city simulation game released in 2015, is currently considered the best simulator in terms of realism. The game encompasses skills for developing urban infrastructure and provides tools that allow players to analyze environmental aspects, such as land use and its natural elements, ecological energy generation, management of water bodies, and urban planning, which is implemented through public policies present in the game. The aim of this article is to demonstrate how Cities: Skylines encompasses potentialities and competencies through its tools to discuss environmental issues. The methodology of this study consists of a bibliographic review of articles that address sustainability and environmental topics. In the practical phase, the game Cities: Skylines was explored, considering the tools and possibilities for use in the environmental theme, with in-game screenshots to illustrate and discuss the available tools and information. The results of this study indicate that there is efficiency in the analysis of elements that contribute to the debate on the environment and sustainability in urban development. Furthermore, this work aims to contribute to scientific literature as a reference for the object of study, considering the scarcity of scientific studies on the topic.

**Keywords:** Cities: Skylines, environment, sustainability, simulation, technology.

---

## REFERÊNCIAS

Cavalcante, E. N. & Garcia, R. A. de S. (2024). Meio ambiente, inteligência artificial e sustentabilidade. In *ESG e economia circular na gestão 4.0: ações para negócios mais sustentáveis* (pp. 90-103). Blucher Open Access. Recuperado de <https://pdf.blucher.com.br/openaccess/9786555503456/05.pdf>.

Droll, D. & Söbke, H. (2021). Realism of Simulation Models in Serious Gaming: Urban Water Management in Cities: Skylines. In *Games and Learning Alliance: 10th International Conference, GALA 2021, La Spezia, Italy, December 1-2, 2021, Proceedings 10* (pp. 277-282). Springer International Publishing. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/2109.10572>.

Haahtela, P. et al. (2015). *Gamification of Education: Cities Skylines as an educational tool for real estate and land use planning studies*. Recuperado de <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/d996a88a-7650-4340-808a-57bd95c22a0e/content>.

Milantoni, L. de O. & Mota, I. O. (2022). A cidade e o meio ambiente em jogos digitais: uma análise do discurso ambiental em The Sims e Cities Skylines. *Cadernos UniFOA*, 17(50), 1-13. DOI: 10.47385/cadunifoa.v17.n50.3982. Recuperado de <https://unifoa.emnuvens.com.br/cadernos/article/view/3982>.

May, L. & Hall, B. (2023). From Aesthetics to Asymmetry: Contradictions of Ecological Play in Cities: Skylines. *Games and Culture*, 15554120231219729. Recuperado de <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/15554120231219729>.

Olszewski, R. et al. (2020). Developing a serious game that supports the resolution of social and ecological problems in the toolset environment of cities: Skylines. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 118. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/2/118>.

Rêgo, R. de C. F., Barreto, M. L. & Killinger, C. L. (2002). O que é lixo afinal? Como pensam mulheres residentes na periferia de um grande centro urbano. *Caderno de Saúde Pública*, 18(6), 1583-1592. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/csp/a/4HxmR9FHvhYM3NbsSrtvgTH/?format=pdf&lang=pt>.

Soares, C. N. et al. (2024). *Percepção ambiental sobre lixo e meio ambiente*. Recuperado de <https://sevenpublicacoes.com.br/anais7/article/view/4804/8647>.

Torresi, S. I., Pardini, V. L. & Ferreira, V. F. (2010). O que é sustentabilidade? *Química nova*, 33, 1-1. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/qn/a/VkxbRDxfJvvpwRjZfCTsJYC/>.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO POR NITRATO EM POÇOS ARTESIANOS NA REGIÃO DE MARINGÁ-PR NO ANO DE 2022

*Lenonn Teles de Oliveira<sup>1\*</sup>, Marcela Fernandes Silva<sup>1</sup>, Cláudia Telles Benatti<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Maringá, 87020-900, Maringá-PR, Brasil.  
\*E-mail: lenonnvide@hotmail.com

# RESUMO

As águas subterrâneas são fundamentais para o abastecimento humano, no entanto, nas últimas décadas têm enfrentado sérios problemas de contaminação por nitrato, especialmente nas regiões urbanas, que levam ao aparecimento de patologias humanas. O objetivo desse estudo foi dar sequência ao monitoramento de contaminação por nitrato, realizado entre os anos de 2008 e 2021, em poços artesianos localizados na cidade de Maringá, Paraná. Para tanto, foram considerados 407 registros de análises físico-químicas de qualidade das águas realizados no ano de 2022. Apenas resultados sem intervenção de tratamento foram utilizados, permitindo a avaliação das condições naturais de contaminação. A análise dos dados revelou que aproximadamente 19% delas (76 registros) apresentavam concentrações superiores ao limite de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  estabelecido pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde. Os resultados evidenciam a importância do diagnóstico da contaminação da água por nitrato, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias de mitigação, visando à melhoria da qualidade da água subterrânea e a segurança hídrica na região.

**Palavras-chave:** Nitrato. Poços artesianos. Qualidade da água.

---

## 1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas correspondem à principal fonte de água potável em muitos países ao redor do mundo. Sua disponibilidade e abundância frequentemente fazem delas a única alternativa viável para o abastecimento de grandes comunidades urbanas e rurais (Abascal et al., 2022). De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2020, uma em cada quatro pessoas não tinha acesso à água potável. Com isso, dentre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, o objetivo 6 prevê a garantia do acesso à água potável e saneamento básico para todos até 2030 e enfatiza sua importância (OMS, 2021).

No entanto, com a intensificação das atividades industriais e agrícolas, bem como a urbanização de determinadas regiões, resultaram no aumento considerável na geração de poluentes tóxicos que comprometem a qualidade dessa importante fonte de vida e desenvolvimento (Bartucca et al., 2016). Além disso, a nível mundial, a contaminação das águas subterrâneas em áreas urbanas e periurbanas tem sido reconhecida como um problema sério. Além das fontes convencionais de contaminação (efluentes domésticos



e industriais), vazamentos em tubulações (esgoto e abastecimento de água), lixiviação, lixo, pecuária, agroquímicos, poluentes emergentes e a presença de biossólidos também são levantados como preocupações em relação à contaminação da água (McCance et al., 2018).

O íon nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é um dos poluentes mais presentes nas águas subterrâneas do mundo, que ameaça tanto a saúde humana como dos ecossistemas (Mateo-Sagasta; Sara Marjani Zadi, 2018; Skalaban et al., 2024). Os efeitos da contaminação por nitrato nos mananciais são preocupantes. Um número crescente de estudos observacionais tem encontrado associação entre os níveis de nitrato na água e o aparecimento de patologias humanas (Picetti et al., 2022). Por exemplo, em bebês, altos níveis de nitrato na água podem levar à metemoglobinemia ou “síndrome do bebê azul”, uma condição séria que afeta a capacidade do sangue de transportar oxigênio, podendo ser fatal em casos extremos (Mendy; Thorne, 2024). Além disso, sua presença excessiva pode desencadear o crescimento de algas e plantas aquáticas, causando eutrofização. Esse fenômeno resulta na diminuição do oxigênio disponível na água, levando à morte de peixes e outros organismos aquáticos, além de prejudicar a qualidade da água para consumo humano (Akinawo, 2023).

Os íons nitrato são estáveis e altamente solúveis, com baixo potencial para precipitação ou adsorção no solo, tornando-o de difícil tratamento por processos convencionais de tratamento (Kou et al., 2021; Serio et al., 2018; Zheng et al., 2020). A Organização Mundial da Saúde já possui diretrizes sobre a segurança das concentrações de compostos nitrogenados na água para uso humano, que são baseadas na ausência de efeitos específicos à saúde de curto prazo, no entanto, em muitos países, sobretudo naqueles subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, os limites para águas rasas e poços são regularmente excedidos (Aghabalaei et al., 2024). No Brasil, o valor máximo permitido (VMP) para  $\text{NO}_3^-$  é estabelecido pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde no Brasil, em  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  (Brasil, 2021). Para o estado de São Paulo, a Companhia Ambiental do Estado (CETESB) recomenda o monitoramento em níveis ainda menores, quando presente em concentrações iguais ou superiores a  $5 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ . No município de Maringá, localizado na região norte do estado do Paraná, Silva et al. (2023) relatam o aumento do número de casos de contaminação da água por nitrato no período de 2008 a 2021, sobretudo em áreas próximas ao centro da cidade.

Portanto, o objetivo desse estudo foi dar sequência ao monitoramento de contaminação por nitrato, realizado entre os anos de 2008 e 2021, em poços artesianos localizados na cidade de Maringá, Paraná.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL OU METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido com base em 331 registros de análises físico-químicas da qualidade das águas subterrâneas, provenientes de poços tubulares localizados na cidade de Maringá, estado do Paraná, Brasil. Os dados foram coletados entre os anos de 2022 (280 registros) e 2023 (51 registros) e disponibilizados pelo Laboratório de Saneamento Ambiental (LASAM) da Universidade Estadual de Maringá (UEM). A disponibilização ocorreu mediante a obtenção de autorização prévia dos usuários, formalizada por meio de um formulário específico.

Os registros foram inicialmente classificados considerando as seguintes variáveis:

1. Ano da coleta: 2022.
2. Origem da água coletada: poço (amostras retiradas diretamente do aquífero); torneira conectada ao poço (sem tratamento); água bruta (sem qualquer processo de purificação).
3. Faixas de concentração de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ): de 0 a 20  $\text{mg L}^{-1}$ , separados a cada 2,5  $\text{mg L}^{-1}$ .

A análise foi conduzida de maneira descritiva, utilizando o *software Power BI* para organização, visualização e exploração dos dados. A plataforma foi escolhida por sua capacidade de integrar grandes volumes de informações.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 1 apresenta a distribuição dos poços com captação subterrânea na cidade de Maringá-PR, segundo informações do Instituto de Água e Terra (IAT). Foram avaliados 407 poços, dos registros avaliados, 76 ou 19% do total apresentaram concentrações de nitrato superiores ao limite de 10  $\text{mg L}^{-1}$  estabelecido pela Portaria 888 do Ministério da Saúde (Figura 2). Silva et al. (2023), em seu estudo realizado no período de 2008 a 2021, também na cidade de Maringá-PR, verificou 414 registros de análises de ( $\text{NO}_3^-$ ) de águas sem tratamento prévio para tais poços. Destes, 87 registros apresentaram concentrações de ( $\text{NO}_3^-$ ) igual ou acima de 10  $\text{mg L}^{-1}$ , o que representou 21,01% de análises de nitrato (87/414) em que o teor do íon excedia o limite dos padrões de potabilidade.

Ao longo do período analisado, observa-se uma variação percentual entre o número total de registros e as respectivas contaminações. Destaca-se, no entanto, que, em média, a contaminação por nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) tem apresentado um aumento significativo. Esse

comportamento está alinhado com os achados de Zhang et al. (2023), que relataram um aumento na taxa média anual de concentração de nitrato em áreas sujeitas a processos de urbanização e expansão urbana, em comparação com áreas onde o uso e a ocupação permanecem estáveis. Esse fenômeno sugere que o aumento na contaminação por nitrato está intrinsecamente ligado ao avanço do processo de urbanização, que envolve a intensificação de atividades humanas, como o uso de fertilizantes agrícolas, despejo inadequado de efluentes domésticos e industriais, e mudanças no manejo de águas residuais. Assim, a tendência histórica de elevação das concentrações de nitrato em áreas urbanas reflete diretamente os impactos do crescimento desordenado e da ocupação territorial, reforçando a necessidade de práticas de gestão sustentável e planejamento adequado para mitigar os impactos ambientais decorrentes (Modi & Kasher, 2024; Popova et al., 2023; Zirrahi et al., 2024).

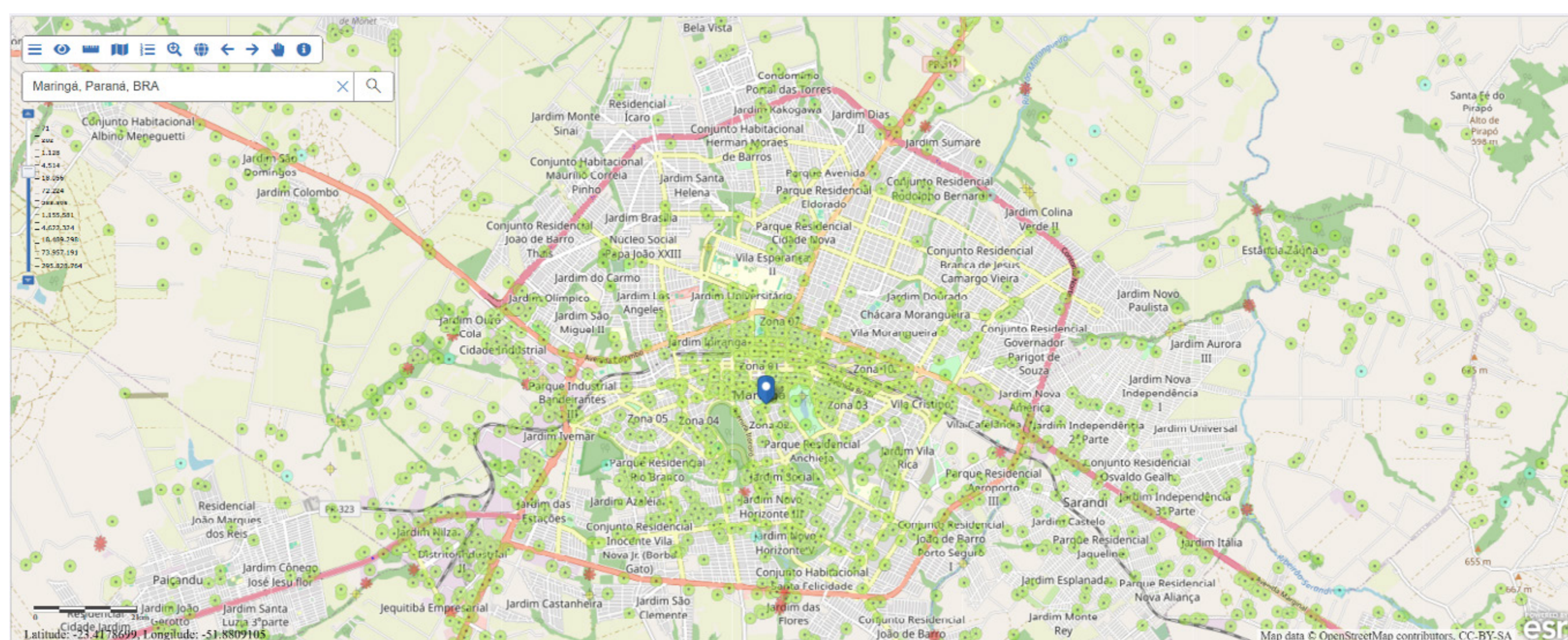


Figura 1. Distribuição espacial dos poços tubulares no município de Maringá-PR (SIGARH, 2024)

| Faixa de concentração | Nº  | Média | Desvio Padrão |
|-----------------------|-----|-------|---------------|
| 0,0 - 2,5             | 59  | 1,42  | 0,77          |
| 2,5 - 5,0             | 73  | 3,91  | 0,73          |
| 5,0 - 7,5             | 115 | 6,26  | 0,77          |
| 7,5 - 10              | 82  | 8,70  | 0,62          |
| 10 - 12,5             | 55  | 11,15 | 0,70          |
| 12,5 - 15             | 20  | 13,62 | 0,81          |
| 15 - 17,5             | 1   | 16,70 | 0,00          |
| 17,5 - 20             | 2   | 19,22 | 0,00          |

Figura 2. Número total de registros e contaminação por nitrato na região de Maringá por faixa de concentração em  $\text{mg L}^{-1}$

Além disso, é relevante destacar que o maior valor de concentração de nitrato registrado foi de  $28,62 \text{ mg L}^{-1}$ , também no ano de 2022, indicando que houve casos de contaminação muito acima do limite da Portaria 888/2022. Em um estudo realizado em

22 municípios das regiões de Assis e Marília/SP, as amostras de água com resultados insatisfatórios apresentaram valores que variaram de 11,5 a 28,0 mg L<sup>-1</sup> e valor médio de 15,8 mg L<sup>-1</sup> de (Silva et al., 2019).

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo evidenciam a relevância do monitoramento contínuo da qualidade da água em poços artesianos, especialmente em regiões onde há alta dependência desse recurso para abastecimento. A análise do ano de 2022 revelou flutuações significativas na contaminação por nitrato, 19% dos registros analisados estando acima dos valores máximos permitidos, isso implica que os proprietários devem ter cada vez mais atenção para a adoção de medidas corretivas, evidenciando a necessidade de ações de conscientização e intervenções técnicas no combate à contaminação. Este estudo contribui para a compreensão do panorama de contaminação por nitrato na região de Maringá, oferecendo subsídios para a formulação de políticas públicas e para o desenvolvimento de soluções práticas e sustentáveis que possam ser aplicadas em outras localidades com problemas semelhantes. Assim, reforça-se a necessidade de integrar esforços entre gestores públicos, comunidade acadêmica e população para mitigar os impactos da contaminação e garantir a qualidade da água para as gerações presentes e futuras.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Estende-se esse agradecimento ao Laboratório de Saneamento da Ambiental (LASAM) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) pelo fornecimento dos laudos de análises dos poços.

---

## ANALYSIS OF NITRATE CONTAMINATION IN ARTESIAN WELLS IN THE MARINGÁ-PR REGION IN 2022

**ABSTRACT:** Groundwater is essential for human supply; however, in recent decades, it has faced severe nitrate contamination problems, especially in urban areas, leading to the emergence of human pathologies. The objective of this study was to continue monitoring

nitrate contamination, conducted between 2008 and 2021, in artesian wells located in the city of Maringá, Paraná. For this purpose, 331 records of physicochemical water quality analyses from 2022 and 2023 were considered. Only results without treatment intervention were used, allowing for the evaluation of natural contamination conditions. Data analysis revealed that approximately 32% of the samples (107 analyses) had concentrations exceeding the limit of 10 mg L<sup>-1</sup> established by Ordinance 888/2021 of the Ministry of Health, with 82 samples (29.29%) in 2022 and 25 (49.02%) in 2023. These findings highlight the importance of diagnosing nitrate contamination, providing insights for developing public policies and mitigation strategies aimed at improving groundwater quality and ensuring water security in the region.

**Keywords:** Nitrate; Artesian wells; Water quality.

---

## REFERÊNCIAS

- Abascal, E., Gómez-Coma, L., Ortiz, I. & Ortiz, A. (mar. 2022). Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of The Total Environment*, 810, 152233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152233>.
- Aghabalaei, V., Baghdadi, M., Goharrizi, B. A. & Noorimotlagh, Z. (fev. 2024). A systematic review of strategies to overcome barrier for nitrate separation systems from drinking water: Focusing on waste streams treatment processes. *Chemosphere*, 349, 140757. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140757>.
- Akinnowo, S. O. (1 ago. 2023). Eutrophication: causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>.
- Bartucca, M. L., Mimmo, T., Cesco, S. & Del Buono, D. (15 jan. 2016). Nitrate removal from polluted water by using a vegetated floating system. *Science of The Total Environment*, 542, 803–808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.156>.
- 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. Recuperado de <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>.

Kou, X., Ding, J., Li, Y., Li, Q., Mao, L., Xu, C., Zheng, Q. & Zhuang, S. (1 maio 2021). Tracing nitrate sources in the groundwater of an intensive agricultural region. *Agricultural Water Management*, 250, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106826>.

Mateo-Sagasta, J. & Sara Marjani Zadi, H. (2018). *A Global Review on Water Pollution from Agriculture*.

Mccance, W., Jones, O. A. H., Edwards, M., Surapaneni, A., Chadalavada, S. & Currell, M. (dez. 2018). Contaminants of Emerging Concern as novel groundwater tracers for delineating wastewater impacts in urban and peri-urban areas. *Water Research*, 146, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.013>.

Mendy, A. & Thorne, P. S. (1 mar. 2024). Long-term cancer and overall mortality associated with drinking water nitrate in the United States. *Public Health*, 228, 82–84. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2024.01.001>.

OMS. (2021). 5 years into the race to the 2030 Targets: Safe drinking water. Recuperado de <https://www.who.int/multi-media/details/5-years-into-the-race-to-the-2030-targets-safe-drinking-water>.

Picetti, R., Deeney, M., Pastorino, S., Miller, M. R., Shah, A., Leon, D. A., Dangour, A. D. & Green, R. (1 jul. 2022). Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk: A systematic review with meta-analysis. *Environmental Research*, 210, 112988. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112988>.

Serio, F., Miglietta, P. P., Lamastra, L., Ficocelli, S., Intini, F., De Leo, F. & De Donno, A. (15 dez. 2018). Groundwater nitrate contamination and agricultural land use: a grey water footprint perspective in Southern Apulia Region (Italy). *Science of The Total Environment*, 645, 1425–1431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.241>.

SIGARH. (2024). *Sistema de Informações para Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos*. [S. l.: s. n.]. Recuperado de <http://www.sigarh.iat.pr.gov.br/sigarh-gis/index.xhtml>.

Silva, R. A. da, Santos, R. C. & Ferreira, L. O. (31 maio 2019). Avaliação da concentração de nitrato em águas subterrâneas de poços das regiões de Assis e Marília, São Paulo. *Vigilância Sanitária em Debate*, 7(2), 102–106. <https://doi.org/10.22239/2317-269x.01290>.

Silva, M. F., Patricio, V. I., Azoia, V. de S., Bolonhez, B. F. & Benatti, C. T. (2023). IV-993 - Avaliação da concentração de nitrato no manancial subterrâneo do município de Maringá - PR no período de 2008 a 2022.

Skalaban, T. G., Thompson, D. A., Madrigal, J. M., Blount, B. C., Espinosa, M. M., Kolpin, D. W., Deziel, N. C., Jones, R. R., Beane Freeman, L., Hofmann, J. N. & Ward, M. H. (1 abr. 2024). Nitrate exposure from drinking water and dietary sources among Iowa farmers using private wells. *Science of The Total Environment*, 919, 170922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170922>.

Zheng, W., Wang, S., Tan, K. & Lei, Y. (10 mar. 2020). Nitrate accumulation and leaching potential is controlled by land-use and extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain. *Science of The Total Environment*, 707, 136168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136168>.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# A DIFUSÃO DO MODELO BET (BACIA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO) COMO EIXO CENTRAL DA EDUCAÇÃO AMBIENTAL

*Adriana Fanali<sup>1</sup>, Mauro Parolin<sup>2</sup>, Jefferson de Queiroz Crispim<sup>2</sup>*

---

1 Universidade Estadual de Maringá – UEM, Departamento de Geografia, Maringá, Brasil.

2 UNESPAR – Universidade Estadual do Paraná, Departamento de Geografia, Campo Mourão, Brasil.

\*E-mail: [adrianafanalli@gmail.com](mailto:adrianafanalli@gmail.com)



# RESUMO

Grande parte da população brasileira, principalmente comunidades rurais, ainda não dispõe de serviços como o tratamento de esgoto. E, na ausência de sistemas coletivos de tratamento de efluentes, diversas tecnologias podem ser utilizadas, tais como a bacia de evapotranspiração (BET). Nessa perspectiva, a Educação Ambiental é um poderoso instrumento de transformação, mediante a busca contínua do conhecimento pelo indivíduo. Assim, este artigo tem como objetivo avaliar os efeitos das ações de Educação Ambiental em parceria com técnicos do IDR/PR em municípios da região metropolitana de Maringá-PR. Trata-se de uma pesquisa participante, cuja metodologia consistiu em ações de Educação Ambiental mediadas por reuniões com gestores públicos e produtores rurais, exposição de uma maquete na feira agropecuária Expoingá 2023 e uma oficina de construção de uma BET no município de Doutor Camargo-PR. As ações resultaram em mudanças na percepção ambiental dos participantes, além de apresentar uma alternativa para o tratamento do esgoto doméstico em áreas rurais e aumentar a possibilidade de construção de outras BET. Portanto, a Educação Ambiental, atrelada à Educação Sanitária contribuíram para o empoderamento dos produtores e a aplicação das tecnologias ensinadas. Entretanto, faz-se necessário que haja mais investimentos em programas de Educação Ambiental para o saneamento rural em pequenas propriedades.

**Palavras-chave:** Educação sanitária. Tecnologias. Produtores rurais.

---

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo a Política Nacional de Saneamento Básico –PNSB, o Saneamento Básico é composto pelo conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Esses quatro serviços públicos são fundamentais para promoção da saúde e bem-estar da população (Brasil, 2007).

A expansão do tratamento de esgoto é sem dúvida um dos grandes desafios para a sociedade. A inexistência do tratamento pode levar ao despejo direto dos efluentes no solo ou nos rios, ocasionando graves problemas ambientais e de saúde pública. É preciso encontrar soluções inovadoras e criativas para o tratamento do esgoto (Crispim et al., 2019), uma vez que esta situação é ainda mais precária em comunidades rurais,

onde a baixa densidade populacional não favorece a instalação de sistema coletivo de tratamento de efluentes.

Apesar da criação do Plano Nacional de Saneamento Básico de 2013, há uma grande dificuldade dos governos em colocar em prática o que foi estabelecido por lei, seja por falta de capacitação dos muitos atores envolvidos, excesso de burocracias no setor público, não cumprimento de metas por parte dos governos, desvios de recursos, até a ausência da comunidade na participação dos planos e cobrança nas execuções deles. Esses entraves tornam as metas dos planos do governo sem perspectivas de se concretizarem (Rezende, 2018).

A bacia de evapotranspiração (BET) é uma das possíveis soluções para tratamento de esgoto em comunidades rurais e outras áreas isoladas (Athaydes et al., 2022). Ainda pouco difundido, esse sistema destaca-se por aliar plantas com grande potencial de evapotranspiração ao tratamento biológico realizado por bactérias anaeróbias, produzindo pouca quantidade de lodo e gerando pouco ou nenhum efluente final. Dessa forma, é possível o aproveitamento da água e de grande parte dos nutrientes contidos no esgoto doméstico pelas plantas do sistema, sem necessidade de pós-tratamento ou de contato direto dos usuários com o efluente.

Mesmo com tecnologias e soluções individuais, a falta de Educação Ambiental e a baixa renda familiar são alguns dos fatores que tornam comum o lançamento de esgoto a céu aberto, em fossas absorventes ou diretamente nos rios. Essa forma inadequada de disposição de efluentes domésticos provoca impactos negativos na saúde e no desenvolvimento socioambiental da comunidade, pois pode contaminar o solo, o lençol freático, as águas superficiais, além de produzir odores e atrair vetores (Machado et al., 2020).

Pilon (2005) enfatiza a importância das ações, para democratização e difusão de conhecimentos do meio acadêmico, para a comunidade por meio de atividades educativas e serviços como forma de medida reguladora ambiental e econômica. Somente com a aproximação e o conhecimento acerca do meio ambiente é possível a sua preservação.

É imprescindível a construção de um processo contínuo de Educação Ambiental, como forma estratégica de inclusão da comunidade na preservação e na construção de um ambiente onde o ser humano conviva em harmonia e equilíbrio com a natureza (Carvalho, 2005).

É fundamental a associação da Educação Ambiental aos projetos e políticas públicas voltadas para o saneamento (Athaydes et al., 2018). E, segundo o Art. 1º da Política

Nacional de Educação Ambiental – PNEA, a Educação Ambiental pode ser entendida como: “os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade” (Brasil, 1999).

Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais provocados pela falta de tratamento do esgoto doméstico em propriedades rurais da região de Maringá, buscou-se em parceria com técnicos extensionistas do IDR/PR, estratégias de Educação Ambiental informal para realizar uma “capacitação” na implantação do modelo de BET para os produtores rurais a fim de avaliar os efeitos das ações aplicadas.

A hipótese da educação ambiental como forma de difusão de tecnologias e conhecimentos ambientais e sustentabilidade foi confirmada nesta pesquisa, diante do número expressivo de visitas à maquete na Expoingá, pelo engajamento no projeto por parte dos técnicos extensionistas e pela articulação de outros atores do território como os gestores públicos e produtores rurais.

## 2 METODOLOGIA

O presente artigo trata-se de uma pesquisa participante (Brandão & Borges, 2007), na qual a coleta de dados foi feita em campo, a partir da interação do pesquisador com a problemática ambiental sobre a falta de tratamento de esgoto, enfrentada em propriedades rurais na região de Maringá- PR de forma que os próprios produtores fossem os atores do processo de solução do problema. Portanto, a metodologia consistiu em ações de Educação Ambiental mediadas pela exposição de uma maquete na Fazendinha do IDR/PR, uma oficina sobre a construção de um sistema modelo BET, além de palestras e reuniões, seguidas pela realização de questionário pós-oficina com os participantes.

O sistema BET – bacia de evapotranspiração, popularmente conhecida como fossa de bananeiras, fossa ecológica ou fossa verde, é uma técnica difundida por permacultores de diversas nacionalidades, que representa uma alternativa sustentável para o tratamento domiciliar de águas cinzas e negras em zonas urbanas e rurais. O modelo é adequado a áreas sem rede coletora, apresenta baixo custo de implantação e índices cientificamente comprovados na redução de patógenos, além de fácil manejo pelos produtores.

É um sistema completo e fechado, que associa a digestão anaeróbica (sem presença de oxigênio) a um canteiro séptico que digere toda a matéria orgânica na zona de raízes

das plantas e produz biomassa viva, inclusive frutos comestíveis. Na sua construção, o reaproveitamento de materiais é uma outra grande vantagem, pois se utiliza de objetos sem valor e sem um destino sustentável, como pneus, palhas de coqueiros, entulhos, restos de obra etc., transformando o que seria considerado “lixo” em matéria-prima.

O modelo de construção do sistema séptico segue as normas da NBR 7229/93, caracterizado pelo seu dimensionamento e com a necessidade de instalação de duas caixas. A primeira caixa é a séptica, construída em alvenaria e dividida em dois compartimentos: um que recebe os dejetos provenientes dos banheiros e vasos sanitários (águas negras) e no segundo compartimento serão retidas as águas cinzas, que serão tratadas da seguinte forma: as águas provenientes da cozinha passarão por uma caixa de gordura e as da lavanderia e do chuveiro passarão por filtro de carvão para absorção do sódio, antes de serem liberadas para a bacia de evapotranspiração. A bacia de evapotranspiração, instalada na sequência da séptica, recebe o material líquido, visto que o sólido fica retido na primeira.

Nesse sistema delimita-se 2m<sup>3</sup> por habitante da residência e, para efeito de cálculo, utilizamos o seguinte exemplo: uma família de 4 pessoas, escava-se 4m x 4m x 1m, totalizando 16 m<sup>3</sup>. Importante salientar que a seleção do local para construção da BET deve ser realizada em local com grande incidência de luz solar (Figura 1).

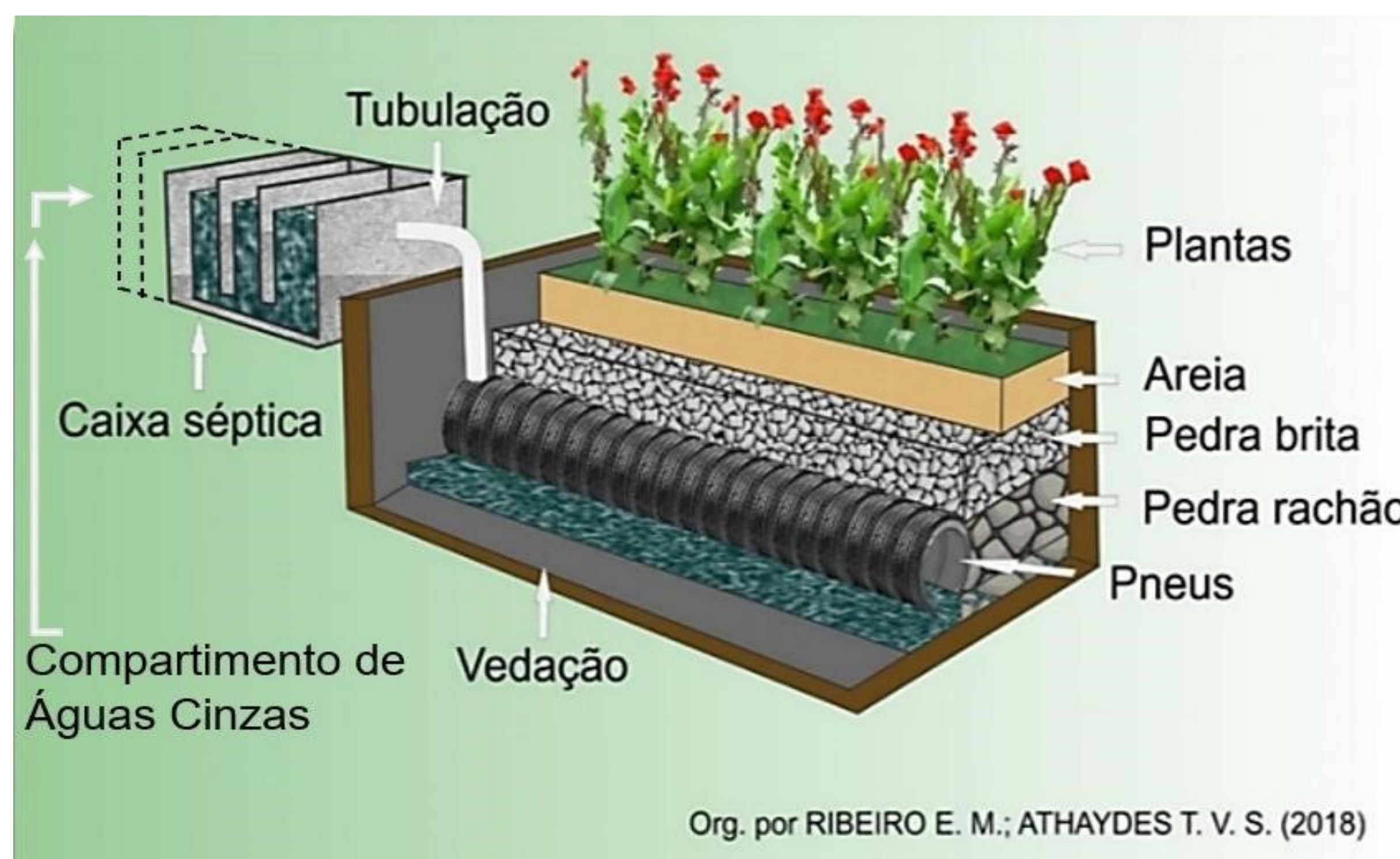


Figura 1. Esquema do sistema de tratamento de esgoto modelo BET.

Na primeira etapa da parceria com técnicos extensionistas do IDR/PR, foi construída uma maquete do sistema e exposta ao público no espaço “Caminhos da Natureza” durante a Expoingá em maio de 2023.

As dimensões da maquete foram: 1,00m comprimento, 1,20m altura e 0,80m de largura, o que corresponde a um sistema para tratar efluentes de uma residência para um morador. “Nesta estação, delimita-se 2m<sup>3</sup>/habitante e para efeito de cálculo, uma família de 4 pessoas, escava-se 4 x 4 x 1m (16 m<sup>3</sup>). Na sequência, impermeabiliza-se com duas camadas de lona plástica 200 micras para impedir a infiltração dos dejetos no solo” (Athaydes & Crispim, 2016, p. 3) (Figura 2).



Figura 2. Maquete do sistema

Os bolsistas mestrandos e doutorandos da UEM (Universidade Estadual de Maringá) apresentaram a maquete e funcionamento do sistema durante todos os dias e horários entre manhã, tarde e noite da exposição, atendendo a autoridades públicas (prefeitos, vereadores, secretários de agricultura e meio ambiente, e a primeira-dama do estado do Paraná), excursionistas estudantes, produtores rurais e ao público em geral (Figura 3).



Figura 3. Apresentação da maquete para estudantes e para a primeira-dama do estado do Paraná.

Foram realizadas ainda duas reuniões com prefeitos, secretários de agricultura e meio ambiente de vários municípios da região para apresentar o modelo e conseguir parcerias para implantação de projetos pilotos do modelo BET em algumas propriedades

rurais. O município de Doutor Camargo-PR comprometeu-se em financiar juntamente com as proprietárias da Chácara Caiana o projeto piloto para realização da oficina de montagem e capacitação dos técnicos para difundirem o modelo a outros produtores.

A etapa seguinte foi a organização da oficina de montagem da unidade piloto no município de Doutor Camargo-PR, realizada na Chácara Caiana, após aplicação de diagnóstico de uso da água na residência. A escavação da fossa séptica foi feita manualmente nas dimensões: (3,00 m) de comprimento, (1,20 m) de largura e (1,50 m) de profundidade; a bacia de evapotranspiração foi feita por máquina retroescavadeira nas dimensões de: (3,00 m) de comprimento (3,00 m) de largura e (1,50 m) de profundidade livre. As camadas de materiais utilizados na bacia foram:

- 50cm de entulho limpo;
- 40cm de brita;
- 30cm de areia grossa;
- 30cm de solo;
- 20 pneus de descarte;
- 20 metros de lona plástica de impermeabilização de 200 micras;
- 20 metros de manta Bidin.

A oficina de montagem contou com a participação de 12 técnicos extensionistas do IDR/PR, 9 alunos de graduação do curso de geografia da Unespar- Campo Mourão, os professores ligados ao programa de pós-graduação da Universidade Estadual de Maringá-UEM e as proprietárias da Chácara Caiana; a duração da oficina foi de 8 horas de trabalho (Figura 4).



Figura 4. Oficina de montagem BET - Doutor Camargo-Pr.

Posteriormente à construção, foi realizado o plantio de quatro bananeiras (*Musa sp*). A escolha dessa planta se deu devido a sua alta taxa de evapotranspiração, que é de 100 l/dia, segundo Santana e Lima (2018), mas podem ser escolhidas outras espécies, desde que absorvam bastante água, tenham folhas largas e raízes pouco profundas.

Após a oficina, foi aplicado um questionário de avaliação de aproveitamento e percepções junto aos técnicos do IDR/PR.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com números oficiais divulgados pela SRM (Sociedade Rural de Maringá), os visitantes cadastrados pelos extensionistas do IDR/PR para as visitas à “Fazendinha” correspondem somente às excursões. Pode-se considerar ainda o público em geral que não foi contabilizado. (Quadro 1).

| <b>Categoria</b>                          | <b>Nº de Excursionistas</b> | <b>Nº de Excursões</b> |
|---|-----------------------------|------------------------|
| Escolares: Ensino Fundamental e Médio     | 6.687                       | 182                    |
| Universitários (Ciências Agrárias)        |                             |                        |
| Produtores Rurais                         | 2.429                       | 80                     |
| Outras categorias (Grupos Terceira Idade) | 4.257                       | 109                    |
| <b>Total</b>                              | <b>13.373</b>               | <b>371</b>             |

Quadro 1. Número de visitantes cadastrados pelo IDR/PR

Como resultado da apresentação da maquete na feira, foi possível atingir um número expressivo de visitas por estudantes dos níveis fundamental, médio, técnico e superior; produtores rurais de vários municípios da região, além da comunidade em geral.

Os visitantes externavam sentimentos diversos durante a visita; as crianças faziam muitas perguntas instigadas pela possibilidade de ter um jardim com plantas aproveitando os restos orgânicos; ao passo que os idosos exaltavam o avanço da tecnologia. Já uma pequena parte do público técnico e de nível superior questionaram o fato de que existem soluções para o saneamento rural, no entanto, há uma morosidade por parte do poder público.

O processo de Educação Ambiental ocorre por meio da construção de valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, que é um bem de uso comum do povo (Rivelli, 2005). Palestras, encontros, feiras e eventos com informações relacionadas à sustentabilidade, ecossistemas ou a qualquer outro componente dos ambientes buscam o desenvolvimento da Educação

Ambiental. Essa divulgação também desperta o interesse da sociedade pela conservação do meio ambiente (Rocha et al., 2002).

Foram realizadas duas reuniões com secretários e prefeitos de municípios da região ainda durante a feira, tendo como resultado a parceria para a implantação da unidade de Doutor Camargo-PR, na Chácara Caiana. A partir da apresentação da maquete na feira, o IDR/PR vem articulando junto a gestão pública e produtores rurais a divulgação e expansão do projeto para outras propriedades.

Todos os participantes contribuíram com a construção da BET, em regime de mutirão, simultaneamente com o treinamento dos técnicos para difundirem o projeto, o que torna esta situação extremamente louvável, porque os envolvidos no processo de construção e das visitas de campo também mostram interesse e responsabilidade pelo novo sistema (Figueiredo et al., 2019).

Durante a oficina de montagem da BET, foi possível analisar o envolvimento de cada ator no desenvolvimento do trabalho, sendo que o engajamento dos técnicos do IDR/PR e dos produtores rurais foi o mais maciço; não houve participação dos representantes da gestão municipal.

Segundo os técnicos, o objetivo do IDR/PR é que, por meio de seus extensionistas, sejam realizadas, além das visitas técnicas nas propriedades, oficinas pontuais em comunidades rurais atendidas, para ampliar o conhecimento da população sobre o tratamento adequado dos efluentes, facilitar a escolha da tecnologia mais adequada à propriedade e difundir informações sobre a implantação dos sistemas e seus benefícios.

Com base na avaliação dos resultados da oficina e questionários aplicados aos técnicos, ao refletir sobre as principais iniciativas de saneamento que contribuem para o desenvolvimento rural, percebe-se que ainda existe uma falta de integração entre as políticas públicas destinadas ao estado do Paraná. Conseqüentemente, as ações encontram-se pulverizadas em diferentes esforços intersetoriais, que abrangem medidas estruturantes de gestão, educação e participação social e/ou por intermédio de medidas estruturais via a implantação de obras e tecnologias.

A fim de exercitar uma participação cidadã efetiva no cenário das políticas públicas, averigua-se que é imprescindível o domínio das bases conceituais e diretrizes metodológicas que fundamentam a participação social. Destaca-se o dilema entre “fazer para” e “fazer com”, baseado na perspectiva pedagógica de Paulo Freire (1996), a qual considera que os saberes culturais são tão primordiais quanto os de origem técnico-científica.



Já a percepção das produtoras rurais que têm a intenção em desenvolver o turismo rural na Chácara Caiana se mostraram agradecidas e estimuladas pela realização do projeto em sua propriedade, relatando que se sentiram “valorizadas e enxergadas pelo poder público”. Tal expressão de sentimento é reflexo da falta de inserção das propriedades rurais na elaboração de políticas públicas, bem como no fato de elas estarem entre as últimas a se beneficiarem das políticas voltadas para preservação ambiental (Arruda, 1999).

A Educação Sanitária e Ambiental contribui para que as comunidades tenham acesso às informações e se apropriem delas para buscar alternativas práticas para superação das situações que as vulnerabilizam (Souza et al., 2015). Assim, a Educação Ambiental, como uma das dimensões do saneamento básico, é uma estratégia importante, que pode contribuir para o empoderamento da comunidade beneficiária quanto aos serviços, estruturas e tecnologias disponibilizadas.

## 4 CONCLUSÕES

Os estudos sobre o sistema BET vêm se mostrando uma alternativa viável de tratamento de esgoto em áreas rurais. Entretanto, monitorar parâmetros desse esgoto, do lodo, do solo e das plantas ao longo do tempo é fundamental para o desenvolvimento científico dessa tecnologia. Podendo-se considerar uma tecnologia social, é necessária a existência de parcerias com produtores rurais, bem como um maior incentivo financeiro por parte do poder público, como apoio à construção da BET, para a ampliação de programas de Educação Ambiental para o saneamento rural e sustentável.

As ações de Educação Ambiental permitiram o envolvimento e a participação da comunidade em todas as etapas do processo, além de indicar mudanças da percepção ambiental dos participantes, que passaram a ter novos comportamentos, servindo principalmente de multiplicadores de ações e informações a outros produtores e técnicos. Portanto, as ações de Educação Ambiental e Sanitária desenvolvidas nesse trabalho contribuíram para o empoderamento dos técnicos do IDR/PR quanto à aplicação da tecnologia BET e da redução dos impactos ambientais negativos na propriedade beneficiada com a implantação do sistema.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado (Processo nº 88887.901226/2023-00), o segundo e o terceiro autor agradecem ao CNPq pela Bolsa de Produtividade (Processo nº. 308093/2023-2).

---

## ENVIRONMENTAL EDUCATION AS A TOOL FOR DISSEMINATION OF THE BET-BASIN EVAPOTRANSPIRATION MODEL

**ABSTRACT:** A large part of the Brazilian population, especially rural communities, still does not have access to services such as sewage treatment. In the absence of collective effluent treatment systems, several technologies can be used, such as the evapotranspiration basin (BET). From this perspective, Environmental Education is a powerful instrument of transformation, through the continuous search for knowledge by the individual. Thus, this article aims to evaluate the effects of Environmental Education actions in partnership with IDR/PR technicians in municipalities in the metropolitan region of Maringá-PR. This is a participatory research, whose methodology consisted of Environmental Education actions mediated by meetings with public managers and rural producers, an exhibition of a model at the Expoingá 2023 agricultural fair, and a workshop on the construction of a BET in the municipality of Doutor Camargo-PR. The actions resulted in changes in the environmental perception of the participants, in addition to presenting an alternative for the treatment of domestic sewage in rural areas and increasing the possibility of building other BETs. Therefore, Environmental Education, linked to Health Education, contributed to the empowerment of producers and the application of the technologies taught. However, it is necessary to invest more in Environmental Education programs for rural sanitation on small properties.

**Keywords:** Health education. Technologies. Rural producers.

---

## REFERÊNCIAS

Arruda, R. (1999). “Populações tradicionais” e a proteção dos recursos naturais em unidades de conservação. *Ambiente & Sociedade*, 1(5), 79-92.

Athaydes, T. V. S. et al. (2019). *Sistemas de tratamento de esgoto no meio rural: uma avaliação de experiências no município de Francisco Beltrão, Iretama e Campo Mourão-PR*.

Bortolon, B., Mendes, M. S. S. (1 tri. 2014). A importância da educação ambiental para o alcance da sustentabilidade. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica*, 5(1), 118-136.

Brandão, C. R. & Borges, M. C. (2007). A pesquisa participante: um momento da educação popular. *Revista de Educação Popular*, 6(1), 51-62.

Brasil. (2015). Fundação Nacional de Saúde. *Manual de saneamento*. 4. ed. Brasília: Funasa.

Carvalho, T. A. (2005). (org.). *Manual do Agente Prevencionista*. Porto Alegre: [s.n.].

Crispim, J. de Q., Athaydes, T. V. S., Candiotoo, L. Z. P., Villwock, F. H., Malysz, S. T. & Rocha, J. A. da. (2019). *Sistema de Tratamento de Esgoto modelo Bacia de Evapotranspiração (BET)*. Unespar. Recuperado de <https://campomourao.unespar.edu.br/editora/documentos/sistema-de-tratamento-de-esgoto-modelo-bacia-de-evapotranspiracao-bet>.

Figueiredo, I. C. S., Barbosa, A. C., Miyazaki, C. K., Schneider, J., Coasaca, R. L., Magalhães, T. M. & Tonetti, A. L. (2019). Bacia de evapotranspiração (BET): uma forma segura e ecológica de tratar o esgoto de vaso sanitário. *Revista DAE*, 67(220), 115-127.

Freire, P. (1996). *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*. 25. ed. São Paulo: Paz e Terra.

Galbiati, A. F. (2009). *Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração*. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande.

Instituto Trata Brasil. (2019). *Saneamento: principais estatísticas do Brasil*. Recuperado de <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>.

Khosravani, M. R. & Reinicke, T. (2020). On the Environmental Impacts of 3D Printing Technology. *Applied Materials Today*, 20, 100689.

Machado, H. S., Salgado, S. P., Delatorre, A. B., Becker, B. R. & Aguiar, C. J. (2020). Estudo sobre o uso de bacia de evapotranspiração como alternativa para tratamento

de efluentes. In 3º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2020, Gramado - RS. *Anais...* Gramado: IBEAS. p. 1-10. Recuperado de <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/XII-008.pdf>.

Mendonça, L. C. & Uchôa de. (2017). *Desenvolvimento territorial: arranjos institucionais e ações públicas efetivadas no território do litoral norte alagoano*.

Pilon, A. F. (2005). Ocupação existencial do mundo: uma proposta ecossistêmica. In A. Philippi Jr., M. C. F. Pelicioni. *Educação Ambiental e Sustentabilidade*. Barueri: Manole.

Rezende, D. C. V. (2019). Tanque de Evapotranspiração no tratamento de esgoto sanitário em comunidades rurais. 2019. Dissertação (Mestrado em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado) - Instituto Federal Goiano, Urutaí.

Rivelli, E. A. L. (2002). Evolução da legislação ambiental no Brasil: políticas de meio ambiente, educação ambiental e desenvolvimento urbano. In Pedrini, A. de G. (Org.). *O contrato social da ciência: unindo saberes na Educação Ambiental*. Petrópolis: Vozes, 2002.

Souza, C. M. N., Costa, A. M., Moraes, L. R. S. & Freitas, C. M. (2015). *Saneamento: promoção da saúde, qualidade de vida e sustentabilidade ambiental*. 1ª ed. Rio de Janeiro: FIOCRUZ.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# ANÁLISE NUTRICIONAL E AMBIENTAL DO LODO DE PISCICULTURA: INVESTIGAÇÃO DOS TEORES DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E ÍNDICE DE GERMINAÇÃO

*Liciane Oliveira da Rosa\*, Paula Burin, Amanda Morais Grabin, Isadora Raseira Silveira, Gabriel Afonso Martins, Luciara Bilhalva Corrêa, Érico Kunde Corrêa, Álvaro Renato Guerra Dias*

---

Universidade Federal de Pelotas, 96010-610, Pelotas, Brasil.  
\*E-mail: [licianecienciasambientais@gmail.com](mailto:licianecienciasambientais@gmail.com)

# RESUMO

Este estudo visou caracterizar o lodo gerado pela criação de tilápias em um sistema de piscicultura localizado em Curitiba, Paraná, Brasil, focando em suas propriedades nutricionais e potenciais efeitos fitotóxicos para fins de aplicação na agricultura. A amostragem do lodo foi realizada em quatro quadrantes do tanque de criação (Q1, Q2, Q3 e Q4), onde foram analisadas as concentrações de nitrogênio total *Kjeldahl* e fósforo total, nutrientes importantes para a fertilidade do solo. O teor de nitrogênio variou entre os quadrantes, com o maior valor em Q3, sugerindo variabilidade no acúmulo de nutrientes ao longo do tanque. Além disso, foram conduzidos testes de fitotoxicidade por meio do Índice de Germinação (IG) com sementes de alface (*Lactuca sativa*) para avaliar a viabilidade de uso do lodo como fertilizante natural. Os resultados mostraram que o lodo dos quadrantes Q3 e Q4 não apresentou efeito tóxico significativo sobre as sementes de alface, resultando em altos valores de IG, enquanto o lodo de Q1 e Q2 reduziu a germinação, indicando possível toxicidade. Esses achados sugerem a necessidade de uma avaliação detalhada da variabilidade dos componentes do lodo em diferentes pontos de coleta antes de seu uso agrícola, visando garantir sua segurança e eficácia como fertilizante natural.

**Palavras-chave:** Fitotoxicidade. Nutrientes para fertilização. Teores nutricionais.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A piscicultura, também conhecida como aquicultura de peixes, é uma prática essencial na produção de alimentos e na conservação dos recursos naturais (Diwan et al., 2021). Com o aumento da demanda por proteína animal e a pressão sobre os estoques dos pesqueiros naturais, a piscicultura desempenha um papel crucial na garantia da segurança alimentar global. Esta atividade envolve a criação controlada de peixes em ambientes aquáticos, como tanques e lagos utilizando técnicas modernas de manejo e tecnologia para maximizar a produção e minimizar os impactos ambientais (Asche et al., 2022).

No contexto da piscicultura, a tilápia é uma espécie de destaque devido à sua adaptabilidade, rápido crescimento e alta taxa de reprodução. A criação de tilápia é amplamente praticada em diversos países devido à sua capacidade de se reproduzir em cativeiro em condições controladas (Mengistu et al., 2020). A reprodução da tilápia

em cativeiro é geralmente realizada em tanques de reprodução, onde as condições ambientais, como temperatura e luminosidade, são cuidadosamente controladas para estimular o processo de reprodução. Durante a reprodução, os peixes são alimentados com dietas específicas para promover a produção de ovos e espermatozoides saudáveis (Ng et al., 2011).

Após a reprodução, os ovos fertilizados são transferidos para incubadoras onde são mantidos em condições ideais de temperatura e oxigenação até a eclosão. Os alevinos recém-nascidos são então transferidos para tanques de crescimento, onde recebem alimentação adequada e são monitorados de perto para garantir um desenvolvimento saudável (Valente et al., 2013). No entanto, atividade de piscicultura pode gerar uma quantidade significativa de lodo como subproduto, especialmente em sistemas intensivos de produção. Este lodo é composto principalmente por excrementos de peixes, restos de ração não consumida e outros detritos orgânicos (Madariaga, Maríán et al., 2017).

No Brasil, a Instrução Normativa 61/2020 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA que trata da classificação de resíduos sólidos divide-os em duas classes principais, A e B. Resíduos sólidos de origem animal, como o lodo de piscicultura, geralmente se enquadram na classe B. Esses resíduos podem incluir materiais orgânicos provenientes da criação de animais ou da produção agrícola (MAPA, 2020).

A disposição inadequada do lodo da piscicultura pode acarretar diversos impactos negativos no solo e na água. Rico em nutrientes orgânicos, como nitrogênio e fósforo, esse lodo pode desequilibrar os ecossistemas terrestres e a vida aquática (Jasmin et al., 2020).

A análise de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, no lodo de piscicultura desempenha um papel vital na gestão ambiental responsável e na sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos e terrestres. O nitrogênio e o fósforo são componentes essenciais para o crescimento das plantas e organismos aquáticos, mas o seu excesso pode ter consequências devastadoras (Brod & Øgaard, 2021).

Em ecossistemas aquáticos, o excesso de nitrogênio e fósforo pode resultar em eutrofização, um processo no qual há um crescimento descontrolado de algas e plantas aquáticas. Esse crescimento excessivo consome o oxigênio dissolvido na água, levando à morte de peixes e outros organismos aquáticos. Além disso, quando essas plantas morrem, seu processo de decomposição consome ainda mais oxigênio, agravando o problema (Howarth & Marino, 2021). A eutrofização também pode causar *blooms* de

algas tóxicas, prejudiciais para a saúde humana e animal, e pode até mesmo resultar na contaminação da água potável (Mishra, 2023).

No solo, o excesso de nitrogênio e fósforo pode levar à perda de biodiversidade microbiana, acidificação do solo e lixiviação de nutrientes para os corpos d'água próximos. Isso pode comprometer a qualidade do solo, reduzindo sua capacidade de sustentar a vegetação natural e cultivada, impactando negativamente a produção agrícola e a saúde dos ecossistemas terrestres (Leff et al., 2015). Portanto, a análise dos níveis de nitrogênio e fósforo no lodo de piscicultura é fundamental para identificar potenciais fontes de poluição e implementar medidas de manejo adequadas. Ao monitorar e controlar esses nutrientes, é possível minimizar o impacto ambiental negativo da piscicultura, garantindo a saúde dos ecossistemas aquáticos e terrestres para as gerações futuras (Lin & Yi, 2003).

Outra análise que avalia o efeito do lodo sobre as plantas e solo é a fitotoxicidade, sendo uma análise que aborda a intoxicação das plantas por substâncias tóxicas presentes no meio de crescimento quando estas substâncias são acumuladas nos tecidos da planta (Mendes et al., 2021). A fitotoxicidade é avaliada, normalmente, usando o índice de germinação e bioensaio. Esses testes são extremamente importantes, pois são eles que determinam a adequação da utilização do lodo produzido em sistemas de piscicultura (Leiva et al., 2019).

Através da fitotoxicidade, é possível identificar o quão tóxico um lodo pode ser ou não para as plantas e solo expostas a ele, assim como para a cultura que se deseja produzir. A espécie de hortaliça mais utilizada em bioensaios é a alface (*Lactuca sativa*), pois tende a obter resultados satisfatórios para os parâmetros de germinação. Ela apresenta resistência à ampla faixa de pH e potencial osmótico, além de ser sensível ao estresse químico (Rios, Perez & Sandoval, 2012). Apesar de não existir uma legislação brasileira específica em relação a níveis de fitotoxicidade, o Órgão Internacional *California Compost Quality Council – CCQC* estipula que os testes com bioensaios vegetais devem obter um índice de germinação acima de 80% para esse produto ser considerado seguro e livre de fitotoxicidade.

O objetivo do trabalho é investigar e analisar a composição do lodo gerado pela criação de tilápia na piscicultura, com foco nas concentrações de nitrogênio, fósforo e nos potenciais efeitos fitotóxicos.



## 2 METODOLOGIA

Para a condução deste estudo, o lodo foi coletado em uma empresa de piscicultura sediada em Curitiba, Paraná, Brasil, especializada na criação de tilápias (*Oreochromis niloticus*). O ciclo produtivo das tilápias abrangeu 120 dias, desde a fase inicial de alevinos até a fase adulta, com peso inicial de 200g e peso final de 950g, sendo alimentadas diariamente. O tanque utilizado para a criação das tilápias possuía uma área de 300 metros quadrados e uma profundidade de 1,5 metros, abrigando aproximadamente 24 mil peixes durante o período de coleta das amostras. As amostras de lodo foram coletadas em diferentes pontos do tanque, representando os quadrantes previamente definidos como Q1, Q2, Q3 e Q4. Essa divisão em quadrantes possibilitou uma avaliação das condições em áreas específicas do tanque.

### 2.1 ANÁLISES NUTRICIONAIS

O nitrogênio total foi determinado pelo método *Kjeldahl*, envolvendo a digestão da amostra com ácido sulfúrico para converter o nitrogênio em amônia, que foi destilada, capturada e quantificada por titulação. O fósforo total foi analisado pelo método colorimétrico, com digestão ácida e formação de um complexo azul, medido em espectrofotômetro para quantificação (Martins et al., 2020).

### 2.2 ANÁLISE TOXICOLÓGICA

Foi executada a extração aquosa das amostras Q1, Q2, Q3 e Q4 sendo 1:10; m/v; com 1 hora de agitação, após houve a filtração da solução aquosa, aplicando 5 ml em placas de Petri com 10 sementes em cada placa de alface (*Lactuca sativa*). As placas foram incubadas por 48 horas a 25 °C, no escuro. Este procedimento foi repetido utilizando apenas água destilada como controle.

Após, foi realizada a medição do comprimento das raízes com o auxílio de um paquímetro. O cálculo do Índice de Germinação foi realizado conforme a Eq. 1 (Mendes et al., 2021).

$$IG\% = (Gm \times Lm) \times 100 / (Gc \times Lc)$$

Onde: IG%: índice de germinação das sementes expressado em percentual;

Gm: número de sementes germinadas na exposição da amostra do composto;

Lm: alongamento das raízes das sementes na exposição da amostra do composto;

Gc: número de sementes germinadas na exposição de água destilada (controle);

Lc: alongamento das raízes das sementes na exposição de água destilada (controle).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas análises nutricionais das amostras coletadas em cada quadrante, os resultados destacam que a amostra do Q3 exibiu o maior teor de fósforo, registrando 0,4%. Os teores de fósforo dos quadrantes Q1, Q2 e Q4 foram similares, registrando 0,25%, 0,23% e 0,24%, respectivamente. Estes resultados são apresentados na Figura 1.

Esse resultado pode ser explicado por diversos fatores. Um deles pode estar relacionado à alimentação dos peixes. Se os peixes do Q3 receberam uma quantidade maior de alimento, isso pode resultar em um maior teor de fósforo nesse quadrante. Outro fator é a densidade dos peixes, que pode influenciar o teor desse nutriente. Uma maior quantidade de peixes no quadrante pode levar a uma maior excreção de resíduos contendo fósforo, acumulando mais no lodo (Puigagut et al., 2011).

O fósforo presente no lodo da piscicultura, quando em concentrações baixas, pode oferecer vários benefícios, como fertilizante natural, melhoria na matéria orgânica e na estrutura do solo. De acordo com Xie et al. (2023), o fósforo restante no lodo de esgoto representa cerca de 25% dessa demanda, mas apenas uma pequena porcentagem é efetivamente reciclada. O lodo de esgoto contém fósforo na forma orgânica e mineral, podendo ser aplicado no solo como fertilizante e agente de correção, desde que tratado.

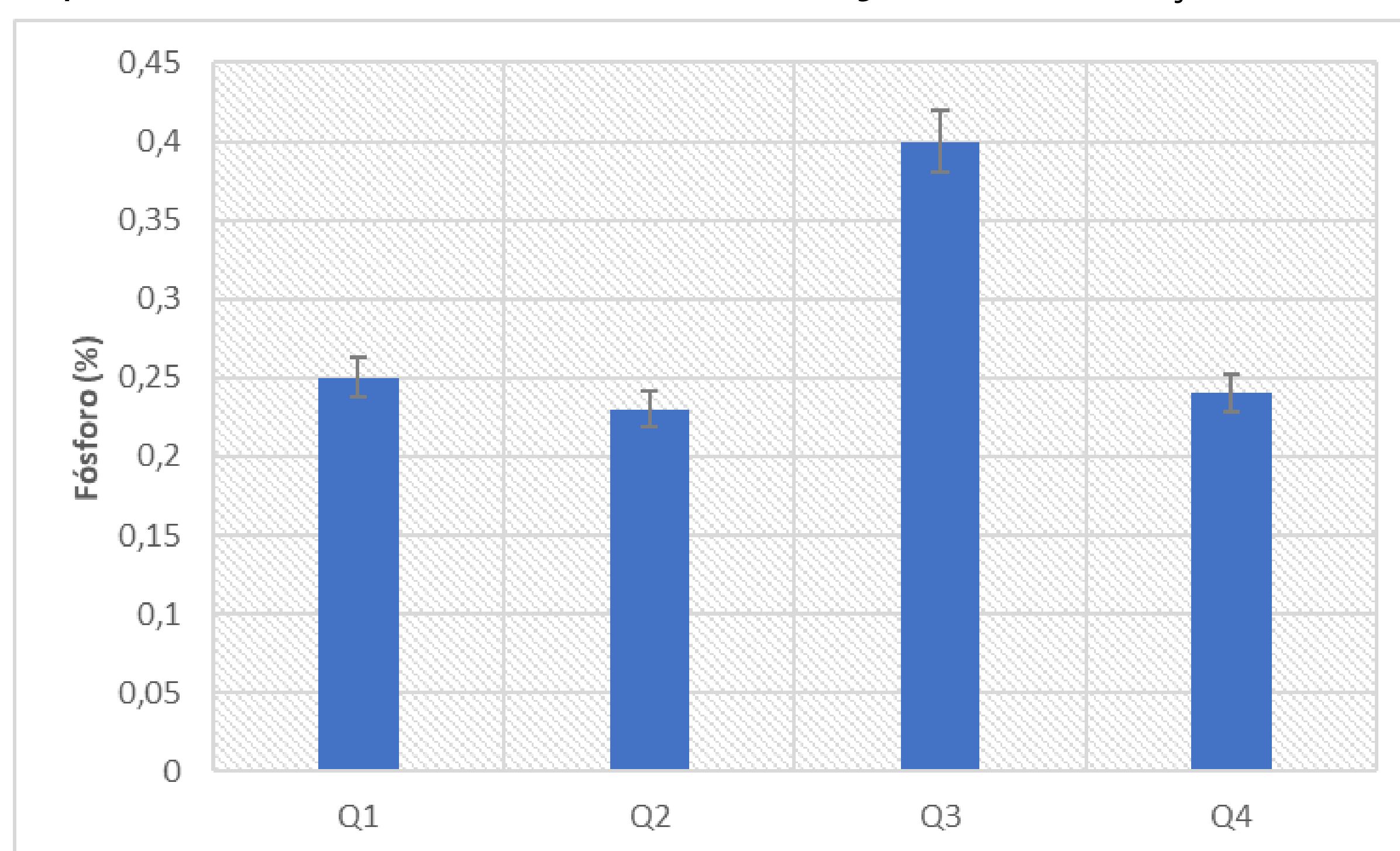


Figura 1. Teores de fósforo (%) no lodo de piscicultura

A aplicação direta de lodo em terras agrícolas é a opção mais eficiente quanto ao uso de energia e às emissões de gases de efeito estufa. A reutilização do fósforo (P) presente no lodo de esgoto em terras agrícolas é uma prática sustentável que pode atender a uma parte significativa da demanda de fósforo na agricultura (Xie et al., 2023). Dessa forma, o uso do fósforo do lodo não só oferece uma solução para a gestão de resíduos de piscicultura, mas também promove práticas agrícolas mais sustentáveis (Xie et al., 2023)

Na Figura 2, observa-se os resultados para o NTK. De acordo com a figura, o quadrante Q3 apresentou o maior teor de nitrogênio, com 4,57%, seguido pelo quadrante Q1, que se estabilizou em 4,4%.

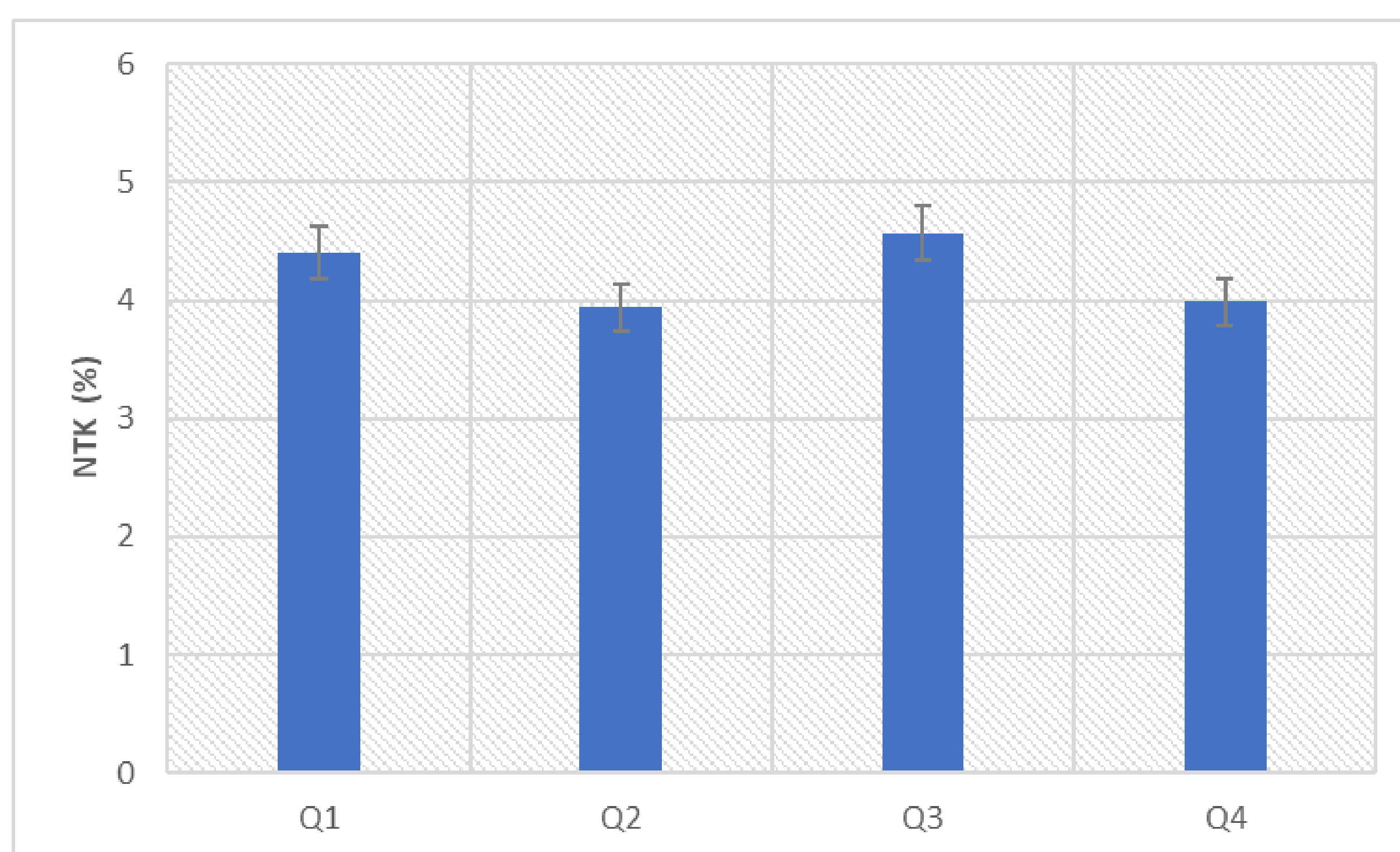


Figura 2. Teores de NTK (%) no lodo de piscicultura.

De acordo com o estudo de Lazzari et al. (2008), a variância dos teores de nitrogênio nos quadrantes Q1 e Q3 do lodo de piscicultura pode ser explicada por diversos fatores, como a distribuição de resíduos, a circulação da água, a localização de fontes de alimentação e as características do substrato. Esses elementos influenciam diretamente a concentração de nitrogênio proveniente do lodo.

A composição do lodo inclui cerca de 60% de nitrogênio orgânico e 40% de nitrogênio mineral, indicando seu potencial substancial para aumentar a produtividade agrícola. As principais medidas a serem tomadas, visando garantir uma aplicação segura, incluem a redução de patógenos e o monitoramento de metais pesados (Alvarenga et al., 2015).

As descobertas destacam o potencial dessa abordagem integrada para contribuir com práticas agrícolas sustentáveis, reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos e melhorando a eficiência do uso do lodo (Skrzypczak et al., 2024).

O uso de lodo de piscicultura na agricultura, principalmente por seu teor de nitrogênio e fósforo, requer consideração cuidadosa das implicações ambientais e de segurança. As principais medidas incluem a redução de patógenos e o monitoramento de metais pesados para garantir a aplicação segura do lodo (Brod et al., 2017). A análise do lodo de piscicultura revelou que o quadrante 3 apresentou os maiores teores para o fósforo com 0,4% e nitrogênio total com 4,57%.

Segundo a Resolução CONAMA n° 375/2006, que regulamenta o uso seguro do lodo de esgoto em áreas agrícolas no Brasil, não há limites específicos estabelecidos para os teores de fósforo e nitrogênio no lodo de piscicultura. No entanto, a legislação enfatiza a importância de prevenir a contaminação do solo e da água, destacando a necessidade de avaliar a dosagem e a potencial acumulação de nutrientes no solo, garantindo assim a conformidade com as diretrizes vigentes (CONAMA, 2006).

### 3.1 ÍNDICE DE GERMINAÇÃO

Na Figura 3, o quadrante Q3 obteve IG de 99,02% para a semente de alface (*Lactuca sativa*) seguido do Q4 com 91,83%. No entanto, pode-se observar que os quadrantes 1 e 2 apresentaram fitotoxicidade, apresentando valores de 50,32% e 30,31%, respectivamente.

Segundo De Moraes et al. (2020), que usou a mesma semente de *L. sativa* para analisar o lodo de curtume não tratado e compostado, não foram detectados efeitos significativos do lodo compostado (sólido e solubilizado) na germinação das sementes (>80%). Isso sugere que o composto não tem efeito fitotóxico na germinação, contudo, a germinação das sementes diminuiu após o uso de amostras sólidas do lodo não tratado, demonstrando seu efeito fitotóxico sobre *L. sativa*.

Comparando com o IG do lodo de piscicultura, pode-se avaliar que para *L. sativa* obteve o mesmo resultado de maior taxa (80%) no Q3 e Q4, indicando ausência de toxicidade. Contudo, para Q1 e Q2 houve uma alta toxicidade apresentando IG de 50,32% e 30,31%, respectivamente, o que indica que a germinação foi inibida de forma significativa, apontando um possível efeito tóxico desses compostos sobre *L. sativa*. A fitotoxicidade pode estar associada à presença de compostos específicos ou condições químicas e biológicas adversas no resíduo, como acúmulo de metais pesados, compostos fenólicos, ou alta concentração de sais, que podem inibir a germinação das sementes.

No estudo de De Moraes et al. (2020), os autores observaram que o lodo de curtume não tratado apresentou efeito fitotóxico devido aos compostos potencialmente tóxicos para as plantas, o que reduziu a germinação das sementes. Esse comportamento se

assemelha ao observado nos quadrantes Q1 e Q2 para o lodo de piscicultura, sugerindo que características similares de toxicidade possam estar presentes.

Ao comparar os resultados de Q1 e Q2 com os de Q3 e Q4, que apresentaram IG de 99,02% e 91,83%, respectivamente, nota-se que as condições ou características do resíduo nesses quadrantes favoreceram o desenvolvimento das sementes, indicando ausência de toxicidade. Isso sugere uma variação significativa na composição ou nas propriedades dos resíduos entre os quadrantes, que pode ser resultante de diferentes processos de degradação ou estabilização, como a decomposição microbiana, ou até mesmo da heterogeneidade do material aplicado (Mendes et al., 2021). Avaliar mais detalhadamente esses fatores e possíveis compostos tóxicos presentes nos quadrantes Q1 e Q2 pode fornecer uma compreensão mais completa dos elementos responsáveis pela fitotoxicidade observada, ajudando a direcionar futuros tratamentos de compostos ou resíduos para minimizar esses efeitos sobre a germinação de sementes.

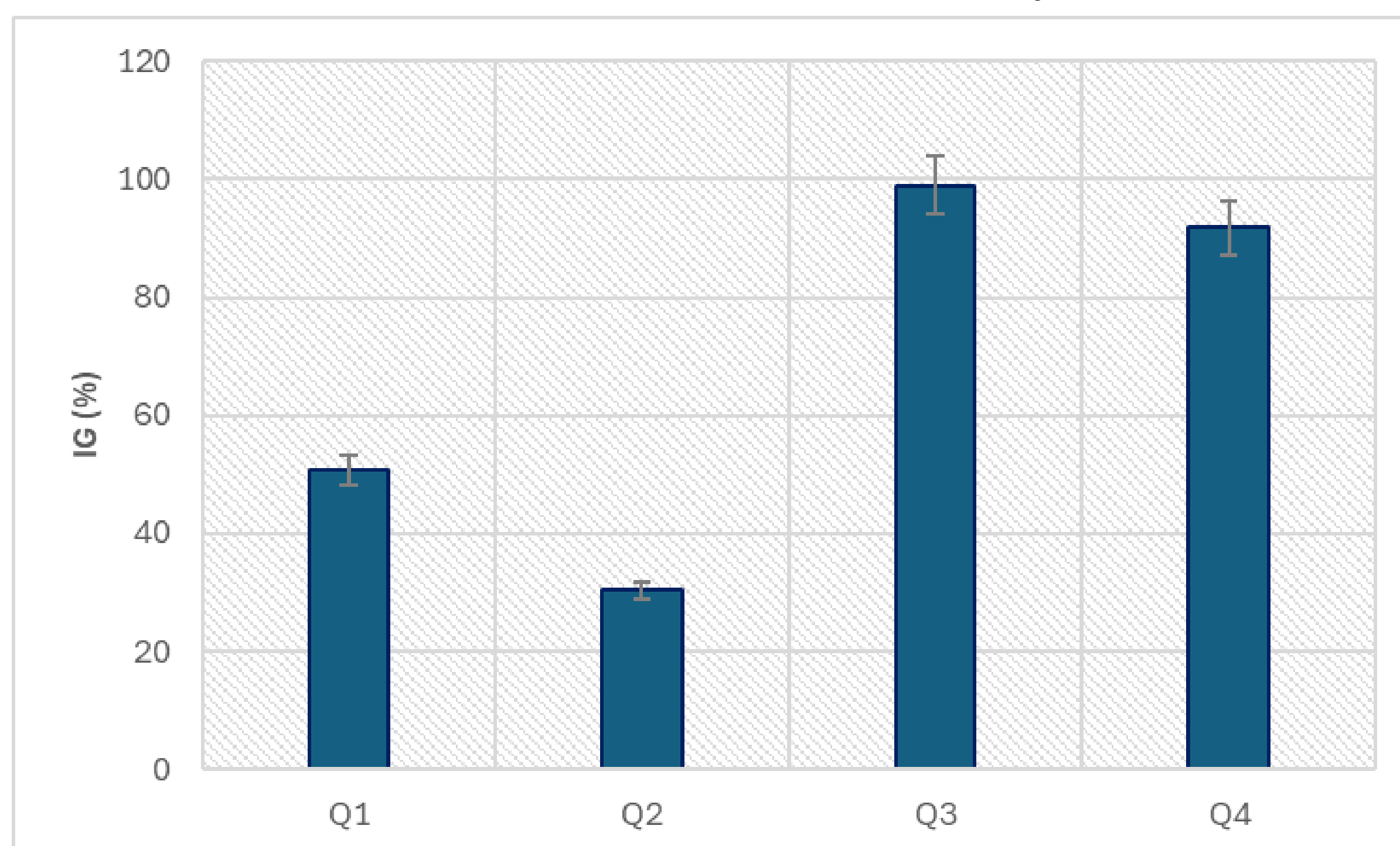


Figura 3. Índice de germinação (%) para semente de alface do lodo de piscicultura

## 4 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, com a composição do lodo gerado, foram analisados o acúmulo de nitrogênio, fósforo e possíveis efeitos fitotóxicos. As análises das amostras indicaram que houve variações significativas com nitrogênio e fósforo, entre os diferentes quadrantes do tanque, com evidência que o quadrante Q3 apresentou os maiores teores desses nutrientes.

A alta concentração de fósforo e nitrogênio no lodo da piscicultura pode causar impactos negativos ao meio ambiente, por exemplo a eutrofização de corpos d'água e a degradação do solo. Ainda assim, esses nutrientes também são fundamentais para o desenvolvimento de plantas, o que evidencia a importância de um controle apropriado para equilibrar a produtividade agrícola e a produção ambiental.

Os resultados das amostras de fitotoxicidade indicaram que, apesar de os quadrantes Q3 e Q4 apresentarem baixos níveis de toxicidade para as sementes de *L. sativa*, os quadrantes Q1 e Q2 mostraram indício de fitotoxicidade. Isso indica a necessidade de monitoramento contínuo e a aplicação de tratamentos específicos para induzir os efeitos adversos do lodo em diferentes áreas de tanque de criação.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ pelo apoio aos pesquisadores.

---

## NUTRITIONAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF FISH FARM SLUDGE: INVESTIGATION OF NITROGEN AND PHOSPHORUS CONTENT AND GERMINATION INDEX

**ABSTRACT:** This study aimed to characterize the sludge generated by tilapia farming in a fish farming system located in Curitiba, Paraná, Brazil, focusing on its nutritional properties and potential phytotoxic effects for application in agriculture. The sludge was sampled in four quadrants of the rearing pond (Q1, Q2, Q3 and Q4), where the concentrations of total Kjeldahl nitrogen and total phosphorus, important nutrients for soil fertility, were analyzed. The nitrogen content varied between the quadrants, with the highest value observed in Q3 (4.57%), while the phosphorus content was up to 0.4%, also higher in Q3, suggesting variability in the accumulation of nutrients throughout the tank. In addition, phytotoxicity tests were conducted using the Germination Index (GI) with lettuce (*Lactuca sativa*) and cucumber (*Cucumis sativus*) seeds to assess the feasibility of using the sludge as a natural fertilizer. The results showed that the sludge from quadrants Q3 and Q4 had no significant toxic effect on lettuce seeds, resulting in

high GI values, while the sludge from Q1 and Q2 reduced germination, indicating possible toxicity. These findings suggest the need for a detailed assessment of the variability of sludge components at different collection points before its agricultural use, in order to guarantee its safety and effectiveness as a natural fertilizer.

**Keywords:** Phytotoxicity. Nutrients for fertilization. Nutrients contents.

---

## REFERÊNCIAS

Alvarenga, P. et al. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits *versus* limiting factors. *Waste Management*, 40, 44–52.

Asche, F. et al. (2022). Aquaculture: Externalities and policy options. *Review of Environmental Economics and Policy*, 16, 282–305.

Brod, E. & Øgaard, A. F. (2021). Closing global P cycles: the effect of dewatered fish sludge and manure solids as P fertiliser. *Waste Management*, 135, 190–198.

Diwan, A. D. et al. (2022). Aquaculture Industry Prospective from Gut Microbiome of Fish and Shellfish: An Overview. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 106, 441–469.

Howarth, R. W. & Marino, R. (2006). Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. *Limnology and Oceanography*, 51, 64–376.

Jasmin, M. Y. et al. (2020). Potential of bioremediation in treating aquaculture sludge: Review article. *Aquaculture*, 519, 734905.

Lazzari, R. & Baldisserotto, B. (2008). Excreção de nitrogênio e fósforo em pisciculturas. *Boletim do Instituto de Pesca*, 34, 591–600.

Leiva, A. M. et al. (2019). Evaluation of phytotoxicity of effluents from activated sludge and constructed wetland system for wastewater reuse. *Water Science and Technology*, 79, 656–667.

Leff, J. W. et al. (2015). Consistent responses of soil microbial communities to elevated nutrient inputs in grasslands across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 10967–10972.

Madariaga, S. T. & Marín, S. L. (2017). Sanitary and Environmental Conditions of Aquaculture Sludge. *Aquaculture Research*, 48, 1744–1750.

Martins, G. A. et al. (2022). Toxicity and physicochemical parameters of composts including distinct residues from agribusiness and slaughterhouse sludge. *Waste Management*, 138, 75–82.

Mendes, P. M. et al. (2021). Phytotoxicity test in check: Proposition of methodology for comparison of different method adaptations usually used worldwide. *Journal of Environmental Management*, 291, 112698.

Mengistu, S. B. et al. (2020). A Systematic Literature Review of the Major Factors Causing Yield Gap by Affecting Growth, Feed Conversion Ratio and Survival in Nile Tilapia (*Oreochromis Niloticus*). *Reviews in Aquaculture*, 12, 524–541.

Mishra, R. K. (2023). The Effect of Eutrophication on Drinking Water. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4, 7–20.

Moraes Cunha Gonçalves, M. de et al. (2020). Phytotoxicity and cytogenotoxicity of composted tannery sludge. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 34495–34502.

Ng, W.-K. & Wang, Y. (2011). Inclusion of crude palm oil in the broodstock diets of female Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, resulted in enhanced reproductive performance compared to broodfish fed diets with added fish oil or linseed oil. *Aquaculture*, 314, 122–131.

Puigagut, J. et al. (2011). Decreasing phosphorus discharge in fish farm ponds by treating the sludge generated with sludge drying beds. *Aquaculture*, 318, 7–14.

Ríos, D. et al. (2012). Phytotoxic effect of paper pulp sludge on Alfisol soil. *Journal of soil science and plant nutrition*, 12, 315–327.

Skrzypczak, D. et al. (2024). Guidelines for efficient nitrogen preservation in sewage sludge-based fertilizers. *Science of The Total Environment*, 947, 174460.

Valente, L. M. P. et al. (2013). What Determines Growth Potential and Juvenile Quality of Farmed Fish Species? *Reviews in Aquaculture*, 5, S168–93.





IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# CULTIVO DE MICROALGAS EM *RACEWAY* *PONDS*: UMA ABORDAGEM PROMISSORA PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA

*Giséle Alves<sup>1\*</sup>, Edina Franceschet<sup>2</sup>, Dariane Severgnini<sup>2</sup>, Michele Hoelt<sup>1</sup>, Valéria Louzada Leal Buzke<sup>1</sup>, Adriana Dupont<sup>1</sup>, Tiele Medianeira Rizzetti<sup>1</sup>, Rosana de Cassia Souza Schneider<sup>1</sup>*

---

1 Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Av. Independência, 2293 - Universitário, Santa Cruz do Sul - RS, Brasil. 96815-900.

2 Curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Av. Independência, 2293 - Universitário, Santa Cruz do Sul - RS, Brasil. 96815-900.

\*E-mail: giselea@mx2unisc.br

# RESUMO

O cultivo de microalgas pode ser realizado em diferentes sistemas, cada um com características específicas. Um exemplo é o cultivo em sistemas abertos, como os *raceway ponds*. O cultivo de microalgas em *raceway ponds* é uma técnica amplamente utilizada para a produção de biomassa em larga escala devido à sua simplicidade e baixo custo operacional. A microalga *Chlorella* sp. é amplamente reconhecida por seu elevado potencial biotecnológico, destacando-se pela produção de biomassa rica em proteínas e lipídios, além de aplicações em biocombustíveis e suplementos alimentares. Este estudo teve como objetivo avaliar a produção de biomassa de *Chlorella* sp. em meio mineral utilizando sistemas de cultivo tipo *raceway pond* piloto de simples confecção. Foram analisados parâmetros físico-químicos do cultivo, taxa de crescimento e composição da biomassa, incluindo proteínas, lipídios e cinzas. O sistema permitiu o aumento progressivo da biomassa, atingindo produtividade de  $1,039 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  no terceiro ciclo de cultivo. A biomassa apresentou 46,3 a 50,1% de proteínas e 15 a 18,3% de lipídios, o que a torna promissora para a indústria alimentícia, bioinsumos e para ração animal. A pesquisa reforça o potencial da *Chlorella* sp. para aplicações sustentáveis em diferentes setores industriais, contribuindo para a diversificação de recursos e a sustentabilidade ambiental.

**Palavras-chave:** *Chlorella* sp.. *Raceway pond*. Biomassa. Proteínas. Lipídios. Biotecnologia.

---

## 1 INTRODUÇÃO

As microalgas desempenham um papel fundamental no meio ambiente, contribuindo significativamente para a remediação de nutrientes em águas residuais e superficiais, além de serem uma fonte de biomassa de elevado valor agregado (De Souza et al., 2019). A produção de biomassa de microalgas em larga escala tem ganhado destaque como uma solução inovadora e sustentável para atender à crescente demanda por recursos renováveis. Para alcançar uma boa produtividade, é essencial monitorar fatores de crescimento, como aeração, composição do meio de cultivo, iluminação, pH e temperatura (Kumar et al., 2015).

O cultivo de microalgas pode ser realizado em diferentes sistemas, cada um com características específicas (Razzak et al., 2023). Um exemplo é o cultivo em sistemas

abertos, como os *raceway ponds*, que consistem em tanques com circulação contínua (Razzak et al., 2017). Os *raceway ponds* são sistemas amplamente utilizados para o cultivo de microalgas, caracterizados por tanques rasos em formato de circuito fechado, geralmente retangulares, com circulação contínua (Kumar et al., 2015). Esses sistemas permitem o controle parcial de fatores ambientais, como aeração e movimentação do meio, maximizando a exposição das microalgas à luz solar e evitando a sedimentação (Kumar et al., 2017). Além de serem uma opção economicamente viável para produção em larga escala, os *raceway ponds* destacam-se pela simplicidade de operação e pelo baixo custo de construção, tornando-se adequados para aplicações como o tratamento de efluentes e a produção de biomassa para biocombustíveis e suplementos alimentares (Matos et al., 2018).

A microalga *Chlorella* destaca-se por suas características biotecnológicas e pelo crescente interesse na produção de biocombustíveis e produtos de alto valor agregado. Cultivada desde os anos 1960 para suplementos alimentares e rações para animais, a *Chlorella* acumula lipídios e amidos sob condições específicas, tornando-se uma matéria-prima promissora para biodiesel e bioetanol (Dragone, 2022). Além disso, essa microalga apresenta aplicações na remediação ambiental, removendo nutrientes como nitrogênio e fósforo de efluentes industriais e municipais, contribuindo para a sustentabilidade do cultivo e o reaproveitamento de resíduos (Kumaran et al., 2023). A *Chlorella* também se destaca pelo elevado teor de proteínas, que são componentes nutricionais importantes tanto para consumo humano quanto para aplicações industriais. Essas proteínas possuem grande valor na aquicultura e em suplementos alimentares devido ao seu alto valor nutricional (Zhang et al., 2016).

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar a produção de biomassa da microalga *Chlorella* sp. em meio mineral utilizando um sistema de cultivo em lagoa de circuito aberto, mas com uma configuração mais simples do que aquela preconizada para este tipo de sistema e em escala piloto. Além da taxa de crescimento e produtividade da microalga, o estudo buscou analisar a composição da biomassa, incluindo proteínas e lipídios, contribuindo para o avanço do conhecimento científico no cultivo de *Chlorella* sp. em tanques de circulação abertos, com foco em suas diversas possíveis aplicações industriais e biotecnológicas.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 MATERIAIS

Os experimentos iniciais foram realizados no Parque Científico e Tecnológico Regional da UNISC – TecnoUnisc, localizado no Bloco 55 na Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), após transferidos para a área externa do bloco (maior escala). A linhagem da microalga *Chlorella* sp. foi isolada no Laboratório da Universidade Federal do Ceará – Ceará, Brasil (ABE96B4-UFC). Para o cultivo, essa linhagem foi mantida utilizando fertilizante mineral (NPK 12:11:18) como meio de crescimento. A renovação do inóculo da linhagem ocorria a cada 7 dias, sendo ajustado com 80% de meio de cultivo. No processo de produção, o inóculo era exposto apenas à luz artificial de lâmpadas LED ( $148 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), sob aeração artificial provida por mini compressores de ar ( $180 \text{ L s}^{-1}$ , modelo Boyu Sc7500).

A microalga *Chlorella* sp. foi transferida para maior escala de bancada, em fotobiorreatores de 5x6 L, utilizando 20% de inóculo, 80% de meio de cultivo, obtendo ao final de sete dias de cultivo 30L de inóculo. Estes cultivos foram realizados utilizando fertilizante mineral NPK ( $0,5 \text{ g L}^{-1}$ ) como meio de crescimento. Os cultivos foram realizados em sala climatizada a  $23^\circ\text{C}$ , sob luz artificial de lâmpadas LED e aeração artificial provida por mini compressores de ar. Após alcançar uma densidade celular de  $2,0 \times 10^5 \text{ mL}$ , a microalga foi transferida para o tanque *raceway pond*.

O tanque *raceway pond* utilizado nesta pesquisa, conforme ilustrado na Figura 1, foi construído em fibra de vidro (Bakof Tec), com dimensões de 1,60 metros de comprimento, 1,90 metros de largura e 40 centímetros de profundidade (capacidade total de 1.000 L). Sua configuração oval permite uma circulação mais eficiente e uniforme da água, favorecendo o crescimento homogêneo das microalgas ao longo do tanque.

A temperatura e a luminosidade foram monitoradas por meio de um dispositivo de registro de dados (*HOBO Pendant® UA-002-64*). O bombeamento do cultivo foi realizado com uma bomba de água periférica (*IDB-50 Premium 1CV, 3000 L/h, Bivolt-Ferrari*), acoplada a um sistema Venturi em dois pontos dentro do tanque, promovendo a distribuição homogênea dos nutrientes, aeração eficiente e evitando a sedimentação do cultivo. Os cultivos foram centrifugados em centrífuga (*SCO 200/F JDF, 1200 l/h*) de alta velocidade. A biomassa foi seca em estufa (*Solab SL-100/42*) a  $50^\circ\text{C}$  por 72h. A biomassa foi moída em moinho de facas (*MOINHO TIPO WILLYE, TE - 680*) e mantida em dessecador para posterior caracterização.

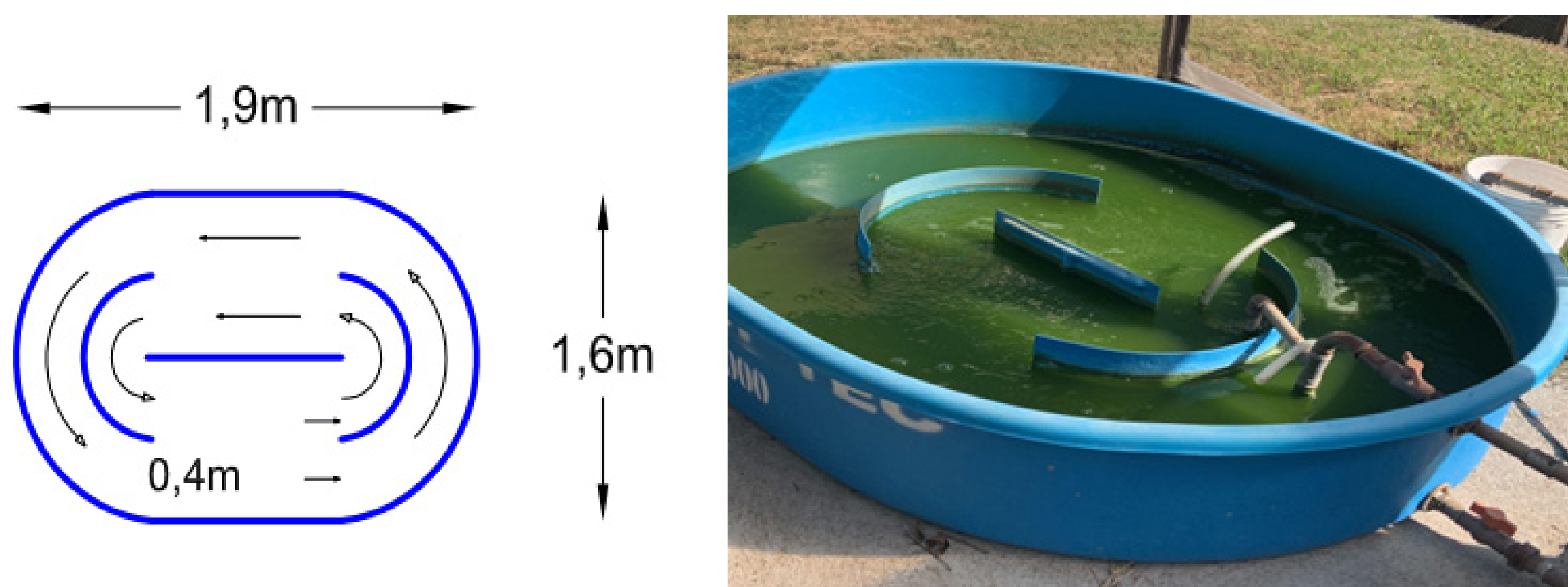


Figura 1. Tanque *raceway pond*, construído com fibra de vidro com dimensões de 1,90 metros de comprimento, 1,60 metros de largura e 0,4 metros de profundidade

## 2.2 CULTIVO DA MICROALGA *CHLORELLA* SP. EM TANQUE *RACEWAY POND*

O cultivo em *raceway pond* se deu utilizando 10% inóculo (30 L) e 90% meio de cultivo (270 L) em concentração de  $0,5 \text{ g L}^{-1}$ , totalizando 300 L de produção (lâmina d'água de 15cm). A água utilizada para o cultivo foi proveniente do poço artesiano do *campus* (UNISC), sendo necessário reduzir o seu pH para 7 (ácido fosfórico 10%) para melhor adaptação da microalga *Chlorella* sp. Após 60 dias de cultivo e a densidade óptica atingir 1.000 nm, foi realizada a primeira centrifugação para obtenção de biomassa. Um novo cultivo foi iniciado deixando 20% do inóculo anterior e adicionando 80% de meio de cultivo ( $0,5 \text{ g L}^{-1}$ ), mantendo uma altura de lâmina d'água de 15 cm, repetindo o ciclo por mais duas vezes a cada 15 dias. A biomassa gerada nas centrifugações foi direcionada para o processo de secagem em estufa a  $50^\circ\text{C}$  por um período de 72 h, pesadas para determinação de produtividade e moída para análises de Lipídios, Proteínas e Cinzas. A cada 48 horas, os cultivos foram monitorados utilizando diferentes parâmetros: densidade óptica (OD) foi avaliada através de um espectrofotômetro UV/Vis ChromTech UV-1100, a densidade celular (CellD) foi determinada por contagem direta de células na Câmara de Neubauer, leitura dos parâmetros físico-químicos com uma sonda multiparâmetros (HANNA® Instruments, HI98194), e a produtividade em biomassa seca ( $\text{g L}^{-1}$ ) foi medida conforme indicado por Lu, Yang, Zhu & Pan (2017).

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

A extração de lipídios foi realizada através de uma adaptação do Método de Bligh e Dyer (1959) descrito por Souza et al. (2017). Para a análise do perfil lipídico, utilizou-se cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC/MS, 5977B, Agilent, EUA) e cromatografia gasosa com detector de ionização em chama (GC/FID, QP2010plus,

Shimadzu, Japão) para fins de quantificação. A quantificação das proteínas totais pode ser conduzida pela avaliação do nitrogênio total (NT), sendo possível determinar o conteúdo de proteína bruta com base em fatores de conversão de nitrogênio. Para microalgas, é recomendável empregar a média geral do fator N-Prot de 4,78 para calcular a concentração de proteína total a partir do teor de nitrogênio, conforme descrito por Martini et al. (2019), Templeton e Laurens (2015). O conteúdo em cinzas nesse procedimento foi determinado por sólidos totais e a (%) foi calculada em relação à biomassa seca (De Souza et al., 2020).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 AVALIAÇÕES DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA MICROALGA EM RACEWAY POND

Os parâmetros físico-químicos dos cultivos estão listados na tabela 1. Qiu et al. (2017) destaca que a faixa de pH ideal para a produção de biomassa pode variar entre diferentes variedades de microalgas. O pH é uma condição crítica no cultivo, pois influencia a solubilidade e disponibilidade de CO<sub>2</sub> e nutrientes no meio. Durante o cultivo, o pH pode aumentar ao longo do dia devido à absorção de carbono inorgânico pelas microalgas. Entretanto, um pH mais elevado pode limitar o crescimento e favorecer a retenção de contaminantes biológicos indesejados. Portanto, é crucial monitorar e controlar cuidadosamente o pH para garantir o sucesso do cultivo (Qiu et al., 2017; Razzak et al., 2023).

No estudo de Huesemann et al. (2018), foi investigada a influência do pH nos cultivos de *Chlorella sorokiniana*, em tanque *raceway pond* com ênfase na taxa de crescimento específico. Os resultados indicaram uma diminuição contínua da taxa máxima média de crescimento específico a 36 °C com o aumento do pH. A taxa máxima de crescimento específico foi mais alta em pH 6 do que em 7, conforme observado anteriormente por Morita, Watanabe e Saiki (2000) e, mesmo assim, *C. sorokiniana* demonstrou capacidade de crescimento em pH 3 e 9.

A tolerância desta espécie a variações amplas de pH (pelo menos de pH 3 a pH 9) foi destacada, sem prejudicar significativamente o crescimento. A comparação com *Chlorella vulgaris* revelou diferenças nas respostas ao pH, com *C. sorokiniana* apresentando um ótimo crescimento em pH 6, enquanto *C. vulgaris* preferiu pH 7,5. Esses resultados ressaltam a importância da compreensão da resposta de diferentes espécies de *Chlorella* ao pH, sendo essencial considerar esses fatores para otimizar o crescimento sob condições simuladas pelo clima (Huesemann et al., 2018).

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos durante o crescimento da microalga

| CULTIVOS           |                       |                       |                       |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parâmetros         | <i>Raceway pond</i> 1 | <i>Raceway pond</i> 2 | <i>Raceway pond</i> 3 |
| pH                 | 6,23 ± 0,9            | 9,04 ± 0,6            | 8,92 ± 0,6            |
| Temperatura (C°)   | 28 ± 4,9              | 22,3 ± 2,7            | 23,9 ± 2,7            |
| Luminosidade (LUX) | 2748,1                | 2480,1                | 2676,2                |

A profundidade das lagoas tipo *raceway pond* desempenha um papel crucial na quantidade de luz disponível e na frequência com que as células de algas são expostas à luz ideal. Além disso, a profundidade das lagoas regula o gradiente de temperatura dentro da cultura de algas (Chisti, 2013). Manter *raceway pond* mais rasos pode se tornar benéfico, pois permite a exposição máxima das células de algas à luz. A relação entre a profundidade da lagoa e a penetração de luz desempenha um papel determinante na produção de biomassa (Kumar et al., 2015).

A intensidade da luz representa um dos principais fatores limitantes no cultivo de microalgas, impactando diretamente sua fotossíntese, alterando a composição bioquímica e o rendimento da biomassa (Khan, Shin & Kim, 2018). Além disso, o processo de fotossíntese, alterada por este fator, influencia na conversão de dióxido de carbono pela microalga, alterando a composição orgânica da biomassa, como proteínas. Quando o crescimento das microalgas ocorre sob condições de limitação de luz, as células ativam mecanismos para direcionar a absorção de carbono para aminoácidos e outros compostos (Escalante Palacios & Vizcarra Fuentes, 2019).

O *raceway pond* 1 apresentou a maior intensidade de luz incidente (2748,1 Lux) bem como a maior temperatura (28 C°). Já no *raceway pond* 2, esses dois parâmetros físicos caíram, o que está relacionado às intempéries do clima registrado nos dias de cultivo, com dias de chuva e nebulosidade, voltando a normalizar durante o *raceway pond* 3. Estudo realizado por Daliry et al. (2017) determinaram que as melhores condições para crescimento e produção lipídica da microalga *Chlorella vulgaris* pode ocorrer em um ambiente alcalino em pH 9, intensidade luminosa de 5.000 a 7.000 Lux e temperatura de 30°C, sendo considerada a importância da profundidade da lagoa de pista, 15–50 cm para que a luz possa atingir todo o ambiente de cultivo.

## 3.2 RENDIMENTO DA BIOMASSA DOS CULTIVOS

O rendimento é expresso como a quantidade de biomassa produzida por unidade de volume ou por unidade de área de cultivo (Magro et al., 2018). Após a centrifugação e secagem, a biomassa foi pesada para demonstrar o rendimento de cada etapa de cultivo. No *raceway* 1, a biomassa de microalgas alcançou  $0,112 \text{ g L}^{-1}$ . Esse valor indica que a concentração de microalgas no *raceway* 1 foi relativamente baixa. No *raceway* 2, a biomassa de microalgas atingiu  $0,668 \text{ g L}^{-1}$ , esse valor é consideravelmente maior do que o do *raceway* 1, indicando uma concentração mais elevada de microalgas. Já no *raceway* 3, a biomassa de microalgas atingiu  $1,039 \text{ g L}^{-1}$ , sugerindo que o *raceway* 3 alcançou a maior concentração de microalgas entre os cultivos, possivelmente devido à condição climática mais favorável e a adaptação da espécie ao meio e condições de cultivo.

Segundo o estudo de De Moraes Ricardi (2020), os rendimentos médios da biomassa da *Chlorella* sp. em tanques *raceway pond* pode alcançar a faixa de  $0,5$  a  $3 \text{ g L}^{-1}$  de cultivo ou de  $5$  a  $15 \text{ g m}^{-2}$  de área de cultivo. No entanto, é importante ressaltar que esses valores podem variar dependendo das condições específicas de cultivo e das técnicas utilizadas. Essa medida é útil para avaliar a eficiência de produção da *Chlorella* sp. e estimar a quantidade de biomassa disponível para uso posterior (Magro et al., 2018).

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o *raceway pond* com capacidade de  $300 \text{ L}$  demonstrou a capacidade de aumentar progressivamente a biomassa de *Chlorella* sp. a cada cultivo, sem a necessidade de descartar o meio líquido após a centrifugação. No entanto, é relevante destacar que esses valores podem variar de acordo com as condições específicas de cultivo e o objetivo final do processo (Najafabadi et al., 2015).

## 3.3 COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA DOS CULTIVOS

Após a obtenção da biomassa dos cultivos, foi possível analisar a sua composição quanto a proteínas, lipídios, ácidos graxos e seu teor de cinzas. A análise das proteínas das microalgas *Chlorella* sp. é conduzida para avaliar sua composição proteica, fornecendo dados relevantes sobre o valor nutricional e seu potencial para aplicações industriais. Essas informações são essenciais para compreender a qualidade e o aproveitamento das microalgas (Moreno-Garcia et al., 2017).

Bhatti et al. (2023) realizou o cultivo de *Chlorella sorokiniana* em um fotobiorreator de  $300 \text{ L}$  utilizando meio de crescimento padrão (SGM), resultando em uma produção



de 42,1% de proteínas, 8,8% de lipídios e 6,1% de cinzas. Estudo de Matos et al. (2018), utilizando um *raceway pond* de 5,0 m de comprimento, 1,6 m de largura, 0,5 m de profundidade e capacidade total de 4.000 L/4 m<sup>3</sup>, cultivaram a microalga *Chlorella vulgaris* em meio Bold Basal Medium (BBM); este cultivo apresentou teor de proteína de 37,2%, 5,8% de lipídios e 14,5% de cinzas. Segundo estudo de Matos et al. (2015), as microalgas com alto teor proteico apresentam níveis de proteína que variaram de 45,2 a 48,8%.

É possível identificar que na amostra do *raceway pond* 1 obtivemos maiores resultados que nos subsequentes com 50,1% de proteínas. Já o conteúdo de lipídios foi maior no *raceway pond* 3, com 18,32%, bem como o maior teor de cinzas, com 25,3%. Esses resultados indicam que a biomassa obtida possui uma quantidade boa de proteínas, sendo atrativo por este motivo para aplicações na indústria de alimentos, suplementos nutricionais, rações animais e outros produtos relacionados à nutrição (Ahmad & Ashraf, 2023; Silva, 2022). Os resultados obtidos estão descritos na tabela 2.

Tabela 2. Teor de proteínas, lipídios e cinzas da biomassa produzida em sistema *raceway pond*

| Amostras         | Proteínas (%) | Lipídios (%) | Cinzas (%) |
|------------------|---------------|--------------|------------|
| <i>Raceway</i> 1 | 50,1          | 15,01 ± 2,0  | 22,0 ± 2,0 |
| <i>Raceway</i> 2 | 48,4          | 17,62 ± 0,7  | 22,3 ± 1,1 |
| <i>Raceway</i> 3 | 46,3          | 18,32 ± 0,1  | 25,3 ± 6,6 |

A determinação do teor de cinzas na biomassa microalgal é um dos métodos utilizados para avaliar sua composição mineral, além de fornecer informações valiosas para aplicações específicas, como na produção de alimentos, rações, cosméticos ou biocombustíveis (Liu, 2019). As cinzas resultantes da biomassa colhida nos sistemas foram aproximadamente 22 a 25,3% como mostra a Tabela 3. Normalmente, o teor de cinzas na *Chlorella* sp. varia de 1 a 5% em base seca (Najafabadi et al., 2015), essa observação indica a presença de um percentual de meio inorgânico que permaneceu junto com a biomassa após o processo de separação (Chen et al., 2017; Costa, 2016).

O resultado de cinzas da biomassa algal pode ser atribuído a vários fatores, incluindo a presença de impurezas do meio ambiente, como partículas de solo, minerais e outros contaminantes, pode aumentar o teor de cinzas na biomassa (Belini, 2022) bem como as condições de crescimento das microalgas, como a qualidade da água, os nutrientes fornecidos e a exposição a poluentes, podendo afetar a composição da biomassa (Liu, 2019).

Essa ressalva destaca a importância de controlar e aperfeiçoar os processos de cultivo, colheita e processamento de microalgas, especialmente quando se pretende utilizá-las para aplicações específicas, como a produção de biocombustíveis ou produtos alimentícios (Roostaei et al., 2018). A redução do teor de cinzas na biomassa é desejável em muitos casos, pois as cinzas podem afetar negativamente a eficiência de processos industriais e a qualidade dos produtos finais (Liu, 2017). Portanto, é essencial compreender e controlar os fatores que contribuem para o aumento do teor de cinzas na biomassa de *Chlorella* e implementar táticas para minimizá-los.

É importante notar que a composição das cinzas pode variar dependendo das condições de crescimento da *Chlorella*, do estágio de crescimento da microalga e das práticas de colheita (Carraro, 2022). Portanto, a análise de cinzas deve ser realizada regularmente e em condições controladas para obter dados consistentes e relevantes para suas aplicações específicas. Além disso, as regulamentações ambientais devem ser consideradas ao descartar as cinzas resultantes da queima (Costa, 2022). Este percentual elevado indica a necessidade de realizar o estudo de lipídios e proteínas removendo o teor de compostos inorgânicos iniciais.

Os valores de 15 a 18% indicam a proporção de lipídios em relação à massa total da biomassa livre de cinzas da *Chlorella* sp. Essa biomassa não mostrou potencial para o aproveitamento dos lipídios extraídos. No entanto, ela pode ser utilizada para outros fins que não requerem a extração dos lipídios. O teor lipídico encontrado é um parâmetro relevante para o uso da biomassa integralmente, como em alimentação animal ou na produção de fertilizantes (Grimm et al., 2015).

A *Chlorella* é conhecida por ser uma fonte potencial de lipídios, que podem ser utilizados em várias aplicações, como a produção de biocombustíveis, suplementos alimentares e produtos farmacêuticos. A capacidade de alcançar um teor de lipídios de 18% é relevante e a otimização das condições de cultivo pode potencialmente aumentar ainda mais esse valor (Grimm et al., 2015). O terceiro *raceway pond* indica uma maior proporção de lipídios, podendo ser considerado interessante para aplicações em biotecnologia (Rodrigues, 2022). A pesquisa contínua e o entendimento das condições ideais de cultivo e os fatores que afetam o teor de lipídios são cruciais para maximizar o potencial de produção de lipídios a partir da *Chlorella* sp. e de outras microalgas (Panahi et al., 2019).

Além da análise quantitativa dos lipídios, foram realizadas análises qualitativas para identificar os ácidos graxos saturados e insaturados (Tabela 4) presentes na fração

lipídica. Essas informações auxiliaram no entendimento da qualidade e das características dos lipídios da microalga (Nateghpour, Kavooosi & Mirakhorli, 2021).

A biomassa rica em lipídios pode ser utilizada para vários fins, como a indústria de alimentos, sendo utilizada na alimentação animal (Grimm et al., 2015), nas indústrias de cosméticos, na formulação de cremes (Mérida, 2019) e na indústria de saúde e nutrição, pois sabe-se que esta biomassa é uma fonte rica em ácidos graxos ômega-3, ômega-6 e outros nutrientes essenciais (Wang et al., 2018). O potencial de aplicação é vasto, abrangendo setores relacionados à alimentação, saúde, farmácia e energia renovável (Benavides, 2016; Mérida, 2019).

Tabela 3. Resultados (%) de ácidos graxos presentes na fração lipídica

| Ácidos graxos | Raceway 1   | Raceway 2   | Raceway 3   |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>C14:0</b>  | 0,64 ± 0,6  | 0,36 ± 0,1  | 0,23 ± 0,1  |
| <b>C16:0</b>  | 28,72 ± 4,5 | 23,57 ± 0,9 | 22,94 ± 0,6 |
| <b>C16:1</b>  | 2,61 ± 0,5  | 1,29 ± 0,1  | 1,7 ± 0,6   |
| <b>C18:0</b>  | 1,89 ± 0,5  | 1,31 ± 0,3  | 0,65 ± 0,4  |
| <b>C18:1</b>  | 17,16 ± 3,6 | 13,13 ± 1,2 | 14,43 ± 0,7 |
| <b>C18:2</b>  | 7,42 ± 1,1  | 9,42 ± 0,5  | 6,77 ± 0,1  |
| <b>C18:3</b>  | 41,47 ± 8,4 | 50,96 ± 2,9 | 53,45 ± 0,7 |

FAs- ácidos graxos C14:0 (Ácido mirístico); C16:0 (Ácido palmítico); C16:1(Ácido palmitoléico); C18:0 (Ácido esteárico); C18:1 (Ácido oleico); C18:2 (Ácido linoleico); C18:3 (Ácido  $\gamma$ -linolênico)

Neste experimento foi possível analisar que o Ácido alfa-linolênico (C18:3) foi predominante nas amostras, alcançando 53,45%, seguido do Ácido palmítico (C16:0) com 28,72% e o Ácido oleico (C18:1) com média maior de 17,46%. Estudo realizado por Ramírez-López, Perales-Vela & Fernández-Linares (2019), estabelecendo uma cultura semicontínua de *Chlorella vulgaris raceway pond* de 2.000 L utilizando o meio BBM (Bold's Basal Medium) modificado, durante a primavera, obteve produtividade lipídica por área de 6,1 g m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>, com um aumento na proporção de ácidos graxos saturados (SFA) (C14-C18).

## 4 CONCLUSÕES

Parâmetros como intensidade luminosa, pH, temperatura, profundidade do sistema e quantidade de nutrientes do meio são fundamentais para garantir condições ideais

de cultivo e maximizar a produtividade das microalgas em sistemas de *raceway pond*, bem como a composição de sua biomassa.

O teor de lipídios na microalga *Chlorella* sp. não é alto o suficiente para viabilizar a extração de biodiesel. Os principais ácidos graxos encontrados nas amostras foram o Ácido alfa-linolênico (C18:3), Ácido palmítico (C16:0) e Ácido oleico (C18:1).

Por outro lado, a microalga *Chlorella* sp. possui cerca de 50,1% de proteínas, tornando-a promissora para aplicações na indústria alimentícia, suplementos nutricionais e rações animais, devido ao seu perfil nutricional rico em aminoácidos essenciais.

Em resumo, a pesquisa destaca que as condições oferecidas para a produção da microalga *Chlorella* sp. resultou em alto teor de proteínas, tornando-a uma excelente opção para aplicações em rações para animais, proporcionando uma fonte de proteínas nutritivas, contribuindo para a sustentabilidade e diversificação de recursos nutricionais.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) processo 306216/2022-1 e 400862/2019-0, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) código 001 e à UFCE por intermédio da pesquisadora Dra. Kelma M. dos Santos Pires Cavalcante que forneceu a cepa de *Chlorella* sp.

---

## MICROALGAE CULTIVATION IN RACEWAY PONDS: A PROMISING APPROACH FOR BIOMASS PRODUCTION

**ABSTRACT:** The cultivation of microalgae can be carried out in different systems, each with specific characteristics. One example is cultivation in open systems, such as Raceway Ponds. The cultivation of microalgae in Raceway Ponds is a widely used technique for large-scale biomass production due to its simplicity and low operational cost. The microalga *Chlorella* sp. is widely recognized for its high biotechnological potential, standing out for its production of protein- and lipid-rich biomass, as well as applications in biofuels and dietary supplements. This study aimed to evaluate the biomass production of *Chlorella* sp. in a mineral medium using pilot-scale Raceway Pond cultivation systems of simple construction. Physicochemical parameters of the culture, growth rate, and biomass composition including proteins, lipids, and ash were analyzed.

The system allowed for a progressive increase in biomass, reaching a productivity of  $1.039 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  in the third cultivation cycle. The biomass contained 46.3 to 50.1% protein and 15 to 18.3% lipids, making it promising for the food industry, bioinputs, and animal feed. The research reinforces the potential of *Chlorella* sp. for sustainable applications in various industrial sectors, contributing to resource diversification and environmental sustainability.

**Keywords:** *Chlorella* sp., raceway pond, biomass, proteins, lipids, biotechnology.

---

## REFERÊNCIAS

Ahmad, A. & Ashraf, S. S. (2023). Sustainable food and feed sources from microalgae: Food security and the circular bioeconomy. *Algal Research*, 103185.

Andrade, D. S. et al. (2021). Microalgae: cultivation, biotechnological, environmental, and agricultural applications. *Advances in the domain of environmental biotechnology: microbiological developments in industries, wastewater treatment and agriculture*, 635-701.

Belini, G. B. (2022). *Cinzas de caldeira de biomassa: caracterização, diagnóstico e alternativa para aplicação*.

Benavides, A. M. S. (2016). Evaluación de fertilizantes agrícolas en la productividad de la microalga *Chlorella sorokiniana*. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), 265-275.

Bhatti, S., Richards, R., Wall, C. L., Macpherson, M. J. et al. (2023). Phycoremediation and simultaneous production of protein-rich algal biomass from aquaculture and agriculture wastewaters. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 98(8), 1918-1935.

Bligh, E. G. & Dyer, W. J. (ago. 1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Biochem Physiol*, 37(8), 911-917.

Carraro, C. D. F. F. (2022). *Biofixação de CO<sub>2</sub> e biorremediação via cultivo automatizado da Microalga Chlorella Minutíssima em águas residuais*.

Costa, M. C. (2022). *Influência da integração de extrato e complexo bioativo de codium tomentosum em alimentos funcionais*.

- Costa, T. D. O. (2016). *Potencial energético de biomassas algais obtidas em lagoas de alta taxa para a produção de biocombustíveis sólidos*.
- Chen, W.-T., Qian, W., Zhang, Y., Mazur, Z. et al. (2017). Effect of ash on hydrothermal liquefaction of high-ash content algal biomass. *Algal Research*, 25, 297–306.
- Chisti, Y. (2013). 7 Raceways-based production of algal crude oil. In C. Posten, e Walter, C. (ed.). *Microalgal Biotechnology: Potential and Production Raceways-based production of algal crude oil* (pp. 113–146). De Gruyter.
- Daliry, S. et al. (2017). Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3(2), 217–230.
- De Moraes Ricardi, A. (2020). *Análise dos efeitos das variáveis de processo na produção de biomassa e nos parâmetros reológicos da microalga *Chlorella minutissima* cultivada em reator raceway para produção de biocombu*.
- De Souza, M. P. et al. (2020). Bioproducts characterization of residual periphytic biomass produced in an algal turf scrubber (ATS) bioremediation system. *Water Science and Technology*, 82(6), 1247–1259.
- De Souza, M. P. et al. (2019). Potential of microalgal bioproducts: general perspectives and main challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2139–2156.
- Dragone, G. (2022). Challenges and opportunities to increase economic feasibility and sustainability of mixotrophic cultivation of green microalgae of the genus *Chlorella*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112284.
- Escalante Palacios, A. Y. & Vizcarra Fuentes, A. J. (2019). *Estudio de las condiciones del desarrollo de la cepa *Chlorella SP*. Para la producción de Biodiésel a partir de la obtención de FAME en un fotobiorreactor a escala laboratorio-Arequipa*.
- Grimm, P., Risse, J. M., Cholewa, D., Müller, J. M. et al. (2015). Applicability of *Euglena gracilis* for biorefineries demonstrated by the production of  $\alpha$ -tocopherol and paramylon followed by anaerobic digestion. *Journal of biotechnology*, 215, 72–79.
- Homiak, J. A. (2014). Produção de biodiesel utilizando microalgas. *SaBios - Revista de Saúde e Biologia*, 9(2), 65–74.

- Huesemann, M. et al. (2018). Climate-simulated raceway pond culturing: quantifying the maximum achievable annual biomass productivity of *Chlorella sorokiniana* in the contiguous USA. *Journal of Applied Phycology*, 30(1), 287-298.
- Khan, M. I., Shin, J. H. & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 36.
- Kumar, K. et al. (2015). Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 875-885.
- Kumar, K. S. et al. (2015). Microalgae—a promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 113, 329-352.
- Kumar, P., Malik, A., Prajapati, S. K. & Vijay, V. K. (2017). Cultivation of native algal consortium in semi-continuous pilot scale raceway pond for greywater treatment coupled with potential methane production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5581-5587.
- Kumaran, M. et al. (2023). Agriculture of microalgae *Chlorella vulgaris* for polyunsaturated fatty acids (PUFAs) production employing palm oil mill effluents (POME) for future food, wastewater, and energy nexus. *Energy Nexus*, 9, 100169.
- Liu, K. (2017). Characterization of ash in algae and other materials by determination of wet acid indigestible ash and microscopic examination. *Algal research*, 25, 307-321.
- Liu, K. (2019). Effects of sample size, dry ashing temperature and duration on determination of ash content in algae and other biomass. *Algal Research*, 40, 101486.
- Lu, L., Yang, G., Zhu, B. & Pan, K. (2017). A comparative study on three quantitating methods of microalgal biomass. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 46, 2265-2272.
- Magro, F. G. et al. (2018) A composição da biomassa de *Spirulina platensis* é influenciada pela disponibilidade de luz e fase de colheita em lagoas de canal. *Environ Technol*, 39(14), 1868-1877.
- Martinez-Garcia, M. & Van Der Maarel, M. J. E. C. (2016). Floridoside production by the red microalga *Galdieria sulphuraria* under different conditions of growth and osmotic stress. *AMB Express*, 6(1), 71.

Martini, F. A. et al. (2019). Periphytic biomass composition and exploitation from algae turf scrubber system. *SN Applied Sciences*, 1(7), 765.

Matos, Â. P. et al. (2018). Cultivation of *Chlorella vulgaris* in medium supplemented with desalination concentrate grown in a pilot-scale open raceway. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35(4), 1183-1192.

Matos, A. P., Morioka, L. R. I., Sant'anna, E. S. & Franca, K. B. (2015). Protein and lipid contents from *Chlorella* sp. cultivated in residual concentrated desalination/Teores de proteínas e lipídeos de *Chlorella* sp. cultivada em concentrado de dessalinização residual. *Ciência Rural*, 45(2), 364-371, 2015.

Matos, Â., Ferreira, W. B., Morioka, L. R. I., Moecke, E. H. S. et al. (2018). Cultivation of *Chlorella vulgaris* in medium supplemented with desalination concentrate grown in a pilot-scale open raceway. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35, 1183-1192.

Mérida, L. G. R. (2019). *Produção de biomassa de Euglena sp. utilizando fertilizantes inorgânicos tipo NPK como cultivos alternativos.*

Moreno-Garcia, L., Adjallé, K., Barnabé, S. & Raghavan, G. S. V. (2017). Microalgae biomass production for a biorefinery system: recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 493-506.

Morita, M., Watanabe, Y., Saiki, H. (2000). High photosynthetic productivity of green microalga *Chlorella sorokiniana*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 87(3), 203-218.

Najafabadi, H. A., Malekzadeh, M., Jalilian, F., Vossoughi, M. et al. (2015). Effect of various carbon sources on biomass and lipid production of *Chlorella vulgaris* during nutrient sufficient and nitrogen starvation conditions. *Bioresource Technology*, 180, 311-317.

Nateghpour, B., Kavousi, G. & Mirakhorli, N. (2012). Amino acid profile of the peel of three citrus species and its effect on the combination of amino acids and fatty acids *Chlorella vulgaris*. *Journal of Food Composition and Analysis*, 98, 103808.

Panahi, Y., Khosroushahi, A. Y., Sahebkar, A. & Heidari, H. R. (2019). Impact of Cultivation Condition and Media Content on *Chlorella vulgaris* Composition. *Advanced pharmaceutical bulletin*, 9(2), 182.



Qiu, R., Gao, S., Lopez, P. A. & Ogden, K. L. (2017). Effects of pH on cell growth, lipid production and CO<sub>2</sub> addition of microalgae *Chlorella sorokiniana*. *Algal Research*, 28, 192–199.

Ramírez-López, C., Perales-Vela, H. V. & Fernández-Linares, L. (2019). Biomass and lipid production from *Chlorella vulgaris* UTEX 26 cultivated in 2 m<sup>3</sup> raceway ponds under semicontinuous mode during the spring season. *Bioresource technology*, 274, 252–260.

Razzak, S. A. et al. (2017). Biological CO<sub>2</sub> fixation with production of microalgae in wastewater – A review. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 76, 379–390.

Razzak, S. A. et al. (2023). Microalgae cultivation in photobioreactors: sustainable solutions for a greener future. *Green Chemical Engineering*.

Rodrigues, A. R. D. S. P. (2022). Produção de biocombustíveis a partir de microalgas – uma revisão. *Revista Ambientale*, 14(2), 10–21.

Roostaei, J., Zhang, Y., Gopalakrishnan, K. & Ochocki, A. J. (2018). Mixotrophic microalgae biofilm: a novel algae cultivation strategy for improved productivity and cost-efficiency of biofuel feedstock production. *Scientific reports*, 8(1), 12528.

Schmidt, A. D. P., Souza, L. F. D. & Agustini, C. B. (2019). Raceway ponds como alternativa para remediação de CO<sub>2</sub> atmosférico. *Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis (5.: 2019: Porto Alegre)*. Anais: volume 01. Porto Alegre: GFM, 2019.

Silva, D. C. D. (2022). Cultivo da microalga *Chaetoceros Gracilis* com variação de salinidade e seu efeito no crescimento, produção de pigmentos fotossintéticos e exopolissacarídeos. 2022.

Souza, L. D. et al. (maio 2017). Morphological and ultrastructural characterization of the acidophilic and lipid-producer strain *Chlamydomonas acidophila* LAFIC-004 (Chlorophyta) under different culture conditions. *Protoplasma*, 254(3), 1385–1398.

Templeton, D. W. & Laurens, L. M. L. (2015). Nitrogen-to-protein conversion factors revisited for applications of microalgal biomass conversion to food, feed and fuel. *Algal Research*, 11, 359–367.

Wang, Y., Seppänen-Laakso, T., Rischer, H. & Wiebe, M. G. (2018). *Euglena gracilis* growth and cell composition under different temperature, light and trophic conditions. *PLoS One*, 13(4), e0195329.

Zhang, T.-Y. et al. (2016). Promising solutions to solve the bottlenecks in the large-scale cultivation of microalgae for biomass/bioenergy production. *Renew Sustain Energy Rev*, 60, 1602-1614.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# EMPREENDEDORISMO AMBIENTAL PARA GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS PARCERIA GERADOR, UNIVERSIDADE E COOPERATIVA DE CATADORES

*Milena Mattje Barcelos<sup>1\*</sup>, Luana Oliveira de Carvalho<sup>2</sup>, Carlos Alberto  
Mendes Moraes<sup>3</sup>, Feliciane Andrade Brehm<sup>3</sup>*

---

1 Graduação, Centro Universitário Leonardo da Vinci – UNIASSELVI, 93510-138, Novo Hamburgo, Brasil.

2 Pós-Graduação, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, 90619-900, Porto Alegre, Brasil.

3 Pós-Graduação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, 93022-750, São Leopoldo, Brasil.

\*E-mail: milenamattjebarcelos@gmail.com

# RESUMO

O empreendedorismo ambiental emerge como uma abordagem estratégica para enfrentar desafios ambientais, combinando inovação, sustentabilidade e geração de valor. Este artigo analisa a atuação de uma cooperativa na coleta de resíduos eletroeletrônicos (REEE) em uma empresa metalúrgica de São Leopoldo, Rio Grande do Sul, após as enchentes de 2024. Baseado em uma análise dos impactos ambientais e econômicos do descarte inadequado de REEE, o estudo destaca o papel da mineração urbana e das parcerias com universidades no desenvolvimento de tecnologias para recuperação de materiais valiosos, críticos e estratégicos, como as terras raras. A pesquisa evidencia como o empreendedorismo ambiental, ao conectar gestão sustentável de resíduos e economia circular, contribui para a mitigação de impactos ambientais e fortalece a viabilidade econômica de cooperativas. Conclui-se que iniciativas dessa natureza são essenciais para promover modelos de negócio sustentáveis e inovadores.

**Palavras-chave:** Empreendedorismo ambiental. Cooperativa de Catadores. Resíduos eletroeletrônicos. Economia circular. Sustentabilidade.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de empreendedorismo ambiental tem ganhado relevância nos debates sobre desenvolvimento sustentável, combinando inovação, responsabilidade socioambiental e práticas empresariais. Esse tipo de iniciativa busca criar soluções para problemas ambientais ao mesmo tempo em que gera valor econômico e social, sendo essencial para promover a economia circular e fomentar ações que mitiguem os impactos ambientais negativos (Schaltegger & Wagner, 2011). No contexto da gestão de resíduos, o empreendedorismo ambiental destaca-se como uma abordagem estratégica para minimizar impactos negativos no meio ambiente, promover valor aos resíduos sólidos urbanos e gerar oportunidades de renda, especialmente em comunidades vulneráveis.

Entre os desafios ambientais mais significativos está a crescente geração de resíduos eletroeletrônicos (REEE). Esses resíduos são compostos por equipamentos descartados após o fim de sua vida útil e incluem dispositivos de iluminação, eletrodomésticos, computadores, entre outros. De acordo com Baldé et al. (2024), em 2022, foram gerados cerca de 62 bilhões de quilos de REEE globalmente, dos quais apenas 13,8 bilhões de

quilos foram reciclados adequadamente. No Brasil, esse volume alcançou 2,4 milhões de toneladas, consolidando o país como o maior gerador de REEE da América Latina.

Os REEE representam tanto um risco quanto uma oportunidade. Por um lado, sua composição inclui substâncias tóxicas como mercúrio e chumbo, que podem contaminar o solo e a água quando descartados inadequadamente. Por outro lado, esses resíduos contêm materiais valiosos, como ouro, prata e cobre, que podem ser recuperados por meio de reciclagem, reforçando os princípios da economia circular (Pradiian, 2013; Pourhossein & Mousavi, 2018). O Decreto nº 10.240/2020 e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) definem diretrizes e metas para a logística reversa de REEE no Brasil, mas sua implementação ainda enfrenta desafios relacionados à infraestrutura e à conscientização pública (Brasil, 2010, 2020).

Nesse cenário, as cooperativas desempenham um papel fundamental. Além de contribuírem para a coleta e o manejo adequado dos resíduos, elas promovem a inclusão social e econômica de trabalhadores, especialmente em regiões impactadas por desastres ambientais. No caso das enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul, a atuação de cooperativas foi essencial para mitigar os impactos do aumento de 75% no descarte de REEE registrado por uma empresa metalúrgica de São Leopoldo, conforme dados fornecidos pelo Sistema de Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), administrado pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM).

Os REEE gerados pela enchente foram categorizados conforme o Acordo Setorial de Logística Reversa de Eletroeletrônicos. Entre os resíduos identificados, os *notebooks*, CPUs, *tablets*, celulares e telefones se enquadram na Linha Verde, que inclui computadores e acessórios de informática e telefonia. Impressoras, *mouses* e teclados, também pertencentes à Linha Verde, são considerados periféricos de informática. Além disso, os micro-ondas e as chaleiras elétricas são classificadas na Linha Azul, que abrange pequenos eletrodomésticos de uso doméstico. A destinação correta e o tratamento desses materiais são regulados por normas que visam a sustentabilidade e a preservação ambiental, conforme defendido pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), entidade representativa do setor elétrico e eletrônico no Brasil.

Este artigo busca analisar o papel do empreendedorismo ambiental no gerenciamento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos – REEE, com foco na atuação de uma cooperativa local na coleta e destinação de REEE pós-enchente. Além disso, discute como parcerias com universidades têm possibilitado o desenvolvimento de tecnologias de recuperação de materiais valiosos, críticos e estratégicos como terras raras, promovendo benefícios ambientais e econômicos. Este estudo teve como objetivo analisar o papel da

cooperativa na gestão e coleta de REEE em uma empresa metalúrgica de São Leopoldo, focando na contribuição para o empreendedorismo ambiental.

## 2 METODOLOGIA

A abordagem adotada no estudo combinou métodos quantitativos para entender como a cooperativa influencia a gestão sustentável dos REEE e a geração de valor ambiental e econômico para as partes envolvidas.

O estudo envolveu a identificação e análise dos REEE gerados pela empresa A após as enchentes de 2024, que resultaram em um aumento expressivo no volume de resíduos descartados. No total, foram registradas 2,5 toneladas de resíduos atribuídos ao evento, representando um acréscimo de 75% em comparação aos volumes usuais. Esses dados foram obtidos do Sistema de Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), gerido pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler (FEPAM), responsável pelo monitoramento do descarte de resíduos sólidos.

A metodologia baseou-se no cálculo da quantidade de REEE descartados entre janeiro e setembro de 2024, com especial atenção ao volume gerado em decorrência da enchente de maio. Os dados mensais registrados no sistema MTR foram analisados em relação ao total acumulado no período, destacando as variações no descarte relacionadas ao evento climático. Além disso, os resíduos foram categorizados e comparados com dados históricos para identificar tendências e possíveis alterações nos padrões de geração.

A análise focada neste intervalo de tempo garantiu maior precisão nos resultados, evitando projeções incertas para os meses restantes de 2024. Os resultados obtidos não apenas evidenciam o impacto da enchente no descarte de resíduos, mas também ressaltam a importância da atuação da cooperativa na gestão eficiente desses materiais, contribuindo para práticas sustentáveis e a mitigação de impactos ambientais.

Após a coleta dos REEE pela cooperativa, foi realizada uma triagem inicial, com foco exclusivo nos resíduos gerados pela enchente de 2024. Durante essa triagem, os materiais que não exigiam desmontagem detalhada foram separados e direcionados para comercialização direta, como metais e plásticos. Esses componentes foram segregados e enviados para venda, enquanto os resíduos que necessitavam de processamento adicional foram encaminhados à universidade parceira para a desmontagem detalhada e análise mais aprofundada.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise quantitativa consistiu na comparação dos volumes de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) coletados antes e após a enchente de 2024. Foram coletados os dados históricos de descarte dos anos de 2022 e 2023, comparando-os com os volumes registrados de janeiro a setembro de 2024. Gráficos foram elaborados para ilustrar as variações mensais e anuais no volume de resíduos gerados, evidenciando um aumento significativo gerado pelo impacto negativo da enchente. A figura 1 demonstra o crescimento no volume de REEE após a enchente no período de descarte de maio a setembro, bem como o total gerado de janeiro a setembro.

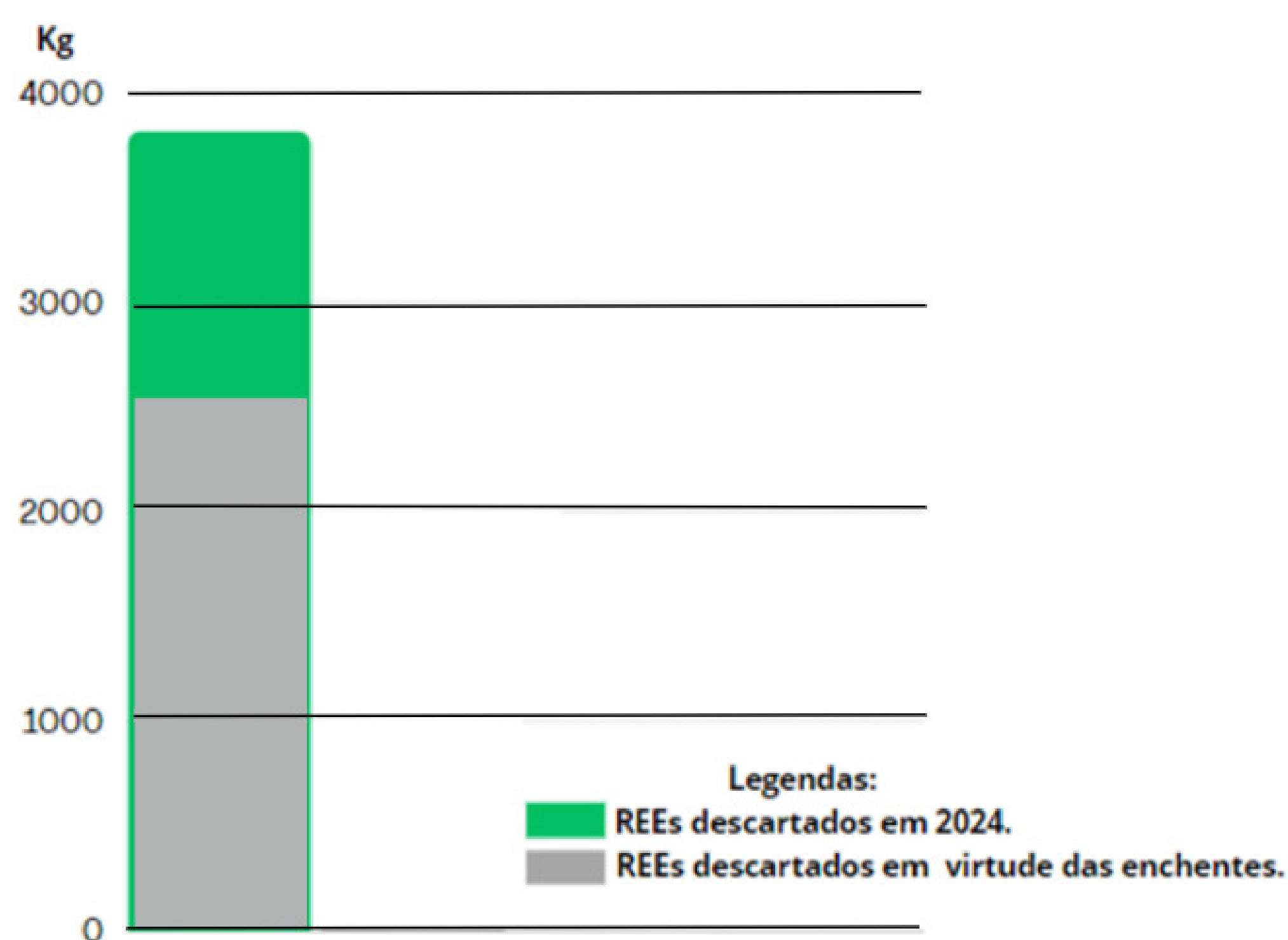


Figura 1. Quantidade total de REEE descartados de janeiro a setembro de 2024, incluindo o volume adicional de resíduos gerados de maio a setembro devido à enchente

Fonte: Adaptado do FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental. Sistema de Controle de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR

A Figura 2 demonstra o aumento exponencial no volume de REEE descartados em 2024 em comparação com os anos de 2022 e 2023.

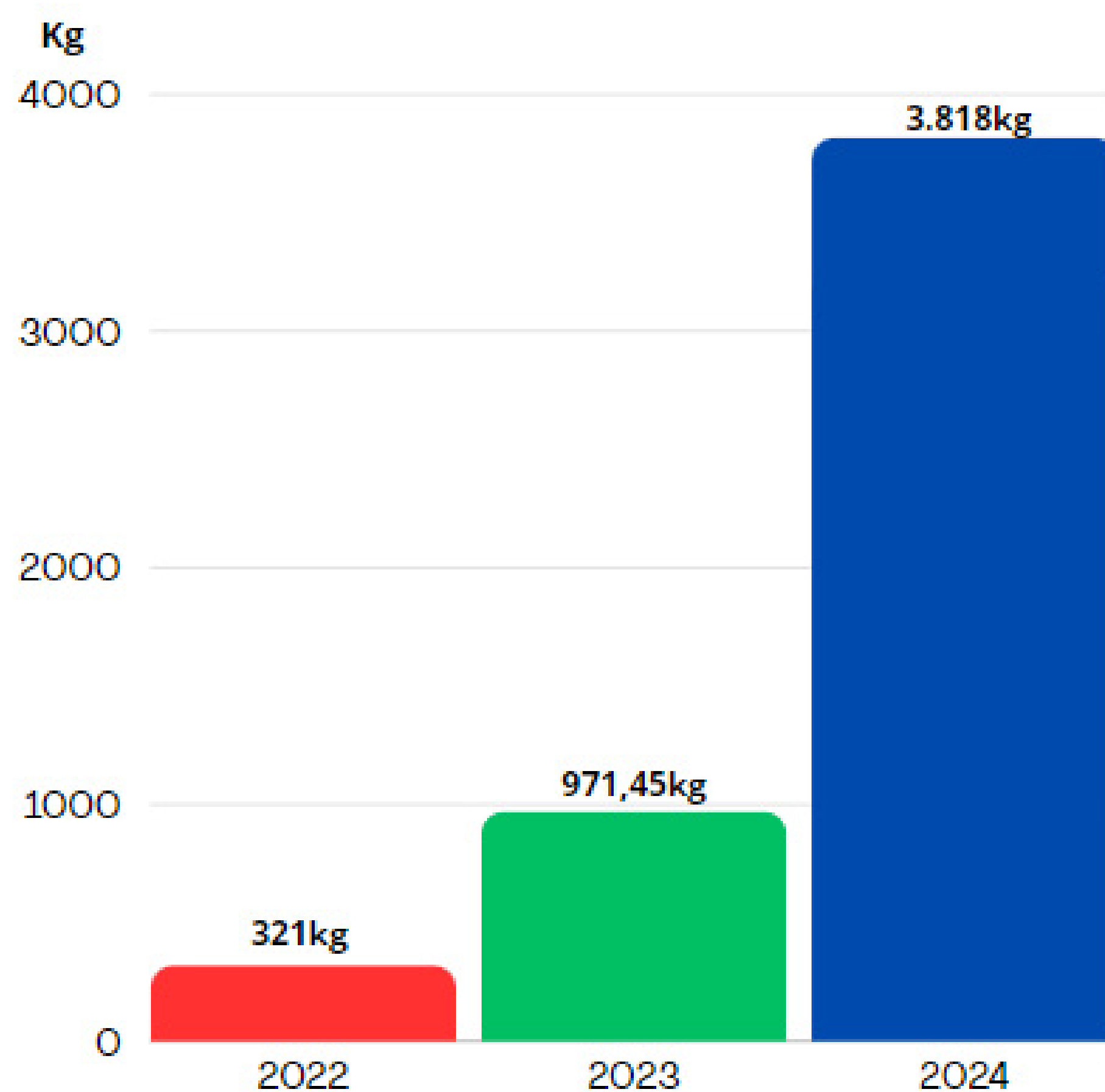


Figura 2. Quantidade de REEE descartados nos anos de 2022, 2023 e 2024  
 Fonte: Adaptado de FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental. Sistema de Controle de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR

A Tabela 1 apresenta a quantidade de REEE descartada devido à enchente, quantificada por material e linha de produto, de acordo com os critérios estabelecidos no Acordo Setorial de Logística Reversa de Eletroeletrônicos.

Tabela 1. Quantidade de REEE descartada devido à enchente, por material e linha de produto, conforme o Acordo Setorial de Logística Reversa

| Material     | Quantidade (KG) | Linha                    |
|--------------|-----------------|--------------------------|
| Teclado      | 68,3            | Linha Verde              |
| Etiquetadora | 37,2            | Linha Verde              |
| Fontes       | 830,1           | Linha Verde              |
| Monitores    | 584,5           | Linha Verde              |
| CPU          | 180,4           | Linha Verde              |
| Impressora   | 98,2            | Linha Verde              |
| Diversos     | 722,3           | Linha Verde / Linha Azul |

Fonte: Adaptado de FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental. Sistema de Controle de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR



## 3.2 COLETA, IDENTIFICAÇÃO E DESMONTAGEM DOS REEE

A coleta dos REEE, realizada pela cooperativa, resultou em um aumento significativo na quantidade de resíduos, com um crescimento de 75% no volume após as enchentes. Na triagem inicial, a cooperativa separou os materiais que não exigiam desmontagem detalhada, como metais e plásticos, para comercialização direta. Já os resíduos que necessitavam de processamento mais detalhado foram encaminhados para a universidade parceira, responsável pela desmontagem e análise dos componentes.

Na universidade, a desmontagem detalhada permitiu a separação de materiais de interesse para pesquisas acadêmicas, como discos rígidos (HDs), LEDs e outros componentes. Após o processamento, os resíduos restantes foram devolvidos à cooperativa para comercialização, promovendo o ciclo de reciclagem e agregando valor ao processo.

A desmontagem detalhada consiste em um processo mais minucioso, no qual os resíduos são desmontados em níveis mais profundos para a recuperação de componentes específicos que não são imediatamente utilizáveis ou que necessitam de pesquisa acadêmica. Essa etapa inclui, por exemplo, a remoção de partes de discos rígidos (HDs), que são desfeitos para recuperar materiais como metais preciosos, e a separação de LEDs para análise de reaproveitamento de suas partes. A desmontagem é realizada manualmente, utilizando ferramentas adequadas para garantir a preservação dos componentes e facilitar a separação dos materiais recicláveis.

Os resíduos que não foram utilizados para fins acadêmicos retornaram à cooperativa, já desmontados e devidamente separados, para que pudessem ser comercializados. Esse processo de recuperação e comercialização de materiais recicláveis, como plásticos, metais e circuitos eletrônicos, contribuiu para a geração de renda e para a sustentabilidade do processo, fortalecendo a economia circular e as práticas de empreendedorismo ambiental.

## 3.3 IMPACTO ECONÔMICO E AMBIENTAL

A parceria entre a cooperativa e a universidade resultou em benefícios tanto econômicos quanto ambientais. Essa parceria entre cooperativa e universidade demonstrou uma sinergia eficaz na gestão dos REEE, unindo esforços para mitigar os impactos ambientais, promover a economia circular e fomentar o empreendedorismo ambiental. A cooperativa obteve receita com a comercialização dos materiais recicláveis, enquanto a universidade contribuiu para a redução dos resíduos e a promoção de soluções sustentáveis. A separação eficiente de materiais e a reciclagem de componentes contribuíram para

minimizar os impactos ambientais do descarte inadequado, alinhando-se aos princípios da economia circular.

### 3.4 CONTRIBUIÇÕES PARA O EMPREENDEDORISMO AMBIENTAL

O estudo ressalta o papel da cooperativa no fomento ao empreendedorismo ambiental, ao integrar a gestão de resíduos com soluções sustentáveis e práticas de economia circular. A colaboração com a universidade fortaleceu o modelo de negócios da cooperativa, demonstrando a viabilidade econômica e o potencial de inovação, além de promover a conscientização sobre a importância da gestão adequada dos REEE. Estudos recentes, desenvolvidos pelo grupo de pesquisa Núcleo de Caracterização de Materiais – NUCMAT, grupo de pesquisa vinculado à universidade parceira, como beneficiamento de lâmpadas LED (Santos et al., 2024) estão sendo desenvolvidos para aprimorar a eficiência da reciclagem e reduzir o impacto ambiental. Pesquisas futuras poderiam se concentrar no desenvolvimento de novas tecnologias para a triagem dos resíduos, com o objetivo de aprimorar a recuperação de terras raras e aumentar a eficiência dos processos. Esse avanço fortaleceria a economia circular, promovendo novas oportunidades de empreendedorismo ambiental e ampliando o impacto positivo na sustentabilidade. Ao melhorar a gestão dos resíduos, seria possível não apenas gerar mais valor econômico, mas também fomentar a criação de novos modelos de negócios sustentáveis e resilientes.

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo analisou o papel das cooperativas no gerenciamento de REEE gerados após as enchentes de 2024, com foco nas práticas de empreendedorismo ambiental de uma cooperativa que, em parceria com uma universidade, realizou a coleta desses resíduos em uma empresa metalúrgica localizada em São Leopoldo. A pesquisa evidenciou o papel fundamental das cooperativas na implementação da economia circular, ao realizar a triagem inicial dos resíduos, separar os materiais de maior valor comercial e encaminhar os resíduos para a universidade, onde foram desmontados e analisados para fins de reciclagem em pesquisas acadêmicas.

Os dados indicaram um aumento considerável na geração de REEE após a enchente de 2024, o que exigiu uma adaptação nas práticas de manejo dos resíduos. A colaboração entre a cooperativa e a universidade não apenas contribuiu para o reaproveitamento de componentes valiosos, mas também gerou receita através da comercialização de materiais recicláveis, fortalecendo a sustentabilidade econômica da cooperativa.

Embora o processo manual de triagem e desmontagem apresente limitações em termos de eficiência, o modelo de parceria demonstrou ser eficaz para agregar valor aos resíduos, promover a economia circular e reduzir os impactos ambientais associados ao descarte inadequado. A pesquisa reforça a importância de fortalecer as parcerias entre cooperativas, universidades e empresas, visando à inovação na gestão de resíduos e ao reaproveitamento de materiais.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa pelos dados fornecidos, que foram essenciais para a realização deste artigo, assim como à cooperativa e à universidade pelo apoio e colaboração ao longo de todo o processo.

---

## ENVIRONMENTAL ENTREPRENEURSHIP: COLLECTION OF E-WASTE AFTER FLOODING, THE ROLE OF THE COOPERATIVE IN THIS CONTEXT

**ABSTRACT:** Environmental entrepreneurship emerges as a strategic approach to addressing environmental challenges by combining innovation, sustainability, and value generation. This article examines the role of a cooperative in the collection of waste electrical and electronic equipment (WEEE) at a metallurgical company in São Leopoldo, Rio Grande do Sul, following the 2024 floods. Based on an analysis of the environmental and economic impacts of improper WEEE disposal, the study highlights the role of urban mining and partnerships with universities in developing technologies for recovering valuable, critical, and strategic materials, such as rare earth elements. The research demonstrates how environmental entrepreneurship, by integrating sustainable waste management and circular economy principles, contributes to mitigating environmental impacts and strengthens the economic viability of cooperatives. The study concludes that initiatives of this nature are essential for fostering sustainable and innovative business models.

**Keywords:** Environmental entrepreneurship. E-waste. Circular economy. Sustainability.

---

# REFERÊNCIAS

Baldé, C. P., Kuehr, R., Yamamoto, T., Mcdonald, R., D'Angelo, E., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandezcubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, G., Khetriwal, D. S., Luda Di Cortemiglia, V., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N. & Wagner, M. (2024). *The Global E-waste Monitor*.

Brasil. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Recuperado de [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm).

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. *Acordo Setorial: Logística Reversa*. Recuperado de <https://www.mma.gov.br/residuos-s%C3%B3lidos/log%C3%ADstica-reversa/acordo-setorial>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Brasil. (2020). Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Recuperado de <https://www.gov.br/mma/pt-br>.

FEPAM – Sistema de Controle de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR. Fundação Estadual de Proteção Ambiental. Recuperado de <https://mtr.fepam.rs.gov.br/>.

Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R. & Bel, G. (org.). (2020). *Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential*. Recuperado de <https://collections.unu.edu/view/UNU:7737>.

Pourhossein, F. & Mousavi, S. M. (2018). Enhancement of copper, nickel, and gallium recovery from LED waste by adaptation of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Waste Management*, 79, 98–108, 2018.

Pradiian, J. K. (2013). *Environmental Impact Assessment and Bioleaching of Metals from Electronic Waste (E-Waste)*. Tese (Doutorado em Filosofia e Biotecnologia) – Jaypee University of Information Technology, Wajnaghat, Índia, 2013.

Santos, E. C. A. dos, Silva, J. L. C. da, Evaldt, D. C. & Moraes, C. A. M. (2024). Beneficiamento de lâmpadas LED pós-consumo em uma cooperativa de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Recuperado de <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4880>.

Schaltegger, S. & Wagner, M. (2011). Sustainable entrepreneurship and sustainability innovation: categories and interactions. *Business Strategy and the Environment*, 20(4), 222–237.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# MANUFATURA ADITIVA COMO SOLUÇÃO INOVADORA PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS EM LABORATÓRIOS: UM ESTUDO DE CASO COM ADAPTADORES PARA CENTRIFUGAÇÃO DE MICROALGAS

*Betina Mariela Barreto\*, Imar de Souza Soares Junior, Patrik Gustavo Wiesel, Rosana de Cassia de Souza Schneider, Carlos Alexandre Lutterbeck*

---

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul, 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

\*E-mail: [betina.barreto@gmail.com](mailto:betina.barreto@gmail.com)

# RESUMO

A tecnologia de fabricação digital, ou impressão 3D, tem transformado práticas laboratoriais devido à sua flexibilidade e custo reduzido. Este trabalho destaca o desenvolvimento de um adaptador para tubos cônicos tipo Falcon, usado em centrifugações laboratoriais, fabricado por impressão 3D. O projeto foi realizado no *software* SOLIDWORKS e o adaptador foi produzido com filamento PLA (ácido polilático), material biodegradável derivado de fontes renováveis. O uso deste adaptador melhorou a eficiência na separação de biomassa, reduzindo o tempo de centrifugação de 20 para 5 minutos e a rotação de 4000 rpm para 3200 rpm, minimizando desgastes e custos energéticos. Comparado a suportes comerciais, o adaptador impresso proporcionou economia de até 98%, custando R\$ 49,11 por peça, contra valores comerciais de R\$200,00 a R\$3.000,00. Além disso, a impressão 3D permitiu uma personalização adequada às necessidades do equipamento, garantindo estabilidade durante o processo. O estudo evidencia a viabilidade econômica e ambiental da manufatura aditiva no contexto laboratorial, destacando a redução de resíduos plásticos e a mitigação da pegada de carbono. Os resultados demonstram que a impressão 3D é uma solução promissora para a criação de dispositivos científicos personalizados e sustentáveis, promovendo acessibilidade e inovação em pesquisas e práticas laboratoriais.

**Palavras-chave:** Impressão-3D. Colheita-de-biomassa. Microalgas. Adaptador-para-tubo-cônico. Sustentabilidade.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de fabricação digital, também conhecida como impressão 3D ou manufatura aditiva (MA), tem se consolidado como uma ferramenta inovadora em diversos campos (Shahrubudin et al., 2019), como a odontologia (Dawood et al., 2015; Tian et al., 2021), ortopedia e traumatologia (Auricchio & Marconi, 2016), tecnologias para o tratamento de água e remoção de gases (Mallakpour et al., 2021), aplicações biomédicas (Bozkurt & Karayel, 2021), indústria aeroespacial (Martinez et al., 2022), construção civil (Ali et al., 2022), aulas de química (Renner & Grisbeck, 2020) além de contribuir na pesquisa científica e no ambiente laboratorial (Spano et al., 2020; Nys et al., 2023).

Essa tecnologia foi rapidamente absorvida por cientistas, pesquisadores e educadores que buscavam personalizar equipamentos de laboratório existentes ou mesmo construir equipamentos de laboratório sofisticados do zero, por uma mera fração do que costumam as alternativas comerciais (Baden et al., 2015). A impressão 3D tem sido empregada em uma variedade de aplicações, desde a fabricação de *racks* para tubos e placas de ensaio até componentes especializados para equipamentos científicos. Neste cenário, percebe-se uma comunidade crescente de *designers* contribuindo com inovações de código aberto e econômicas que podem ser usadas por profissionais e entusiastas (Coakley & Hurt, 2016). Saggiomo (2022) destaca que até mesmo o conserto de objetos de laboratório de plástico quebrados se tornou extremamente fácil, e muitos suportes de pipetas ou peças de pipetas, conectores e organizadores de mesa passaram a ser produzidos. Não se restringindo a isso, foi realizada a modificação do rotor de uma complexa centrífuga para a separação de plasma sanguíneo, com um simples complemento impresso em 3D (Haque et al., 2021).

Devido a sua capacidade de fabricar peças personalizadas com alta precisão, a partir de materiais diversos, cria-se a possibilidade de soluções adaptadas para problemas específicos (Praveena et al., 2022; Rong et al., 2023). Este avanço tecnológico tem transformado práticas laboratoriais, reduzindo custos, otimizando processos e promovendo maior eficiência. Desta forma, a MA oferece oportunidades de superar os desafios associados à redução de escala de equipamentos que utilizam tecnologias de fabricação tradicionais e materiais de construção, como vidro ou ligas metálicas. Além disso, a MA fornece flexibilidade no projeto e a capacidade de redesenhar e prototipar rapidamente novos modelos, tendo como única limitação a adequação dos materiais de construção disponíveis (Nys et al., 2023).

Um exemplo dessa aplicabilidade surge no contexto da colheita de microalgas. Segundo Barros et al. (2015), este é um dos principais custos associados à produção, pois normalmente representa cerca de 20 – 30% do custo total, devido à alta demanda de energia e custo de capital. Segundo Tan et al. (2020), o processo de colheita visa remover a maior quantidade possível de biomassa de microalgas do meio de cultura, reduzindo as perdas e facilitando o processamento a jusante, como a extração de compostos bioativos. Dentre as técnicas de colheita, destaca-se a centrifugação, que visa separar as células de microalgas do meio de cultura com base na densidade e no tamanho das partículas de cada componente usando força centrífuga (Soomro et al., 2016). Neste contexto, a centrifugação é entendida como um método físico de separação, que depende da geração de uma força centrífuga que atua radialmente e acelera o movimento e a separação das

partículas com base na diferença de densidade entre a partícula suspensa e o meio que a cerca (Najar & Abu-Shamleh, 2020). Ainda, segundo os mesmos autores, a centrifugação é um processo que consome muita energia, podendo variar na faixa de 0,3 a 8 kWh m<sup>-3</sup>, dependendo do modo de operação. Destaca-se ainda que os custos associados à centrifugação tornam suas perspectivas desafiadoras e requerem um aprimoramento constante das técnicas, para tornar o processo mais sustentável (Ghazvini et al., 2022).

Rotineiramente, no laboratório do Centro de Excelência em Produtos e Processos Oleoquímicos e Biotecnológicos (CEPPOB), da Universidade de Santa Cruz do Sul, são utilizados copos convencionais de fundo reto (CC) que apresentam limitações na separação da biomassa devido à sua geometria. Diante desse desafio, buscou-se através da impressão 3D desenvolver adaptadores de fundo cônico para acomodar os tubos tipo Falcon de 500 mL (TFA), buscando melhorar o processo de separação da biomassa de microalga em escala laboratorial. Este artigo explora como a impressão 3D contribuiu para a criação dessa solução, destacando os resultados obtidos e as vantagens dessa tecnologia no ambiente laboratorial.

## 2 PROTOTIPAGEM

O processo de impressão 3D por deposição de material popularizou-se nos últimos anos com o acesso facilitado à aquisição de equipamentos para utilização doméstica. Juntamente à redução de custos dos equipamentos e insumos surgiu uma grande diversidade de materiais para serem utilizados como matéria-prima de impressão. Dentre esses materiais, o denominado PLA (*PolyLactic Acid*) chama a atenção por suas características construtivas. Sendo um material termoplástico não agressivo ao meio ambiente por conter, em sua estrutura, materiais de fontes renováveis como amido de milho, cana de açúcar ou mesmo mandioca, por exemplo (Joseph et al., 2023).

Como elemento fundamental para a difusão da tecnologia, diversos *sites* e desenvolvedores disponibilizam projetos para *download* e posterior impressão, uma ampla gama de *softwares* para o desenvolvimento de projetos e outros tantos *softwares* responsáveis por promover o denominado fatiamento das peças para a linguagem de programação utilizada pelas impressoras Mitchell et al. (2023). Neste sentido, foi elaborado um protótipo que possa servir como base para os recipientes comerciais utilizados em centrífugas laboratoriais. Esses recipientes possuem um corpo com perfil cônico, facilitando o processo de separação de fases quando sujeito às rotações do equipamento centrifugador. Contudo, ao mesmo tempo que ele possui esta característica



de extrema importância para os ensaios, a centrífuga promove a rotação com recipientes que não são cônicos. Assim, para uso de tubos cônicos é necessário uma base de suporte para que este recipiente tenha estabilidade (Figura 1). Para contornar este problema, há no comércio um modelo de suporte para assentar a base do tubo cônico no fundo da centrífuga, no entanto devido ao material utilizado, isso torna o suporte mais caro.



Figura 1. Tubo tipo Falcon de 500 mL utilizado em processos de centrifugação

De forma a propor uma solução economicamente viável, foi desenvolvido o projeto do adaptador para os tubos tipo Falcon utilizando o *software* SOLIDWORKS (2015), atentando para as características dimensionais da centrífuga refrigerada de bancada, modelo SIGMA 6-16KS, a ser utilizada nos ensaios e em parâmetros comerciais apresentados por fabricantes de equipamentos similares. Na Figura 2, podemos observar o desenho detalhado do dispositivo em sua versão final, após a realização de correções e ajustes.

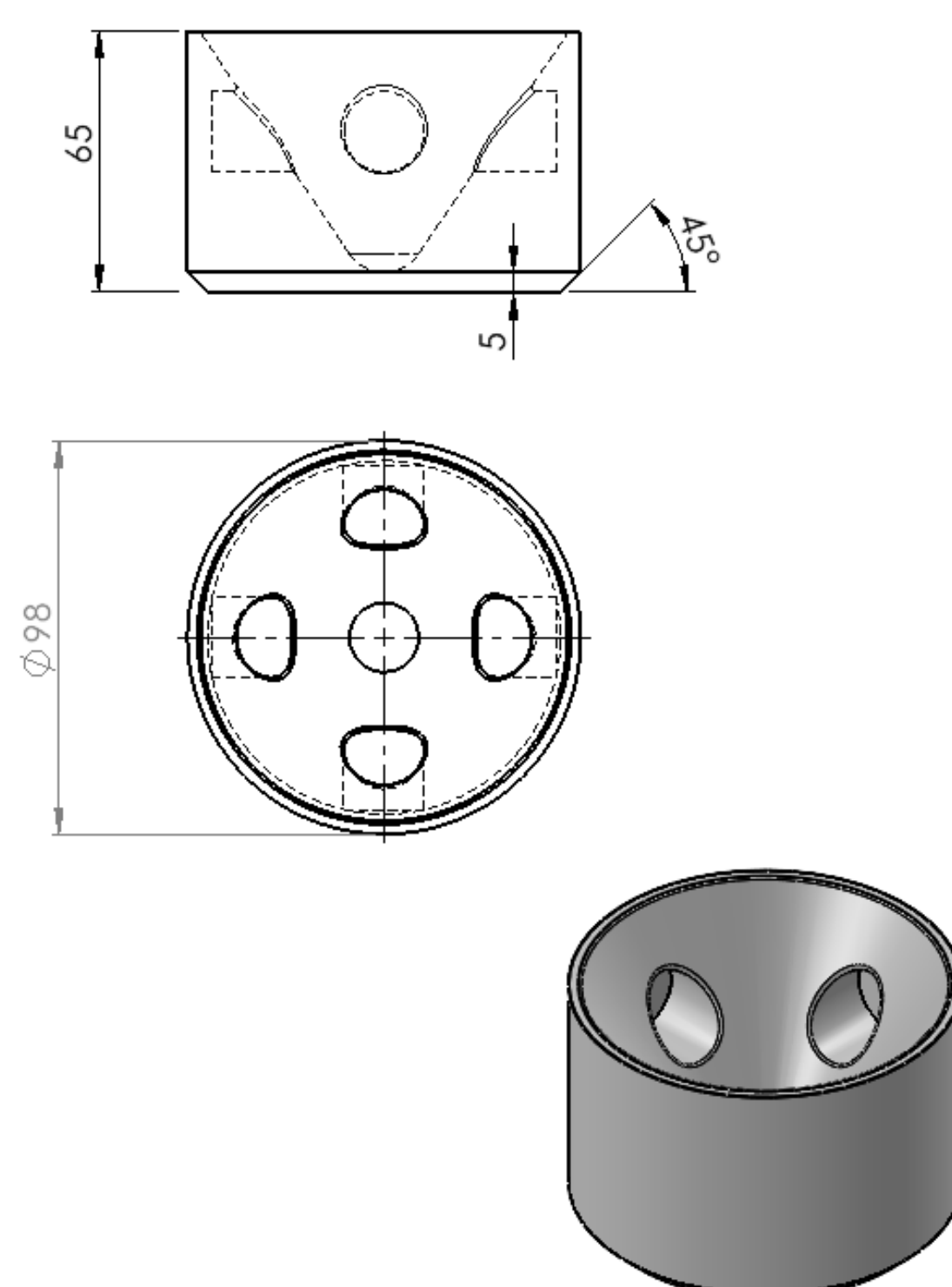


Figura 2. Desenhos técnicos elaborados para o desenvolvimento do adaptador para tubos tipo Falcon de fundo cônico

Com o objetivo de facilitar a retirada do suporte da centrífuga, foram acrescentados entalhes laterais internos que não interferem na funcionalidade do mesmo e garantem praticidade em seu manuseio. Vale, também, ressaltar que por ser uma estrutura que estará sujeita a rotações superiores aos 3000 rpm, a distribuição de massa precisa ser o mais homogênea possível, tendo o mínimo de folga entre a superfície externa do suporte e a parede interna da centrífuga. Todos estes detalhes foram levados em consideração na elaboração do projeto e durante a parametrização da impressão.

Relativo ao *software* de fatiamento utilizado pelas impressoras, atualmente existem diversos gratuitos disponíveis no mercado, cada um com interface própria e capaz de gerar bons resultados. Como utilizamos uma impressora da fabricante Creality denominada KIC, optamos pelo *software* desenvolvido pela mesma empresa denominado “Creality Print” versão 5.1.2. Para imprimir um objeto que atenda a finalidade à qual se propõe, é fundamental conhecermos alguns parâmetros como densidade que devemos selecionar para a peça, velocidade de deposição de material e temperaturas do bico de extrusão e da mesa de impressão são importantes. Todos estes elementos estão relacionados ao tipo de material a ser utilizado e às características estruturais do equipamento de impressão (Ahmed, Hussain, Altaf, Ali et al., 2020).

Neste projeto, utilizamos o material denominado *Hyper PLA*, capaz de suportar maiores temperaturas de fusão para, desta forma, conseguirmos aumentar a velocidade de deposição dele. Na Figura 3, podemos observar alguns dos parâmetros utilizados na impressão do adaptador para tubo tipo Falcon, chamando a atenção para o tempo de impressão, massa de material, densidade utilizada e camadas superficiais maciças.

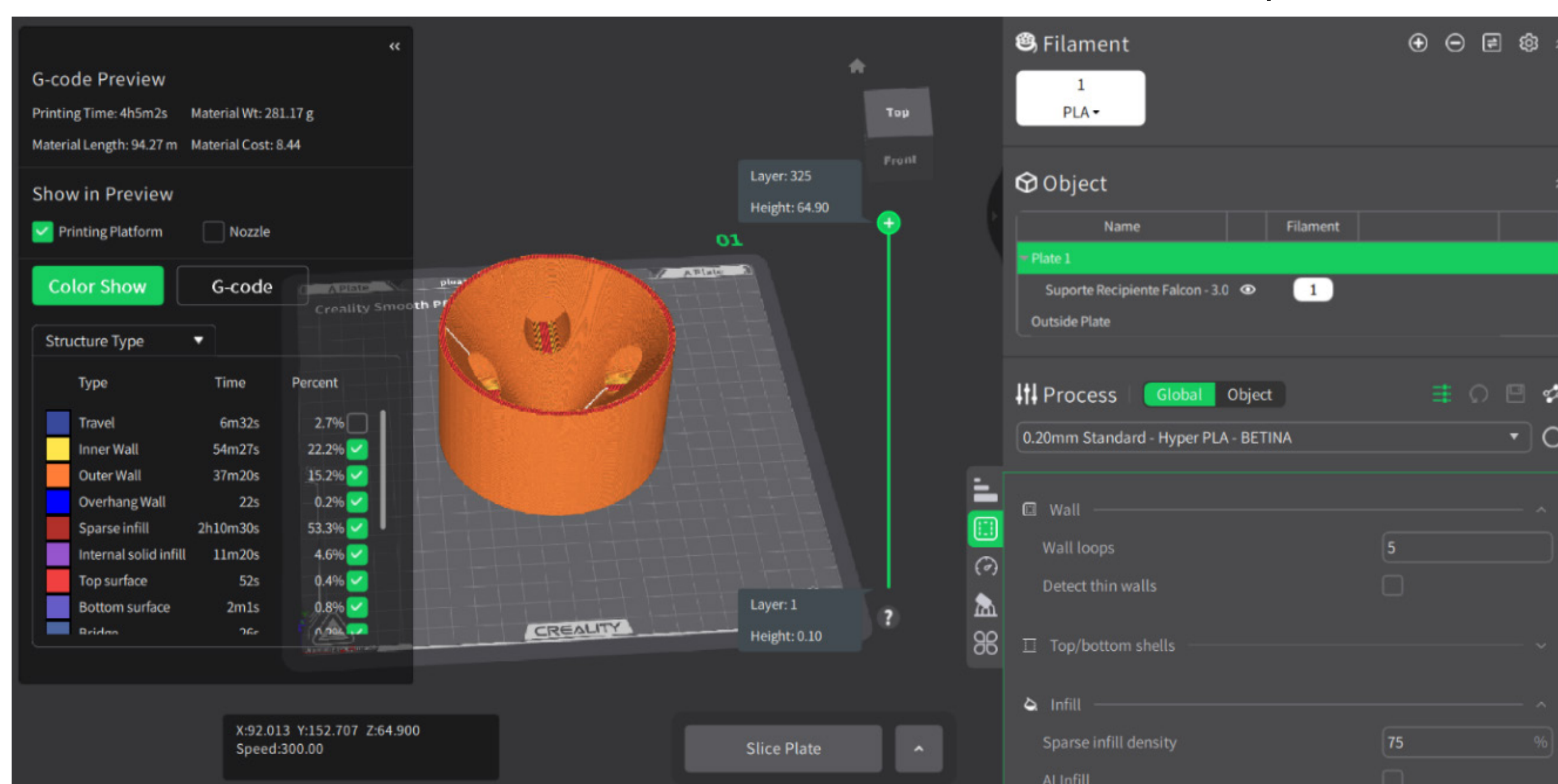


Figura 3. Adaptador para tubo tipo Falcon em processo de fatiamento para impressão

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 EFICIÊNCIA OPERACIONAL E REDUÇÃO DE CUSTOS

Os TFAs apresentaram uma eficiência superior na separação da biomassa em comparação aos CCs utilizados na centrifugação. O tempo de processamento foi reduzido em 75%, passando de 20 min para 5 min em cada batelada, quando comparado à metodologia convencional empregada no laboratório. A partir disso, foi possível reduzir em 20% a velocidade de rotação, passando de 4000 rpm para 3200 rpm, o que minimizou as turbulências internas e pode contribuir para um menor desgaste dos componentes internos do equipamento durante o processo de separação da biomassa. Esta otimização permitiu uma redução expressiva, de tempo e velocidade do rotor, quando comparada à metodologia utilizada por Costa (2018) que empregou condições de centrifugação com 4500 rpm em um período de 18 min. Neste mesmo sentido, Mitchell et al. (2023) desenvolveram um sistema de centrífuga cônica, impresso em 3D para separação de partículas finas, tendo uma recuperação de até 74%, validando a eficácia do sistema. Neste mesmo sentido, Moreno et al. (2022), desenvolveram uma centrífuga de laboratório por impressão 3D utilizando filamentos de ácido polilático (PLA), alcançando uma velocidade de 3350 rpm sem interferências e vibração.

Os testes comparativos para avaliar a eficiência e o desempenho entre TFA e CC podem ser observados na Figura 5, sendo a etapa inicial representada na imagem **A**, na qual em ambos os frascos o volume e a densidade da amostra são iguais. Após a centrifugação, imagem **B**, é possível observar através da transparência do líquido a eficácia do TFA nessa separação. A imagem **C** demonstra que a geometria do TFA é o fator que influenciou a separação total da biomassa quando comparado ao CC.



Figura 4. Teste demonstrativo da eficiência na colheita da biomassa A) Uso dos tubos tipo Falcon e copos convencionais, antes do processo de centrifugação B) Aspecto visual após o processo de centrifugação C) Eficiência da separação utilizando o tubo cônico

A fabricação do adaptador de fundo cônico por impressão 3D proporcionou uma redução considerável no custo da peça, quando comparado ao valor de mercado ofertado pelos representantes comerciais da centrífuga. O custo comercial do adaptador de fundo cônico variou entre R\$200,00 e R\$3.000,00 a unidade. Enquanto os adaptadores impressos em 3D tiveram um custo total por peça de R\$49,11, uma economia de até 98%, conforme Figura 4.

O tempo de impressão e a massa de material utilizados foram importantes para a estimativa dos custos de fabricação do adaptador. Desta forma, utilizando uma planilha de Excel® e o valor médio da energia elétrica kWh, para o mês de novembro 2024 na região de Santa Cruz do Sul – RS, foi possível chegar a uma estimativa do custo de fabricação do protótipo. Este valor pode subir, um pouco, se levarmos em consideração a depreciação do equipamento e as intervenções de manutenção que eventualmente podem se fazer necessárias, contudo, está muito próximo do valor real. Na planilha apresentada, existem espaços para incluir os valores referentes ao desenvolvimento de projeto e lucro esperado, contudo, este trabalho não objetivou fins comerciais, sendo assim, deixados de fora da estimativa. Comparativamente, Byagathvalli et al. (2018) desenvolveram uma centrífuga em 3D, denominada 3D-Fuge, capaz de centrifugar uma ampla variedade e volumes de soluções, como amostras para aplicações de biomarcadores e realizar extrações de nucleotídeos, destacando a alta eficiência do equipamento e a importância do desenvolvimento de dispositivos científicos de baixo custo para utilização em laboratórios de pesquisa. Cristaldi et al. (2021) desenvolveram reatores para centrífugas, em impressão 3D, destacando o baixo tempo de impressão que variou de 4 a 6 h e o baixo custo do dispositivo que foi de 1,2 libras, sendo 4,5 vezes menor que o custo de um sistema convencional.

A utilização da impressão 3D nos permitiu o uso de materiais biodegradáveis como é o caso do PLA, que ajuda na redução de resíduos plásticos no processo. Além disso, a redução do consumo energético também favorece a mitigação da pegada de carbono, como por exemplo, na diminuição de 75% no tempo de centrifugação, que apresentou uma economia de 17,7 g de CO<sub>2</sub> por batelada.

| Informações Gerais                |   |               |                                       |                        |
|-----------------------------------|---|---------------|---------------------------------------|------------------------|
| Potência apresentada em:          |   | kWh           | Tempo apresentado no formato:         | horas:minutos:segundos |
| Massa apresentada em:             |   | gramas        | Unidade Financeira:                   | Reais (R\$)            |
| <b>Dados de Entrada</b>           |   |               |                                       |                        |
| Valor do kWh (RGE)                | = | R\$ 0,9147369 | Custo de Energia (R\$)                |                        |
|                                   |   |               | R\$ 1,31                              |                        |
| Valor do kg do Material           | = | R\$ 170,00    | Custo de Material (R\$)               |                        |
|                                   |   |               | R\$ 47,80                             |                        |
| <b>Dados de Impressão</b>         |   |               |                                       |                        |
| Tempo de Impressão                | = | 04h:05min:02s | =                                     | 4,084 h                |
| Massa da Peça Impressa            | = | 281,17 g      | Custo de Mão de Obra Engenharia (R\$) |                        |
|                                   |   |               | R\$ 0,00                              |                        |
| <b>Hora Homem + Lucratividade</b> |   |               |                                       |                        |
| Valor hora/Engenharia             | = | R\$ 0,00      | Lucro (R\$)                           |                        |
|                                   |   |               | R\$ 0,00                              |                        |
| Tempo de Engenharia               | = | 00h:00min:00s | =                                     | 0,000 h                |
| Lucro (%)                         | = | 0,00%         | <b>Valor de Venda</b>                 |                        |
|                                   |   |               | R\$ 49,11                             |                        |

Figura 5. Estimativa de custo de fabricação do adaptador para tubo tipo Falcon

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou como a manufatura aditiva, por meio da impressão 3D, pode ser uma solução eficiente, econômica e sustentável para desafios enfrentados em laboratórios. O desenvolvimento de um adaptador para tubos cônicos tipo Falcon permitiu melhorias significativas na centrifugação de biomassa de microalgas, reduzindo o tempo de processamento em 75% e o consumo de energia devido à menor rotação requerida. Além disso, o custo de produção do adaptador foi até 98% inferior ao de alternativas comerciais, destacando a viabilidade econômica dessa abordagem.

O uso do filamento PLA, um material biodegradável, reforça os benefícios ambientais dessa tecnologia, contribuindo para a redução de resíduos plásticos e para a mitigação da pegada de carbono associada às atividades laboratoriais. A flexibilidade e precisão da impressão 3D também viabilizaram a personalização do adaptador, garantindo estabilidade e funcionalidade adequadas ao equipamento utilizado. Os resultados evidenciam o potencial da impressão 3D como ferramenta para otimização de processos laboratoriais, tornando tecnologias avançadas mais acessíveis e adaptáveis. Este trabalho, além de demonstrar a aplicabilidade prática da manufatura aditiva, abre caminho para futuras inovações que promovam maior eficiência, sustentabilidade e redução de custos em diferentes áreas da pesquisa científica e tecnológica.

# AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Capes – Código 001, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq – processo 306216/2022-1 e à Secretaria de Inovação, Ciência e Tecnologia do RS, Scit-RS – processo 22/2500-000020/2022-01.

---

## ADDITIVE MANUFACTURING AS AN INNOVATIVE SOLUTION FOR PROCESS OPTIMIZATION IN LABORATORIES: A CASE STUDY WITH ADAPTERS FOR MICROALGAE CENTRIFUGATION

**ABSTRACT:** Digital manufacturing technology, or 3D printing, has revolutionized laboratory practices due to its flexibility and cost-effectiveness. This study highlights the development of an adapter for Falcon-type conical tubes used in laboratory centrifugation, manufactured via 3D printing. The design was created using SOLIDWORKS *software*, and the adapter was produced with PLA filament, a biodegradable material derived from renewable resources. The use of this adapter enhanced biomass separation efficiency, reducing centrifugation time from 20 to 5 minutes and rotation speed from 4000 rpm to 3200 rpm, minimizing wear and energy costs. Compared to commercial supports, the 3D-printed adapter achieved cost savings of up to 98%, with a production cost of R\$ 49.11 per unit, compared to commercial prices ranging from R\$ 200 to R\$ 3000. Additionally, 3D printing enabled tailored customization to equipment needs, ensuring stability during operation. This study underscores the economic and environmental feasibility of additive manufacturing in laboratory settings, emphasizing the reduction of plastic waste and the mitigation of carbon footprint. The results demonstrate that 3D printing offers a promising solution for developing customized and sustainable scientific devices, fostering accessibility and innovation in research and laboratory practices.

**Keywords:** 3D Printing. Biomass Harvesting. Microalgae. Conical Tube Adapter. Sustainability.

---

# REFERÊNCIAS

- Ahmed, S. W., Hussain, G., Altaf, K., Ali, S. et al. (2020). On the effects of process parameters and optimization of interlaminar bond strength in 3D printed ABS/CF-PLA composite. *Polymers*, 12(9), C7 – 2155.
- Ali, M. H., Issayev, G., Shehab, E. & Sarfraz, S. (2022). A critical review of 3D printing and digital manufacturing in construction engineering. *Rapid Prototyping Journal*, 28(7), 1312-1324.
- Auricchio, F. & Marconi, S. (2016). 3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology. *EFORT open reviews*, 1(5), 121-127.
- Baden, T., Chagas, A. M., Gage, G., Marzullo, T., Prieto-Godino, L. L. & Euler, T. (2015). Open Labware: 3-D printing your own lab equipment. *PLoS biology*, 13(3), e1002086.
- Barros, A. I., Gonçalves, A. L., Simões, M. & Pires, J. C. (2015). Harvesting techniques applied to microalgae: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 1489-1500.
- Bozkurt, Y. & Karayel, E. (2021). Tecnologia de impressão 3D; métodos, aplicações biomédicas, oportunidades e tendências futuras. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1430-1450.
- Byagathvalli, G., Pomerantz, A., Sinha, S., Standeven, J. & Bhamla, M. S. (2019). A 3D-printed hand-powered centrifuge for molecular biology. *PLoS biology*, 17(5), e3000251.
- Coakley, M. & Hurt, D. E. (2016). 3D printing in the laboratory: maximize time and funds with customized and open-source labware. *Journal of laboratory automation*, 21(4), 489-495.
- Costa, M. H. J. D. (2018). *Cultivo de microalgas em efluentes da piscicultura visando a obtenção de biomassa com potencial proteico para aplicação em ração animal*.
- Cristaldi, D. A., Labanca, A., Pottinger, T. D., Owen, J., Stulz, E., Zhang, X. & Carugo, D. (2021). 3D printed reactor-in-a-centrifuge (RIAC): Making flow-synthesis of nanoparticles pump-free and cost-effective. *Chemical Engineering Journal*, 425, 130656.

Dawood, A., Marti, B. M., Sauret-Jackson, V. & Darwood, A. (2015). Impressão 3D em odontologia. *British dental journal*, 219(11), 521-529.

Ghazvini, M., Kavosi, M., Sharma, R. & Kim, M. (2022). A review on mechanical-based microalgae harvesting methods for biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106348.

Haque, M. E., Marriott, L., Naeem, N., Henry, T., Conde, A. J. & Kersaudy-Kerhoas, M. (2021). Design, 3D-printing, and characterisation of a low-cost, open-source centrifuge adaptor for separating large volume clinical blood samples. *bioRxiv*, 10.

Joseph, T. M., Kallingal, A., Suresh, A. M., Mahapatra, D. K., Hasanin, M. S., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2023). 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(3), 1015-1035.

Khosravani, M. R. & Reinicke, T. (2020). On the Environmental Impacts of 3D Printing Technology. *Applied Materials Today*, 20, 100689.

Mallakpour, S., Azadi, E. & Hussain, C. M. (2021). MOF/COF-based materials using 3D printing technology: applications in water treatment, gas removal, biomedical, and electronic industries. *New Journal of Chemistry*, 45(30), 13247-13257.

Martinez, D. W., Espino, M. T., Cascolan, H. M., Crisostomo, J. L. & Dizon, J. R. C. (2022). A comprehensive review on the application of 3D printing in the aerospace industry. *Key engineering materials*, 913, 27-34.

Mitchell, K., Urade, S., Kershaw, A., Chu, P. & Jin, Y. (2023). 3D printing of conical centrifuge system for mineral particle separation. *Separation and Purification Technology*, 306, 122567.

Moreno, L. F. A., Vasquez, A. G. G., Pastrana, E. C. & Pastrana, R. Y. (2022). Design, development, and implementation of 3D-printed polylactic acid centrifuge rotors for laboratory-scale applications. *Química Nova*, 45(10), 1284-1288.

Najjar, Y. S. & Abu-Shamleh, A. (2020). Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: a review. *Algal Research*, 51, 102046.



Nys, N., König, M., Neugebauer, P., Jones, M. J. & Gruber-Woelfler, H. (2023). Additive Manufacturing as a Rapid Prototyping and Fabrication Tool for Laboratory Crystallizers – A Proof-of-Concept Study. *Organic Process Research & Development*, 27(8), 1455–1462.

Praveena, B. A., Lokesh, N., Buradi, A., Santhosh, N., Praveena, B. L. & Vignesh, R. (2022). A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1309–1313.

Renner, M. & Griesbeck, A. (2020). Think and print: 3D printing of chemical experiments. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3683–3689.

Rong, L., Chen, X., Shen, M., Yang, J., Qi, X., Li, Y. & Xie, J. (2023). The application of 3D printing technology on starch-based product: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 149–161.

Shahrubudin, N., Lee, T. C. & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manufacturing*, 35, 1286–1296.

Soomro, R. R., Ndikubwimana, T., Zeng, X., Lu, Y., Lin, L. & Danquah, M. K. (2016). Development of a two-stage microalgae dewatering process—a life cycle assessment approach. *Frontiers in plant science*, 7, 113.

Spano, M. B., Tran, B. H., Majumdar, S. & Weiss, G. A. (2020). 3D-printed labware for high-throughput immobilization of enzymes. *The Journal of organic chemistry*, 85(13), 8480–8488.

Tian, Y., Chen, C., Xu, X., Wang, J., Hou, X., Li, K., ... & Jiang, H. B. (2021). A review of 3D printing in dentistry: Technologies, affecting factors, and applications. *Scanning*, 2021(1), 9950131.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# DETERMINAÇÃO DIRETA DE CARBONO NO SOLO POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO: UMA TECNOLOGIA ANALÍTICA LIMPA APLICADA À ANÁLISE DE SOLOS

*Letiéri da Rosa Freitas<sup>1</sup>, José Guilherme Lenz Abich<sup>2</sup>, Eduarda Luedtke de Avelar<sup>2</sup>, Fernando Gaedke da Costa<sup>3</sup>, Gilson Augusto Helfer<sup>4</sup>, Adilson Ben da Costa<sup>1, 4\*</sup>*

---

1 Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul, 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

2 Curso de Agronomia, Universidade de Santa Cruz do Sul, 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

3 Escola de Educação Básica Educar-se, 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

4 Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais, Universidade de Santa Cruz do Sul, 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

\*E-mail: [adilson@unisc.br](mailto:adilson@unisc.br)

# RESUMO

Devido à crescente demanda em análises de solos, é necessário adequar as metodologias que são utilizadas em laboratórios de rotina. Apesar de confiáveis, as metodologias tradicionais são poluentes e demoradas, por isso é necessário encontrar métodos analíticos que sejam mais rápidos, confiáveis e sustentáveis. Nesse sentido, a espectroscopia está evoluindo como uma metodologia alternativa para análises de propriedades do solo. Essas tecnologias de precisão têm se revelado uma estratégia eficaz para aumentar a produtividade agrícola, promovendo o uso eficiente de insumos e reduzindo o impacto ambiental. O objetivo desse estudo foi avaliar a *performance* do modelo PLS (do inglês Partial Least Squares) e do modelo cubista na predição de carbono em um conjunto de amostras de solo. No pré-processamento dos dados, todos os espectros de infravermelho das 178 amostras de solo foram submetidos à transformação pela primeira derivada, seguida de alisamento utilizando o método Savitzky-Golay. O modelo PLS apresentou melhor desempenho em comparação com o modelo cubista. A espectroscopia combinada com quimiometria oferece um método não destrutivo e livre de reagentes químicos para análises, alinhando-se à demanda por tecnologias ambientais limpas e redução de passivos ambientais. O modelo PLS demonstrou ser uma abordagem promissora para quantificação de propriedades dos solos, superando o desempenho do modelo Cubista e reforçando seu papel em tecnologias sustentáveis. O uso da linguagem Python no ambiente Google Colab foi destacado como uma ferramenta eficiente para análise de dados e colaboração, além de ser uma solução prática e acessível para projetos científicos.

**Palavras-chave:** Química analítica verde. Análise do solo. Regressão por mínimos quadrados parciais. Modelo cubista. Python.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A quantificação do teor de carbono no solo tornou-se de suma importância devido à crescente relevância dos créditos de carbono, que incentivam práticas agrícolas sustentáveis e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Além de monitorar a capacidade de sequestro de carbono das áreas agrícolas, florestais e pastoris, essa prática auxilia no manejo adequado da matéria orgânica e na construção de uma agricultura mais resiliente e de baixo carbono. Em regiões tropicais e subtropicais, o solo submetido

ao manejo correto pode atuar como um importante sumidouro de carbono atmosférico (Das, Chatterjee & Rajbanshi, 2022).

Devido à crescente demanda, a determinação de carbono no solo tem se tornado cada vez mais frequente, exigindo avanços na capacidade analítica para atender à necessidade de resultados rápidos e eficientes, sem comprometer a qualidade e a confiabilidade das informações obtidas. As metodologias clássicas para determinação de carbono orgânico do solo (COS), como o método por via úmida de Walkley-Black, são muito precisas, porém devem ser consideradas algumas desvantagens como a geração de resíduos tóxicos que exigem tratamento adicional (De Oliveira Morais et al., 2019).

Atualmente, considerando a inovação tecnológica e os princípios da química analítica verde aplicados às análises agronômicas, é esperado que as análises sejam cada vez mais rápidas, eficientes e sustentáveis. O uso de novas tecnologias é essencial para otimizar a coleta de informações, além de contribuir para decisões corretas na gestão e no manejo dos recursos naturais. Nesse sentido, a utilização da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para as análises agronômicas está sendo explorada como uma alternativa promissora, por não gerar resíduos tóxicos e permitir a análise rápida de grandes volumes de amostras (Da Silva et al., 2024).

Os espectros das amostras de solo são relacionados com informações de referência usando modelos matemáticos, entre os quais estão os de regressão multivariada, que podem ser utilizados para prever propriedades do solo de novas amostras, onde apenas a análise espectral é necessária, sendo assim preservada a amostra (Ten Caten et al., 2021). O potencial da espectroscopia no infravermelho para quantificar o COS é conhecido, porém, há carência de informações sobre a aplicabilidade e a comparação entre os valores de carbono obtidos pelos modelos e pelos métodos químicos laboratoriais mais utilizados no Brasil (Rosin et al., 2021).

A pesquisa em espectroscopia Vis-NIR (na região do visível e infravermelho próximo) na ciência do solo está avançando, com esforços para organizar os dados de análise espectral em bibliotecas espectrais para a construção de modelos preditivos do conteúdo do COS em diferentes escalas geográficas (Moura-Bueno et al., 2020). Diversos fatores podem influenciar a precisão das análises espectroscópicas, exigindo estudos para compreender e otimizar a utilização da espectroscopia na análise do solo. Para melhorar a performance dos modelos, é muito importante selecionar os métodos de pré-processamento apropriados antes da modelagem, visando a redução de ruído, redução de dimensionalidade e transformação dos dados (Shen et al., 2021). Embora seja difícil encontrar o melhor pré-processamento, é, de fato, possível utilizar um pré-

processamento inadequado devido a configurações incorretas dos parâmetros, como o tamanho da janela e/ou as funções de suavização na estimativa da derivada e nas técnicas de janela móvel (Rinnan, Den Berg & Engelsen, 2009).

Entre os modelos utilizados, o método de regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS, do inglês *Partial Least Squares*) é amplamente utilizado nos estudos que realizam a análise de carbono por NIR (Singha et al., 2023; Lucà et al., 2017; Pudelko & Chodak, 2020). O PLS é um modelo multivariado treinado com a faixa de espectro total, então inclui comprimentos de onda não relacionados às variações da resposta (Miloš, Bensa & Japundžić-Palenkić, 2022). Outro modelo que está sendo estudado para essa aplicação é o modelo cubista. Esse método gera modelos preditivos baseados em regras que segmentam os dados e ajustam um modelo de regressão linear, seguindo o princípio da parcimônia (o melhor modelo explica as tendências com menos variáveis, sem comprometer o desempenho); garantindo a robustez do modelo na modelagem de solos (John et al., 2021). Em um estudo conduzido nos EUA, com um banco de dados bem diverso, foi possível concluir que a modelagem pode fornecer boas previsões de várias propriedades do solo (Dangal et al., 2021). Nesse mesmo estudo, os métodos baseados em memória (*memory-based learner* – MBL) e o método cubista superaram os modelos PLS e *random forest*, considerando a biblioteca espectral que foi avaliada.

O objetivo desse estudo foi avaliar a *performance* do modelo PLS e do modelo cubista na predição de carbono em um conjunto de amostras de solo. Assim, com o propósito de desenvolver um procedimento analítico acessível, os modelos foram feitos utilizando a linguagem de programação Python. O trabalho foi conduzido no ambiente Google Colab, que oferece uma plataforma interativa baseada em nuvem, permitindo a execução de códigos, análise de dados e visualização gráfica de forma eficiente.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL OU METODOLOGIA

### 2.1 ORIGEM DAS AMOSTRAS

O conjunto de dados foi composto por 178 amostras de solo coletadas em diversos locais do Brasil, analisadas pela Central Analítica da Universidade de Santa Cruz do Sul. O conjunto de dados é heterogêneo e contém amostras de diversas classes de solo e teores de carbono.

## 2.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

Para reduzir a interferência da umidade e de granulometria das amostras, elas foram acondicionadas em caixas de papelão de 300 cm<sup>3</sup> secas em estufa (modelo MA 037, Marconi), com circulação de ar por um período de, no mínimo, 24 horas na temperatura de 45 a 60°C. Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho de martelo (modelo N1040, Marconi), passadas na peneira de 1 mm, e armazenadas (novamente) nas respectivas caixas de papelão.

## 2.3 METODOLOGIA ANALÍTICA DE REFERÊNCIA

Além da determinação de carbono, a concentração de nitrogênio e matéria orgânica também foi determinada nas amostras de solo, com o propósito de apresentar uma melhor caracterização das amostras utilizadas neste estudo. Assim, o teor de carbono e nitrogênio (g/kg) das amostras foi determinado por meio de combustão a seco pelo método de Dumas. Para realizar esta análise, uma massa de amostra de aproximadamente 3,5 mg foi introduzida em um analisador elementar Flash EA 1112 (Thermo Electron Instruments Corp., Milan, IT), seguindo a metodologia descrita pelo fabricante.

Para a quantificação da concentração de matéria orgânica, foi utilizado o método de Walkley-Black que envolve a oxidação de matéria orgânica por uma solução sulfocrômica. Neste processo, o dicromato de potássio é reduzido por compostos de carbono orgânico. A quantidade de dicromato não reduzido é então determinada por espectrofotometria a 645 nm (Teixeira et al, 2017).

## 2.4 AQUISIÇÃO DOS ESPECTROS DE INFRAVERMELHO

Um espectrofotômetro Spectrum 400 (Perkin Elmer, USA), equipado com um acessório de reflectância no infravermelho próximo (NIRA), foi utilizado para a aquisição dos espectros de infravermelho entre 1000 e 2500 nm com a resolução de 2 nm, adquirido em duplicatas.

## 2.5 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE CALIBRAÇÃO

O método foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python no ambiente Google Colab, que oferece uma plataforma interativa baseada em nuvem, permitindo a execução de códigos, análise de dados e visualização gráfica de forma eficiente. Este ambiente foi escolhido por sua acessibilidade, facilidade de compartilhamento e integração com bibliotecas científicas amplamente utilizadas, como NumPy, Pandas,

Matplotlib e Scikit-learn. O Chatbot do Gemini no ambiente Google Colab foi utilizado para auxiliar na geração dos códigos de programação e na solução de erros.

Inicialmente, foi conduzida uma análise descritiva dos dados, a fim de explorar suas características fundamentais, como medidas de tendência central, dispersão e identificação de possíveis *outliers*. Este processo permitiu um entendimento inicial das variáveis envolvidas, garantindo maior precisão nas etapas subsequentes.

Para a modelagem multivariada, foram desenvolvidos dois modelos principais: Calibração por Mínimos Quadrados Parciais (PLS) e um modelo baseado no método Cubista. O modelo PLS foi utilizado para correlacionar os espectros ou outras variáveis preditoras com os valores de referência, enquanto o Cubista explorou regras de decisão para melhorar a previsão e interpretar os padrões presentes nos dados. Como estratégia de pré-processamento dos dados, todos os espectros de infravermelho foram submetidos à transformação pela primeira derivada, seguida de alisamento utilizando o método Savitzky-Golay, com uma janela de 5 pontos (Rinnan, Den Berg & Engelsen, 2009). Como estratégia de identificação de amostras anômalas, foram consideradas todas as amostras com valor de resíduo superior a duas vezes o desvio padrão.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

A análise descritiva dos resultados do conjunto de 178 amostras de solo, realizada em duplicata (356 resultados por variável), apresentaram valores médios de carbono de 20,40 g/kg, com valores entre 3,10 e 39,26 g/kg. O resultado médio para matéria orgânica foi de 29,12 g/kg. Para nitrogênio, o valor médio foi de 1,73 g/kg. A Tabela 1 apresenta os resultados da análise descritiva e a Figura 1 o histograma de frequência para as concentrações de matéria orgânica, nitrogênio e carbono.

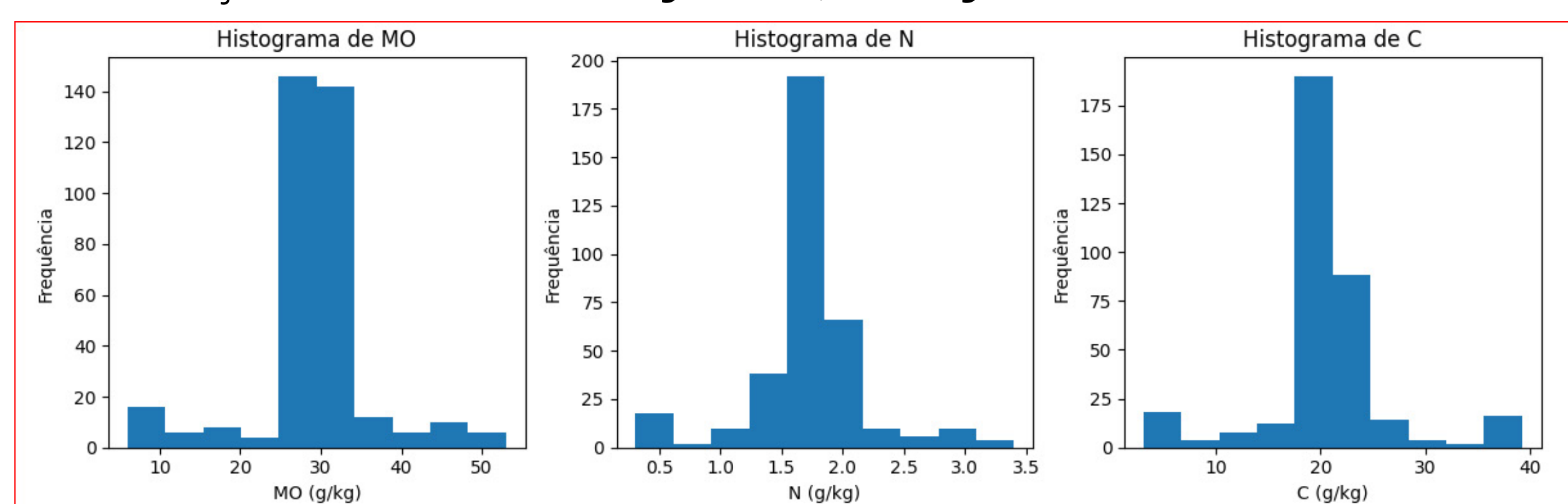


Figura 1. Histograma de frequência para resultados de matéria orgânica (MO), nitrogênio (N) e carbono (C) nas amostras de solo.

Tabela 1. Resultados da análise descritiva dos resultados para matéria orgânica (MO), nitrogênio (N) e carbono (C) nas amostras de solo

| Parâmetros          | Carbono | Nitrogênio | Matéria orgânica |
|---------------------|---------|------------|------------------|
| Número de amostras  | 356     | 356        | 356              |
| Média, g/kg         | 20,40   | 1,73       | 29,12            |
| Desvio padrão, g/kg | 6,01    | 0,47       | 7,16             |
| Valor mínimo, g/kg  | 3,10    | 0,31       | 6,00             |
| 25%, g/kg           | 18,66   | 1,59       | 27,00            |
| 50%, g/kg           | 20,10   | 1,72       | 29,00            |
| 75%, g/kg           | 22,18   | 1,87       | 31,00            |
| Valor máximo, g/kg  | 39,26   | 3,40       | 53,00            |

### 3.2 ESPECTROS DE INFRAVERMELHO

Nas amostras de solo, a região NIR apresenta harmônicos e combinações de bandas vibracionais das ligações C-H, N-H e O-H, associadas à matéria orgânica, carbonatos, águas residuais e minerais argilosos. A Figura 2 apresenta o perfil dos espectros de infravermelho do conjunto de amostras analisadas, com destaque para o pico de absorção em 1.400 nm, relacionado à vibração de estiramento das hidroxilas, indicando a presença de fenóis, álcoois e hidróxidos de alumínio em argilominerais como a caulinita. A maioria dos solos tropicais é muito intemperizada-lixiviada, rica em caulinita e óxidos de Al e Fe, portanto, picos de alongamento de quartzo fundamental (O-Si-O) devem ocorrer entre 1500 e 1000 nm (De Sousa Mendes et al., 2022).

Já o pico de alta absorção em 1.900 nm está relacionado às moléculas de água livre presentes em minerais. Outra região importante ocorre entre 2.200 e 2.500 nm estão associadas às vibrações de estiramento OH e flexão metal-OH, como em 2.200 nm, que indicam a presença de Al-OH (Rossel, Mcglynn & Mcbratney, 2006).



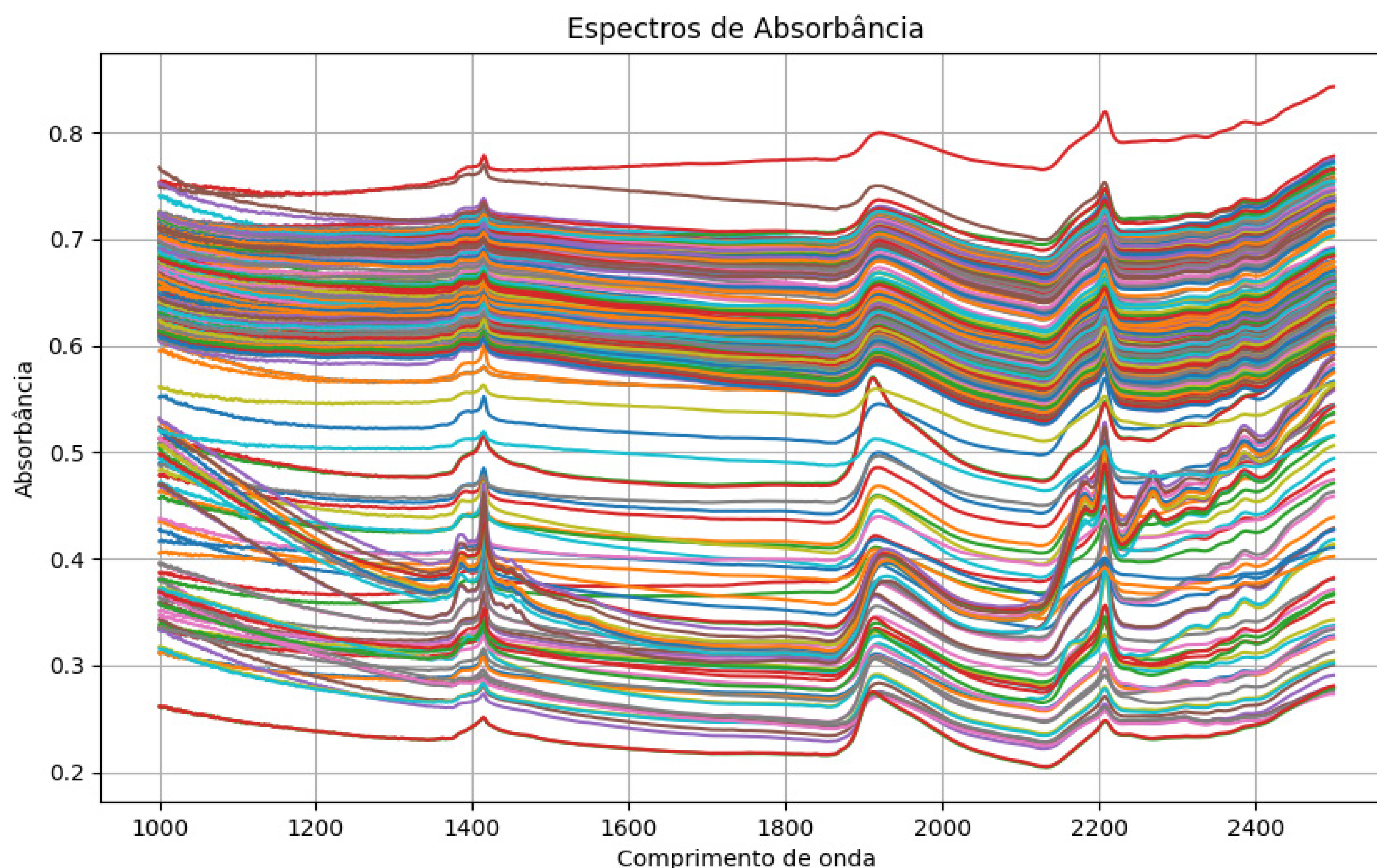


Figura 2. Perfil dos espectros de infravermelho das amostras de solo, na região entre 1000 e 2500 nm.

### 3.2 RESULTADOS DOS MODELOS DE CALIBRAÇÃO

Os resultados apresentados pelo modelo PLS apresentam valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz quadrada do erro médio de calibração (RMSE, no inglês Root Mean Squared Error) de 0,94 e 1,10 g/kg, respectivamente, utilizando 6 variáveis latentes. A avaliação por validação cruzada resultou em valores de  $R^2$  de 0,59, RMSE de 2,8 g/kg. Estes resultados foram obtidos após a exclusão de 29 amostras anômalas (Figura 3).

O modelo cubista apresentou valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e RMSE de 0,88 e 1,6 g/kg, respectivamente. A avaliação por validação cruzada resultou em valores de  $R^2$  e RMSE de -0,84 e 6,3 g/kg, respectivamente, após a exclusão de 23 amostras anômalas (Figura 4). Estes resultados indicam que a performance do modelo de regressão por mínimos quadrados parciais teve um desempenho superior ao apresentado pelo modelo cubista, contudo estudos sobre a utilização de outras estratégias de pré-processamento dos espectros ainda devem ser executados para melhorar a qualidade dos resultados destes modelos.

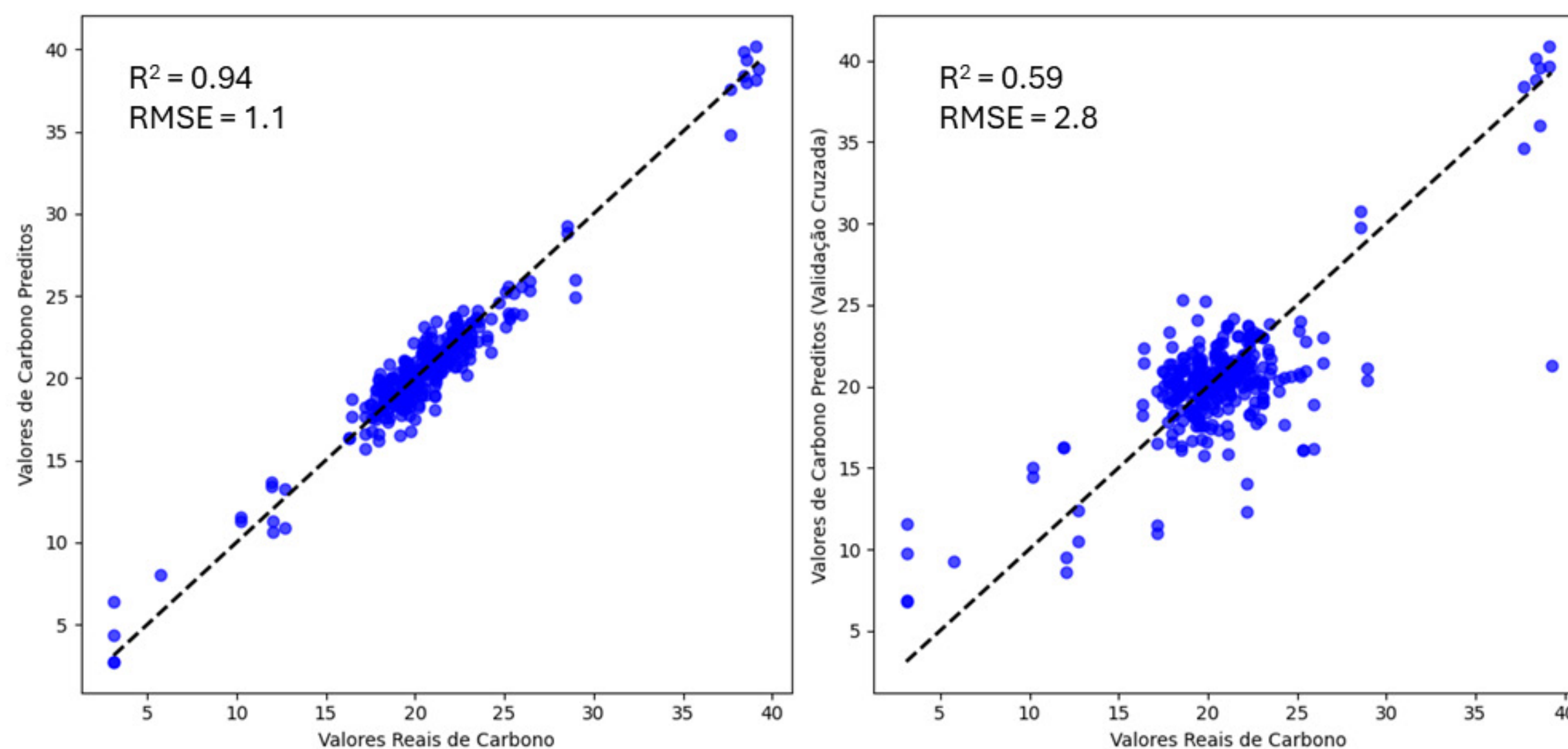


Figura 3. Correlação entre os valores reais de carbono (em g/kg), determinados pelo método de referência e os valores preditos pelo modelo de regressão PLS obtidos na calibração e no teste de validação cruzada

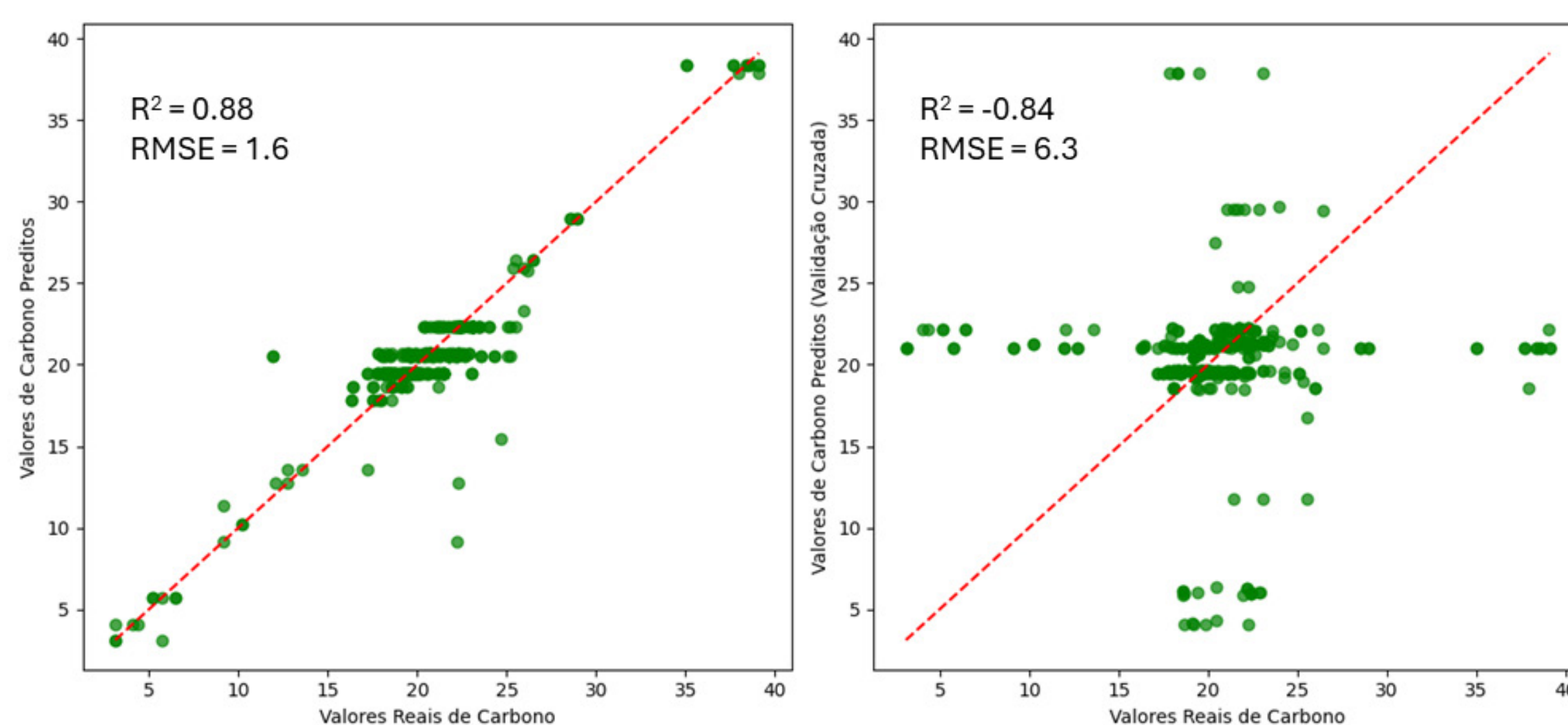


Figura 4. Correlação entre os valores reais de carbono (em g/kg), determinados pelo método de referência e os valores preditos pelo modelo de regressão Cubista obtidos na calibração e no teste de validação cruzada

A escolha apropriada do pré-processamento Vis-NIR pode otimizar o desempenho da calibração PLS para estimar propriedades do solo, além disso, essa metodologia é uma ferramenta poderosa para estimar propriedades do solo de forma rápida, não destrutiva e de baixo custo (Miloš, Bensa & Japundžić-Palenkić, 2022). Propriedades como a matéria orgânica do solo, obtida por modelo de predição usando espectroscopia de reflectância difusa, têm espaço para ser utilizado em laboratórios de rotina, já que é um método mais rápido e de eficácia comprovada, desde que modelos calibrados atendam às condições e possuam características das amostras a serem analisadas (Rosin et al., 2021).

No contexto da preservação do solo, a integração entre espectroscopia e modelagem multivariada possibilita o monitoramento eficiente de parâmetros-chave, como teores de carbono orgânico e outras propriedades que influenciam a capacidade de sequestro

de carbono. Essas informações são cruciais para a formulação de estratégias de manejo sustentável que combinem produtividade agrícola e mitigação das mudanças climáticas. Portanto, a combinação de espectroscopia no infravermelho e calibração multivariada não apenas otimiza processos analíticos, mas também contribui para soluções inovadoras e sustentáveis em favor da saúde do solo e do equilíbrio ambiental global.

## 4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de metodologias analíticas que possibilitam a quantificação de analitos de forma não destrutiva e sem o uso de reagentes químicos representa uma importante contribuição da ciência para as tecnologias ambientais. Essa abordagem é especialmente relevante diante da crescente demanda por análises de solos, que pode acarretar um elevado consumo de reagentes e a geração de resíduos perigosos, constituindo um significativo passivo ambiental.

Os resultados deste estudo demonstraram o potencial da espectroscopia molecular aliada à quimiometria no avanço de tecnologias mais limpas. Especificamente, o modelo de calibração por PLS apresentou um desempenho superior ao método Cubista, reforçando sua aplicação promissora em contextos sustentáveis e inovadores.

Outro destaque deste estudo é a utilização da linguagem Python no ambiente Google Colab, uma combinação que facilitou a análise de dados e a colaboração em projetos científicos. De fato, Python evoluiu para se tornar uma das principais ferramentas em ciência de dados e o Google Colab, por sua vez, permite execução na nuvem, compartilhamento de código e visualização de dados de forma prática e eficiente, ampliando sua aplicabilidade em diversos contextos acadêmicos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e institucional para o desenvolvimento desta pesquisa. Da mesma forma, Living Vales UNISC, na pessoa do Prof. Leonel Pablo Tedesco, pelo incentivo à utilização de linguagem Python no grupo de pesquisa em Quimiometria da UNISC.

# DIRECT DETERMINATION OF CARBON BY INFRARED SPECTROSCOPY: A CLEAN ANALYTICAL TECHNOLOGY APPLIED TO SOIL ANALYSIS

**ABSTRACT:** Due to the growing demand for soil analysis, it is essential to adapt the methodologies used in routine laboratories. Although reliable, traditional methods are often polluting and time-consuming, therefore it is necessary to find analytical methods that are faster, more reliable and sustainable. In this context, spectroscopy has emerged as a promising alternative for analyzing soil properties. These precision technologies have proven to be effective strategies for increasing agricultural productivity, promoting the efficient use of inputs, and reducing environmental impacts. The objective of this study was to evaluate the performance of the PLS and Cubist models in predicting soil carbon content. During data preprocessing, the infrared spectra of 178 soil samples were subjected to a first-derivative transformation, followed by smoothing using the Savitzky-Golay method. The PLS model demonstrated superior performance compared to the Cubist model. Spectroscopy, combined with chemometrics, offers a non-destructive and reagent-free method for analysis, aligning with the demand for environmentally friendly technologies and the reduction of environmental liabilities. The PLS model proved to be a promising approach for quantifying soil properties, outperforming the Cubist model and reinforcing its role in sustainable technologies. Moreover, the use of Python within the Google Colab environment was highlighted as an efficient tool for data analysis and collaboration, providing a practical and accessible solution for scientific projects.

**Keywords:** Green analytical chemistry. Soil analysis. Partial least squares regression. Cubist model. Python.

---

## REFERÊNCIAS

- Da Silva, I. C. M. et al. (2024). Fast and low-cost method for direct and simultaneous determination of nitrogen and carbon in soybean leaves using benchtop and portable near-infrared devices. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1843-1852.
- Dangal, S. R. S. et al. (2019). Accurate and precise prediction of soil properties from a large mid-infrared spectral library. *Soil Systems*, 3(1), 11.

- Das, S., Chatterjee, S. & Rajbansh, J. (2022). Responses of soil organic carbon to conservation practices including climate-smart agriculture in tropical and subtropical regions: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 805, 150428.
- John, K. et al. (2021). Comparison of Cubist models for soil organic carbon prediction via portable XRF measured data. *Environmental monitoring and assessment*, 193, 1-15.
- Lucà, F. et al. (2017). Effect of calibration set size on prediction at local scale of soil carbon by Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 288, 175-183.
- Miloš, B., Bensa, A. & Japundžić-Palenkić, B. (2022). Evaluation of Vis-NIR preprocessing combined with PLS regression for estimation soil organic carbon, cation exchange capacity and clay from eastern Croatia. *Geoderma Regional*, 30, e00558.
- Moura-Bueno, J. M. et al. (2020). When does stratification of a subtropical soil spectral library improve predictions of soil organic carbon content? *Science of the Total Environment*, 737, 139895.
- Oliveira Morais, P. A. de et al. (2019). Using image analysis to estimate the soil organic carbon content. *Microchemical Journal*, 147, 775-781.
- Pudelko, A. & Chodak, M. (2020). Estimation of total nitrogen and organic carbon contents in mine soils with NIR reflectance spectroscopy and various chemometric methods. *Geoderma*, 368, 114306.
- Rinnan, Å., Berg, F. V. D. & Engelsen, S. B. (2009). Review of the most common preprocessing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28(10), 1201-1222.
- Rosin, N. A. et al. (2021). Diffuse reflectance spectroscopy for estimating soil organic carbon and make nitrogen recommendations. *Scientia Agricola*, 78, 101590.
- Rossel, R. A., Viscarra, R. N., McGlynn & McBratney, A. B. (2006). Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137(1-2), 70-82.
- Shen, L. et al. (2020). Hyperspectral estimation of soil organic matter content using different spectral preprocessing techniques and PLSR method. *Remote Sensing*, 12(7), 1206.

Singha, C. et al. (2023). Prediction of soil nutrients through PLSR and SVMR models by Vis-NIR reflectance spectroscopy. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 26(4), 901-918.

Sousa Mendes, W. de et al. (2022). The Brazilian soil mid-infrared spectral library: the power of the fundamental range. *Geoderma*, 415, 115776.

Teixeira, P. C. et al. (2017). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Brasília, DF, EMBRAPA.

Ten Caten, A. et al. (2021). Avanços na observação e no conhecimento do solo via o sensoriamento próximo. *Agropecuária Catarinense*, 34(1), 72-78.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAVATAÍ, RS, BRASIL, UTILIZANDO O ÍNDICE TRÓFICO DE QUALIDADE DA ÁGUA (ITQA)

*Camilla Schulz<sup>1</sup>, Daniela Bes<sup>2</sup>, Claudia Bos Wolff<sup>3</sup>, Leandro Hellebrandt Kruger<sup>3</sup>, João Carlos Dotto<sup>3</sup>, Eduardo Rodrigo Ramos de Santana<sup>4</sup>, Eduardo A. Lobo<sup>5\*</sup>*

---

1 Bolsista de Iniciação Científica PIBIC/CNPq. Acadêmica do Curso de Ciências Biológicas, Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

2 Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental (Mestrado e Doutorado) - PPGTA/UNISC, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

3 FEPAM. Divisão de Planejamento Ambiental (DIPLAN/DQA), CEP 90020-021, Porto Alegre, Brasil.

4 FEPAM. CEP 96820-454, Santa Cruz do Sul, Brasil.

5 Professor/Orientador do PPGTA/UNISC, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

\*E-mail: lobo@unisc.br

## RESUMO

Os corpos hídricos do Brasil são impactados pelo aumento da densidade populacional, industrialização e atividades agrícolas, sendo a eutrofização antrópica um dos problemas mais críticos da atualidade. Nesse contexto, a Bacia do Rio Gravataí, RS, além de sofrer com alta pressão antrópica, também apresenta alta demanda hídrica para irrigação de lavouras e abastecimento público. Assim, esta pesquisa teve como objetivo monitorar mensalmente a qualidade da água desta bacia hidrográfica, por meio de uma parceria UNISC/FEPAM, utilizando variáveis físico-químicas e microbiológicas, como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), oxigênio dissolvido, condutividade, pH, temperatura, turbidez, fósforo total, nitrogênio amoniacal, sólidos dissolvidos totais e coliformes termotolerantes, além de coletas trimestrais da comunidade de diatomáceas epilíticas utilizadas como bioindicadores. As amostras foram coletadas pela FEPAM, entre agosto de 2023 e janeiro de 2024, em sete pontos de amostragem ao longo da bacia hidrográfica. As variáveis físico-químicas foram analisadas no Laboratório Analítico da FEPAM. Para o processamento dos dados, foram utilizados o Índice de Qualidade da Água (IQA), Índice Trófico da Qualidade da Água (ITQA), Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Correspondência Canônica (CCA). Os resultados obtidos pelo ITQA indicaram uma faixa de trofia variando de  $\beta$ -mesotrófica (poluição moderada) a  $\alpha$ -mesotrófica (poluição intensa). Em termos de composição biológica, foram identificados 194 táxons distribuídos em 44 gêneros. Dentre eles, *Nitzschia palea*, classificada como espécie cosmopolita e altamente tolerante à eutrofização, destacou-se pela abundância, assim como *Gomphonema parvulum*, *Sellaphora nigri* e *Sellaphora saugerresii*, espécies classificadas como tendo uma tolerância intermediária à eutrofização. As duas primeiras espécies foram abundantes em todas as amostras, enquanto as duas últimas foram abundantes em 9 das 12 amostras coletadas. Essas espécies foram, portanto, responsáveis pelos níveis de eutrofização detectados. O IQA revelou qualidade da água entre regular a ruim nos pontos amostrados P1 a P7, com exceção do ponto P5, com qualidade ruim a muito ruim, corroborando os resultados da PCA e CCA, que indicaram um gradiente de eutrofização, onde as variáveis mais representativas foram turbidez, oxigênio dissolvido, fósforo total, DBO e nitrogênio amoniacal, todas diretamente associadas ao gradiente ambiental observado. Assim, os níveis de eutrofização detectados, com base em todos os indicadores utilizados, podem ser atribuídos ao impacto de uma série de atividades antrópicas, como a entrada de



nutrientes e carga orgânica provenientes de esgotos domésticos e da pecuária, além do excesso de fertilizantes e insumos agrícolas utilizados nas lavouras.

**Palavras-chave:** Biomonitoramento. Eutrofização. Algas diatomáceas. Bioindicadores. Recursos hídricos.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Os corpos hídricos das bacias hidrográficas brasileiras estão sendo cada vez mais afetados pelo aumento da densidade populacional, industrialização e atividades agrícolas, destacando a eutrofização antrópica que é considerada um dos problemas mais críticos da atualidade, responsável pela perda da qualidade da água e degradação dos ecossistemas aquáticos (Tundisi, 2003; Tundisi, 2008, Lobo et al., 2016a). A eutrofização é o aumento da concentração de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo nos ecossistemas aquáticos, que têm como consequência o aumento de suas produtividades (Esteves, 2011). Quando cultural, ou seja, quando provocada pela ação do homem, é um processo dinâmico, no qual ocorrem profundas modificações qualitativas e quantitativas nas comunidades aquáticas, nas condições físicas e químicas do meio e no nível de produção do sistema, podendo ser considerado uma forma de poluição. Dentre as fontes artificiais destes nutrientes, destacam-se fertilizantes agrícolas, dejetos de animais, esgotos domésticos e industriais. É importante destacar que a eutrofização cultural é um processo que pode tornar um corpo d'água inaproveitável para o abastecimento, geração de energia e como área de lazer.

Segundo Lobo e Callegaro (2000), os enfoques dos estudos concernentes à avaliação da qualidade da água podem ser divididos, basicamente, em duas categorias. A primeira utiliza os métodos físicos e químicos, enquanto a segunda considera os métodos biológicos de avaliação. Por integrar efeitos antrópicos e influências naturais, a informação proveniente do uso de bioindicadores oferece uma avaliação mais refinada da qualidade da água do que as medidas físicas e químicas utilizadas isoladamente. Pesquisadores do mundo inteiro (p. ex., Álvarez-Blanco et al., 2013; Lobo et al., 2015, 2016a, 2019; Castillejo et al., 2018, 2023) argumentam que as metodologias tradicionais de classificação das águas, baseadas em características físicas, químicas e bacteriológicas não são suficientes para atender aos seus usos múltiplos, sendo particularmente deficientes na avaliação da qualidade estética, de recreação e ecológica do ambiente, sendo necessário, portanto, uma análise integrada da qualidade, considerando não apenas as metodologias

tradicionais de avaliação, mas os aspectos biológicos do sistema. Conciliador, Round (1993) estabelece que os métodos de análises físicos e químicos complementam os métodos biológicos e, em conjunto, constituem a base para uma correta avaliação da qualidade das águas correntes.

No estado do Rio Grande do Sul, a FEPAM é o órgão responsável por diagnosticar, acompanhar e controlar a qualidade do meio ambiente, estabelecer diretrizes para as ações de proteção ambiental, em particular aquelas voltadas à definição de ações de proteção e melhoria da qualidade ambiental, da proteção da biodiversidade e do estabelecimento de diretrizes relacionadas à gestão territorial e de uso do solo. Neste sentido, a FEPAM vem operando a Rede Básica de Monitoramento da Qualidade da Água Superficial (RQA/RS), cujo sistema de amostragem analisa mais de 20 parâmetros físico-químicos e microbiológicos, tais como temperatura, pH, oxigênio dissolvido e nutrientes, entre outros (FEPAM, 2021), cujas determinações analíticas são utilizadas para o enquadramento das águas superficiais em classes de uso, seguindo a resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (Brasil, 2005). Desta forma, no intuito de constituir ações proativas na Gestão Ambiental do Estado, a FEPAM emitiu uma ordem de serviço, FEPAM nº 44/2019, com a finalidade de planejar e elaborar um programa de monitoramento ambiental (variáveis físicas, químicas e microbiológicas, incluindo agrotóxicos) em recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, durante os anos 2023-2025. Neste contexto, esta pesquisa visa uma parceria UNISC/FEPAM, através do Convênio de Cooperação Técnica 001/23, no sentido de estudar a resposta da comunidade de diatomáceas epilíticas através de coletas trimestrais, durante 24 meses, nos mesmos pontos de coleta onde a FEPAM irá desenvolver a pesquisa, visando avaliar a qualidade da água em termos da eutrofização.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica Rio Gravataí – BHRG (Figura 1) possui 1.977,39 km<sup>2</sup> e uma população aproximada de 1 milhão e trezentos mil habitantes, abrangendo os municípios de Alvorada, Cachoeirinha, Canoas, Gravataí, Porto Alegre, Santo Antônio da Patrulha e Viamão. Seus principais cursos de água são o Rio Gravataí e os arroios Veadozinho, Três Figueiras, Feijó, Demétrio, Figueira e Arroio do Vigário; compreende ainda os banhados do Chico Lomã, Grande e dos Pachecos, importantes ecossistemas naturais da região (SEMA, 2023). A tabela 1 apresenta a localização dos pontos de coleta na BHRG.

Tabela 1. Identificação e localização dos pontos de coleta na bacia hidrográfica do Rio Gravataí

| Ponto | Latitude     | Longitude    | Observações   |
|-------|--------------|--------------|---|
| 1     | -29.935994°  | -50.602475°  | Arroio Chico Lomã, acesso ponte/Sto. A. da Patrulha |
| 2     | -29.979494°  | -50.737985°  | Banhado Grande/ acesso barco                        |
| 3     | -29.989818°  | -50.761293°  | Rio Gravataí, acesso Fazenda Capão grande/Glorinha  |
| 4     | -30.006879°  | -50.843094°  | Rio Gravataí, acesso via Fazenda dos Rosas/RS 040   |
| 5     | -29.954662°  | -51.127703°  | Rio Gravataí, Canoas                                |
| 6     | -29.966280°  | -50.9488450° | Rio Gravataí, Gravataí                              |
| 7     | -29.8606490° | -50.7607960° | Afluente Arroio Grande, Glorinha                    |

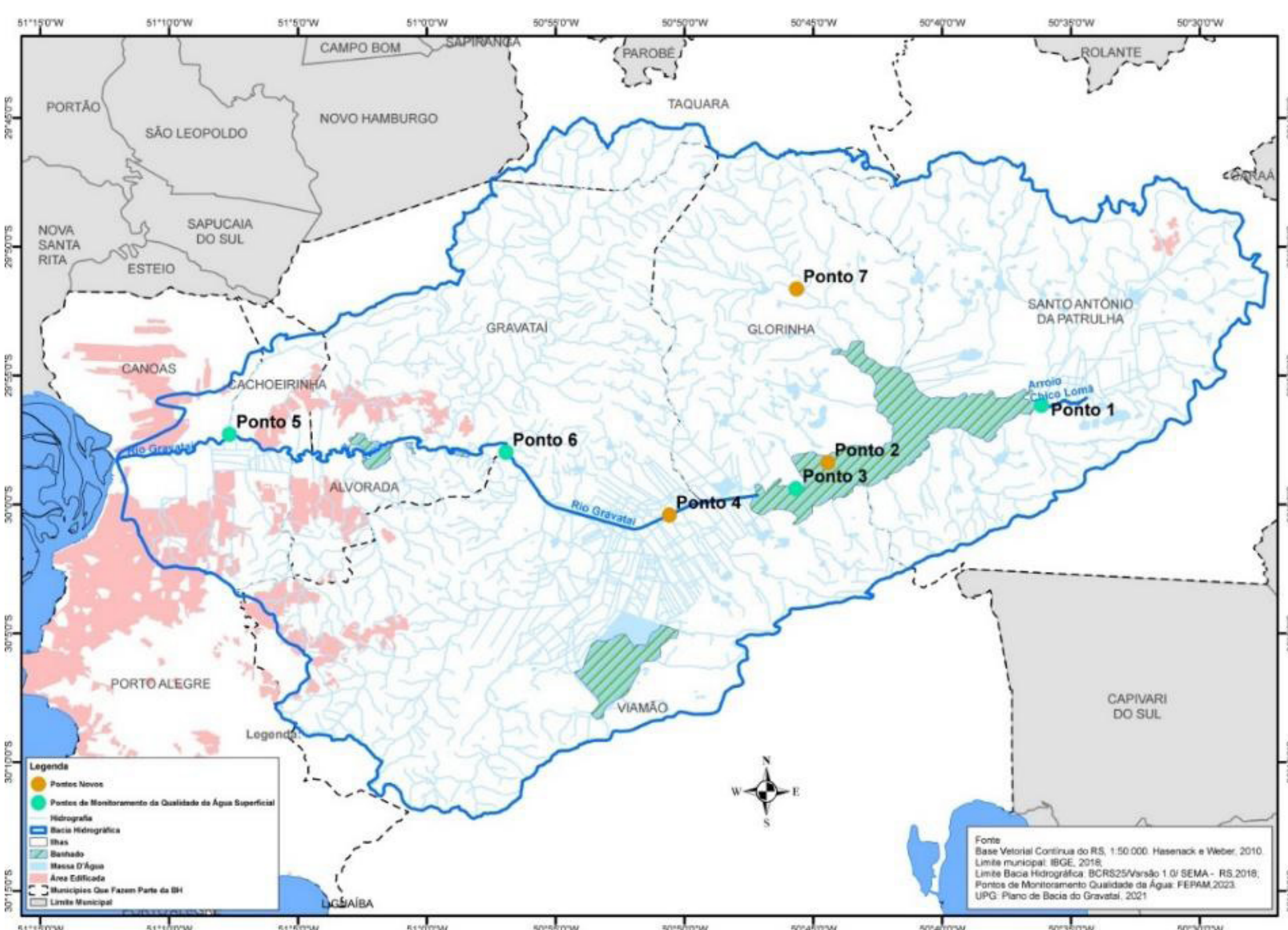


Figura 1. Localização dos pontos de monitoramento propostos para a Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, RS. As coletas de diatomáceas ocorrem nos pontos 1, 2, 3, 4, 6 e 7

## 2.2 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Foram realizadas 36 coletas, através das quais foram determinadas quantitativamente variáveis como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), oxigênio dissolvido, condutividade, pH, temperatura, turbidez, fósforo total, nitrogênio amoniacal, sólidos totais dissolvidos e coliformes termotolerantes. As determinações analíticas das variáveis físico-químicas e microbiológicas foram realizadas no laboratório de análises da FEPAM. A partir dos dados obtidos, foi aplicado o Índice de

Qualidade da Água (IQA) desenvolvido por Posselt et al. (2015), e adaptado a sistemas lóticos subtropicais e temperados brasileiros por Moretto et al. (2012).

## 2.3 AMOSTRAS BIOLÓGICAS

Foram realizadas doze coletas de algas diatomáceas entre agosto de 2023 e janeiro de 2024 nos pontos amostrais P1, P2, P3, P4, P6 e P7. Para a coleta, foram raspadas de três a cinco pedras de 10 a 20 cm de diâmetro e fixadas com álcool etílico 95%, técnica adaptada de Lobo et al. (2016b). O material foi oxidado com peróxido de hidrogênio e ácido clorídrico e montado em lâminas permanentes utilizando Pleurax® como meio de montagem. Em seguida, as lâminas foram analisadas sob microscópio óptico (Olympus BX40), com um aumento de 100X. Para estimar a abundância relativa das espécies, todos os organismos encontrados sobre a lâmina permanente foram identificados e contados até que 600 valvas, como mínimo, fossem registradas, conforme Kobayasi e Mayama (1982). Para a identificação das diatomáceas, foram consultadas as seguintes obras taxonômicas: Metzeltin e Lange-Bertalot (1998, 2007); Rumrich et al. (2000); Metzeltin e García-Rodríguez (2003); Metzeltin et al. (2005); Blanco et al. 2010; Bes et al. (2012) e Lobo et al. (2014, 2016b). Para diferenciar as espécies abundantes, foi utilizado o critério de Lobo e Leighton (1986), que considera abundantes as espécies cuja ocorrência numérica supera o valor médio do número total de indivíduos das espécies numa amostra. As lâminas permanentes de diatomáceas foram depositadas no Herbário DIAT-UNISC da Universidade de Santa Cruz do Sul, RS.

## 2.4 ANÁLISES DE DADOS

Para o tratamento dos dados, utilizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise de Correspondência Canônica (CCA), seguindo as recomendações de Hair et al. (2006). Utilizou-se o *software* PAST (Hammer et al., 2001).

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 ÍNDICE DA QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)

O Índice de Qualidade da Água (IQA) indicou uma qualidade variando de regular a ruim nos pontos amostrais P1 a P7. Das 36 amostras analisadas, uma foi classificada como de qualidade muito ruim, 11 como ruim e 24 como regular. As variáveis mais influentes na determinação do índice foram os coliformes termotolerantes e a saturação de oxigênio,

evidenciando que a poluição possui, predominantemente, origem orgânica. Os resultados da análise de IQA pode ser observada na Figura 2.

O ponto de coleta P5 destacou-se com qualidade classificada entre ruim e muito ruim, especialmente durante os meses de agosto e dezembro de 2023. Esses resultados refletem os altos níveis de coliformes termotolerantes, atribuídos ao aumento da atividade antrópica, incluindo o aporte de nutrientes oriundos da agricultura e os efluentes provenientes dos municípios que compõem a bacia do Rio Gravataí, com destaque para Cachoeirinha e Gravataí.

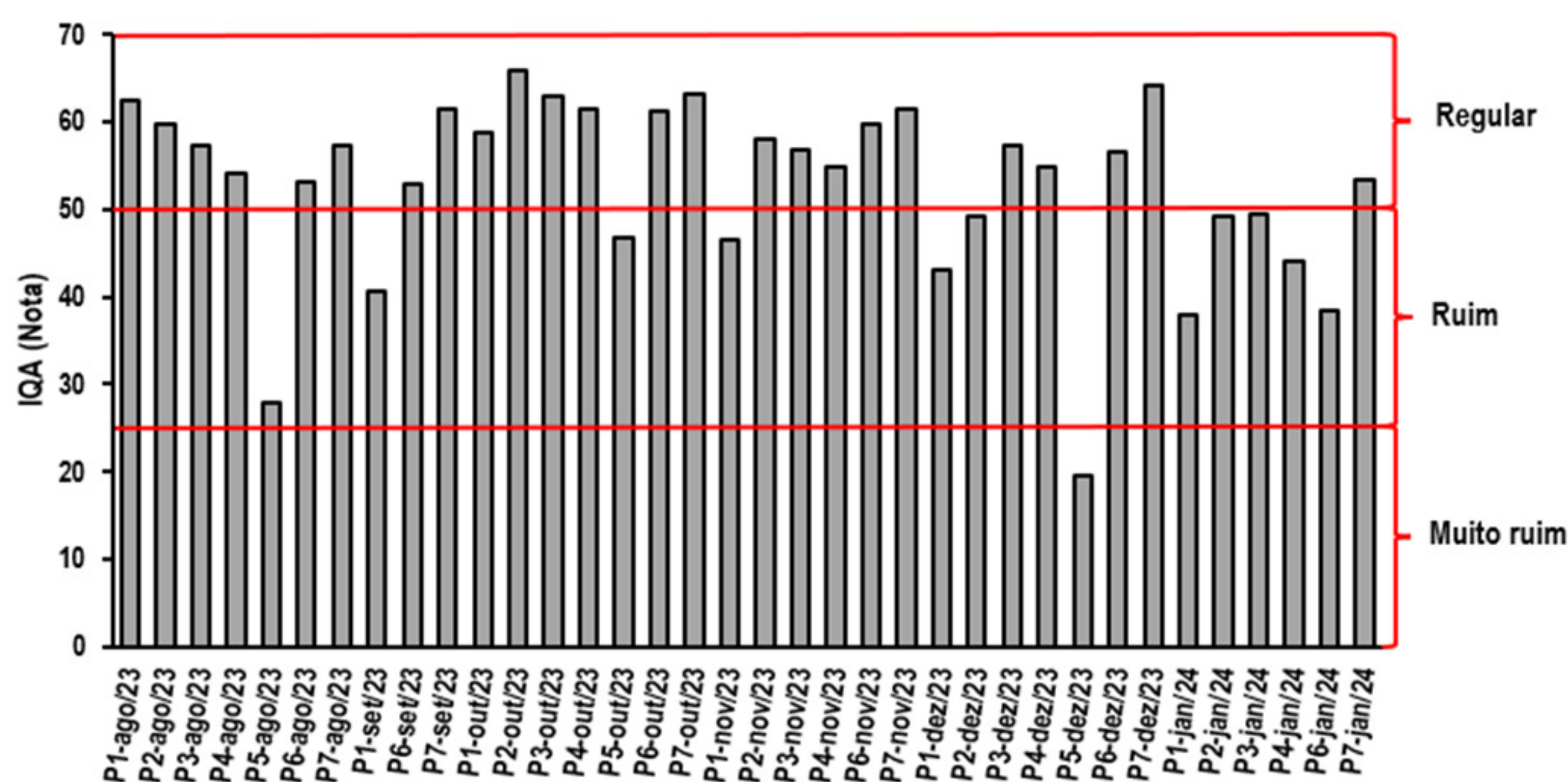


Figura 2. Resultado do Índice de Qualidade de Água (IQA) nos pontos de coleta P1 a P7 no período de agosto de 2023 a janeiro de 2024

### 3.2 COMPOSIÇÃO BIOLÓGICA E APLICAÇÃO DO ITQA

Com relação à composição biológica, foram identificados 194 táxons, distribuídos em níveis genéricos, específicos e interespecíficos, abrangendo 44 gêneros. Entre as espécies identificadas, 55 foram abundantes em alguma coleta, e destas destacaram-se *Nitzschia palea* (Kützing) W. Smith, classificada como espécie cosmopolita tolerante à eutrofização, assim como *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing, *Sellaphora nigri* (De Notaris) Wetzel & Ector e *Sellaphora saugerresii* (Desmazières) C. E. Wetzel & D. G. Mann, espécies classificadas como tendo uma tolerância intermediária à eutrofização. As duas primeiras espécies foram abundantes em todas as amostras, enquanto as duas últimas foram abundantes em 9 das 12 coletas realizadas. Fotomicrografias de algumas espécies abundantes apresentam-se na Figura 4 e de espécies ocorrentes na Figura 5.

Os valores resultantes obtidos utilizando o ITQA indicaram uma faixa de trofia de  $\beta$ -mesotrófico (poluição moderada) à  $\alpha$ -mesotrófico (poluição forte), de acordo com

o ponto de amostragem e período correspondente (Figura 3). A condição ambiental observada pode ser atribuída à abundância de espécies que apresentam um valor trófico  $vt=2,5$  e  $vt=4,0$ , que corresponde a uma média e alta tolerância à eutrofização e poluição orgânica, respectivamente. A condição  $\alpha$ -mesotrófico observada nos pontos amostrais P1, P6 e P7, coletados em novembro de 2023, P7 coletado em dezembro de 2023, e P2 coletado em janeiro de 2024, foi determinada pela abundância relativa das espécies listadas na Tabela 2. O valor trófico da espécie *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (O.Müller) Simonsen,  $vt = 4,0$ , está de acordo com o trabalho de Bicudo et al. (2016), enquanto para *Nitzschia supralitorea* Lange-Bertalot,  $vt = 4,0$ , o trabalho de Cantonati et al. (2017).

A espécie *N. palea* esteve presente em todas as amostras e mostrou-se particularmente abundante nos locais de maior trofia. Reconhecida mundialmente como uma das espécies mais tolerantes à eutrofização (p. ex., Bruno et al., 2003; Bellinger et al., 2006; Bere e Tundisi, 2009; Lobo et al., 2010, 2014, 2016a,b; Salomoni et al., 2011; Schuch et al., 2012), *N. palea* destaca-se como um bioindicador robusto. No Rio Gravataí, Salomoni et al. (2017) observaram abundâncias significativamente superiores dessa espécie no curso inferior, região mais impactada por atividades antrópicas e com elevado nível de eutrofização, reforçando sua adaptação a ambientes poluídos na Bacia do Rio Gravataí e seus afluentes. Assim como a *N. palea*, a espécie *G. parvulum* é cosmopolita e largamente utilizada em estudos de monitoramento ambiental em cursos d'água na América do Sul e do Norte (p. ex., Daruich et al., 2013; Lobo et al., 2015; Salinas-Camarillo et al., 2020).

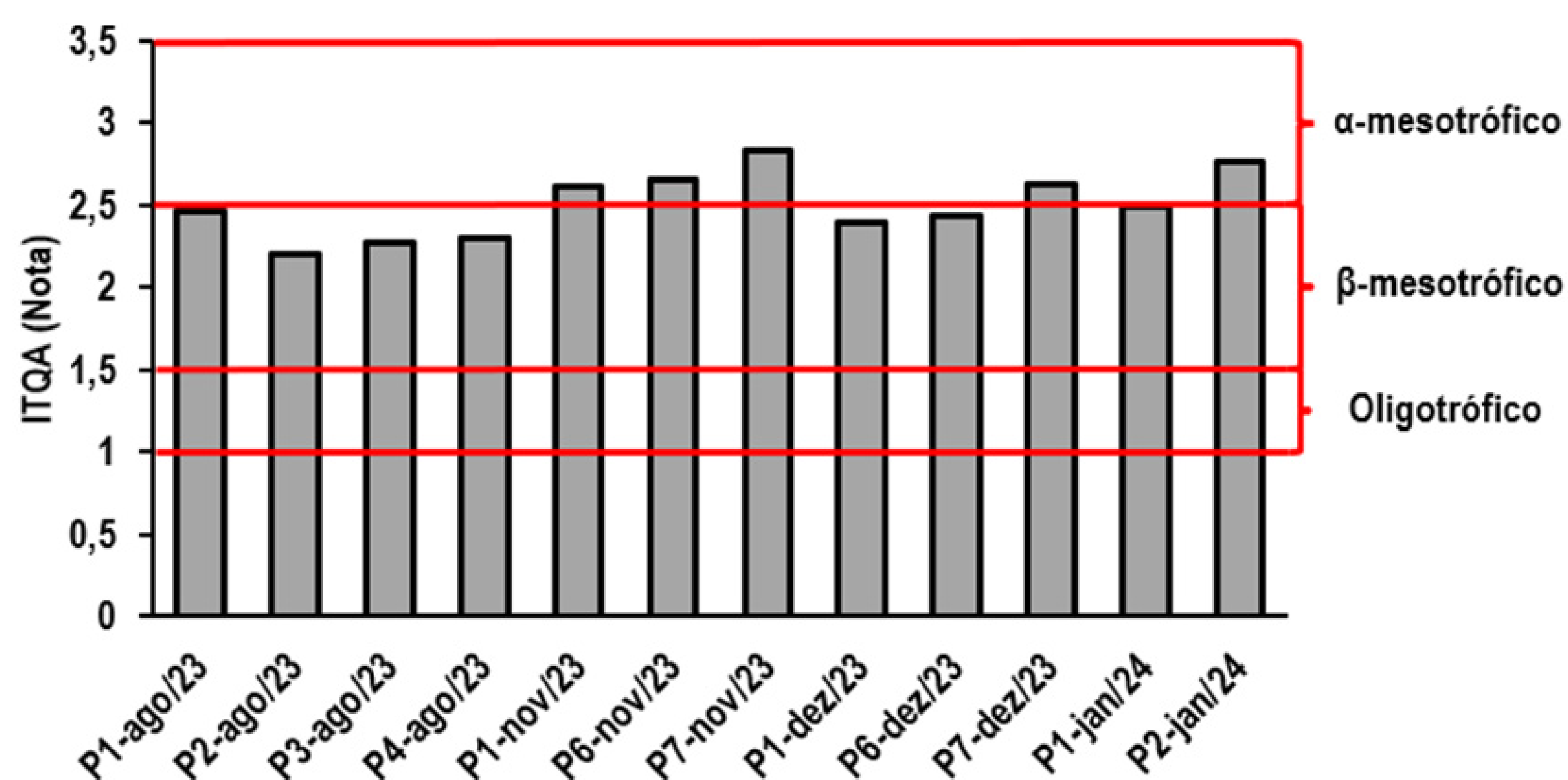


Figura 3. Resultado do Índice Trófico de Qualidade da Água (ITQA), aplicado nos pontos de coleta P1, P2, P3, P4, P6 e P7 na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí, RS, Brasil. Coleta realizada entre os meses de agosto de 2023 e fevereiro de 2024

Tabela 2. Espécies abundantes nas amostras com maior poluição com seu respectivo valor trófico (vt) e abundância relativa

| Ponto e data de coleta | Espécies abundantes                                   | Vt  | Abundância relativa |
|------------------------|---|-----|---------------------|
| P1-nov/23              | <i>Sellaphora nigri</i>                               | 2,5 | 25,00%              |
|                        | <i>Sellaphora saugerresii</i>                         | 2,5 | 21,33%              |
|                        | <i>Nitzschia palea</i>                                | 4   | 8,00%               |
| P6-nov/23              | <i>Nitzschia palea</i>                                | 4   | 17,33%              |
|                        | <i>Nitzschia supralitorea</i>                         | 4   | 6,33%               |
| P7-nov/23              | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | 4   | 25,67%              |
|                        | <i>Nitzschia palea</i>                                | 4   | 9,67%               |
| P7-dez/23              | <i>Sellaphora nigri</i>                               | 2,5 | 14,67%              |
|                        | <i>Nitzschia palea</i>                                | 4   | 12,33%              |
|                        | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | 4   | 7,67%               |
| P2-jan/24              | <i>Gomphonema parvulum</i>                            | 2,5 | 23,67%              |
|                        | <i>Nitzschia palea</i>                                | 4   | 11,00%              |
|                        | <i>Gomphonema lagenula</i>                            | 2,5 | 10,67%              |

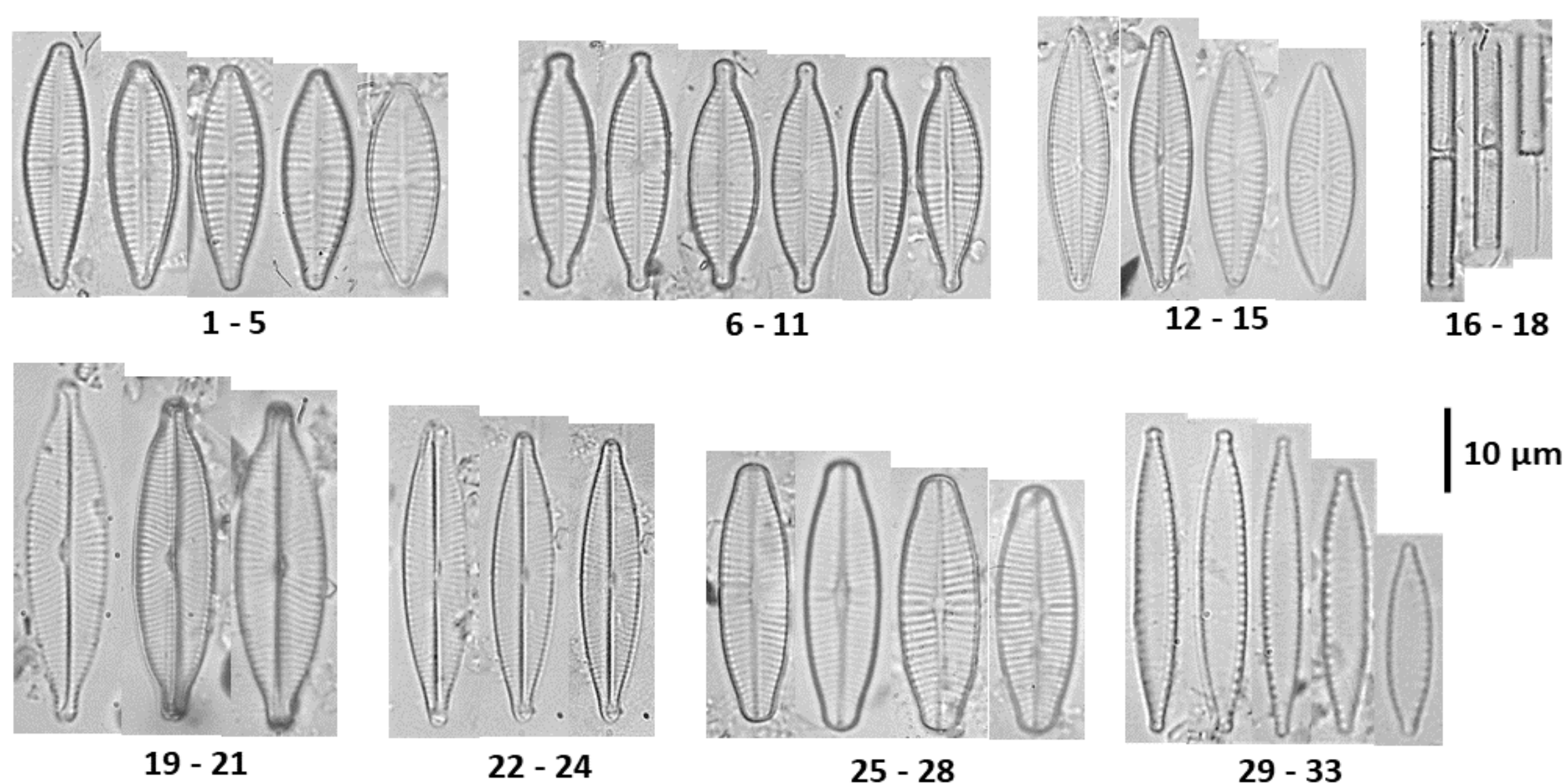


Figura 4. Fotomicrografias de espécies abundantes na Bacia Hidrográfica do Gravataí, RS. Figs. 1-5: *Gomphonema parvulum*. Figs. 6-11: *Gomphonema lagenula*. Figs. 12-15: *Navicula cryptotenella*. Figs. 16-18: *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*. Figs. 19-21: *Navicula rostellata*. Figs. 22-24: *Navicula germainii*. Figs. 25-28: *Geissleria punctifera*. Figs. 29-33: *Nitzschia palea*

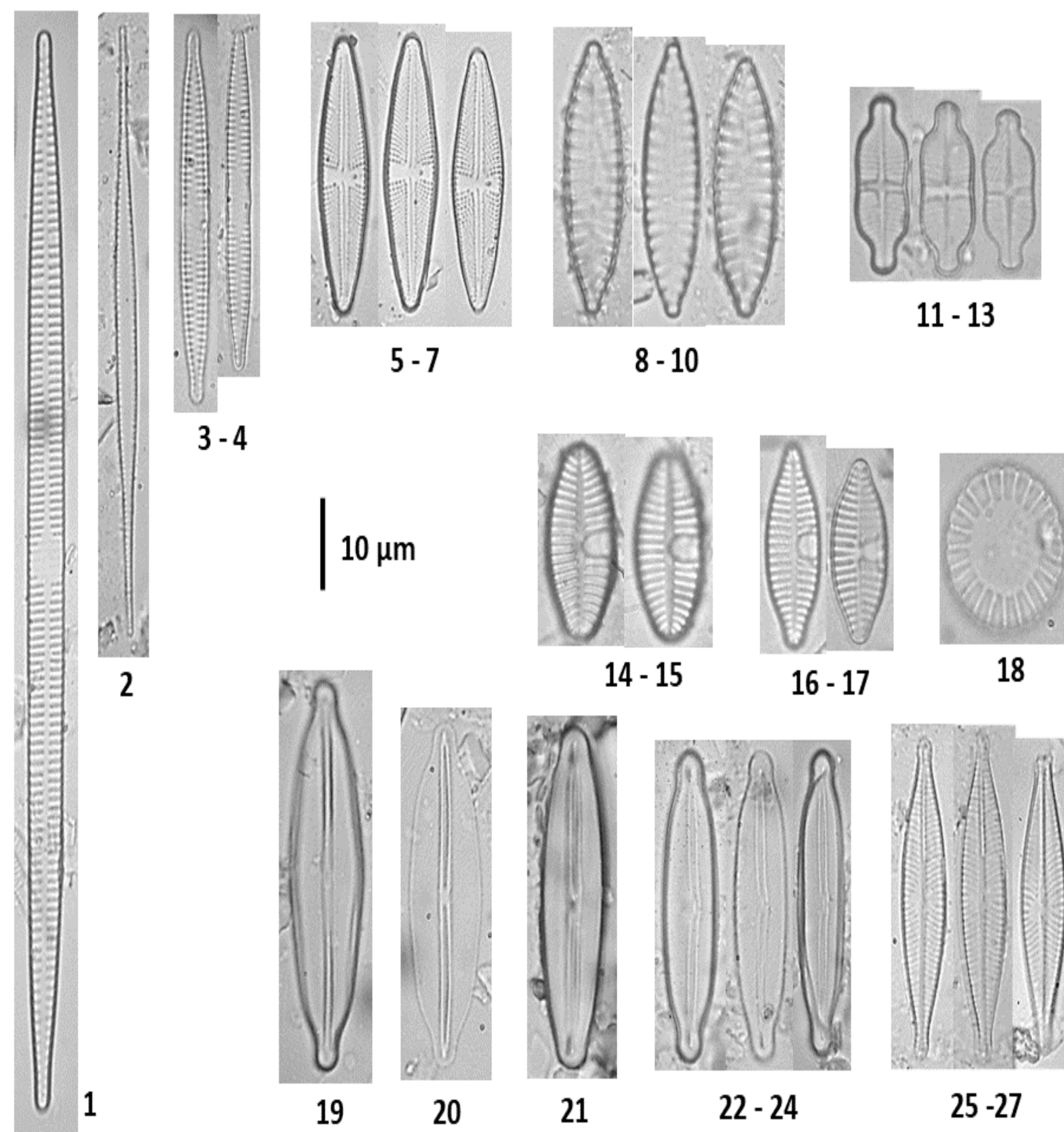


Figura 5. Fotomicrografias de espécies que ocorreram na Bacia Hidrográfica do Gravataí, RS. Fig. 1: *Ulnaria ulna*. Fig. 2: *Nitzschia subacicularis*. Figs. 3-4: *Fragilaria rumpens*. Figs. 5-7: *Luticola goeppertiana*. Figs. 8-10: *Surirella boulloni*. Figs. 11-13: *Achnantheidium exiguum* var. *constrictum*. Figs. 14-15: *Planothidium bagualense*. Figs. 16-17: *Planothidium incuriatum*. Fig. 18: *Cyclotella meneghiniana*. Fig. 19: *Frustulia crassinervia* var. *crassinervia* Fig. 20: *Frustulia guayanensis* ssp. *ecuadoriana*. Fig. 21: *Frustulia vulgaris*. Figs. 22-24: *Frustulia neomundana*. Fig. 25-27: *Navicula cryptocephala*

### 3.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

A análise de componentes principais (PCA), apresentada na Figura 6, revelou os principais fatores que influenciam a qualidade da água na bacia do Rio Gravataí, destacando a relevância de variáveis como coliformes termotolerantes, DBO e fósforo total, que refletem poluição de origem orgânica e eutrofização. O Eixo 1 demonstra a influência das variáveis associada a condições eutróficas, especialmente Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), fósforo total (PTT), Oxigênio Dissolvido (OD) e Nitrogênio Amoniacoal (NH<sub>4</sub>), enquanto o Eixo 2 evidenciou a relação entre poluição orgânica e variáveis como condutividade, turbidez e coliformes termotolerantes, indicando impactos provenientes de atividades agrícolas e escoamento de efluentes. Amostras como P11223 apresentaram alta carga orgânica e nutrientes, enquanto P20823 e P30823 se associaram a melhores níveis de oxigênio dissolvido, sinalizando condições menos impactadas.



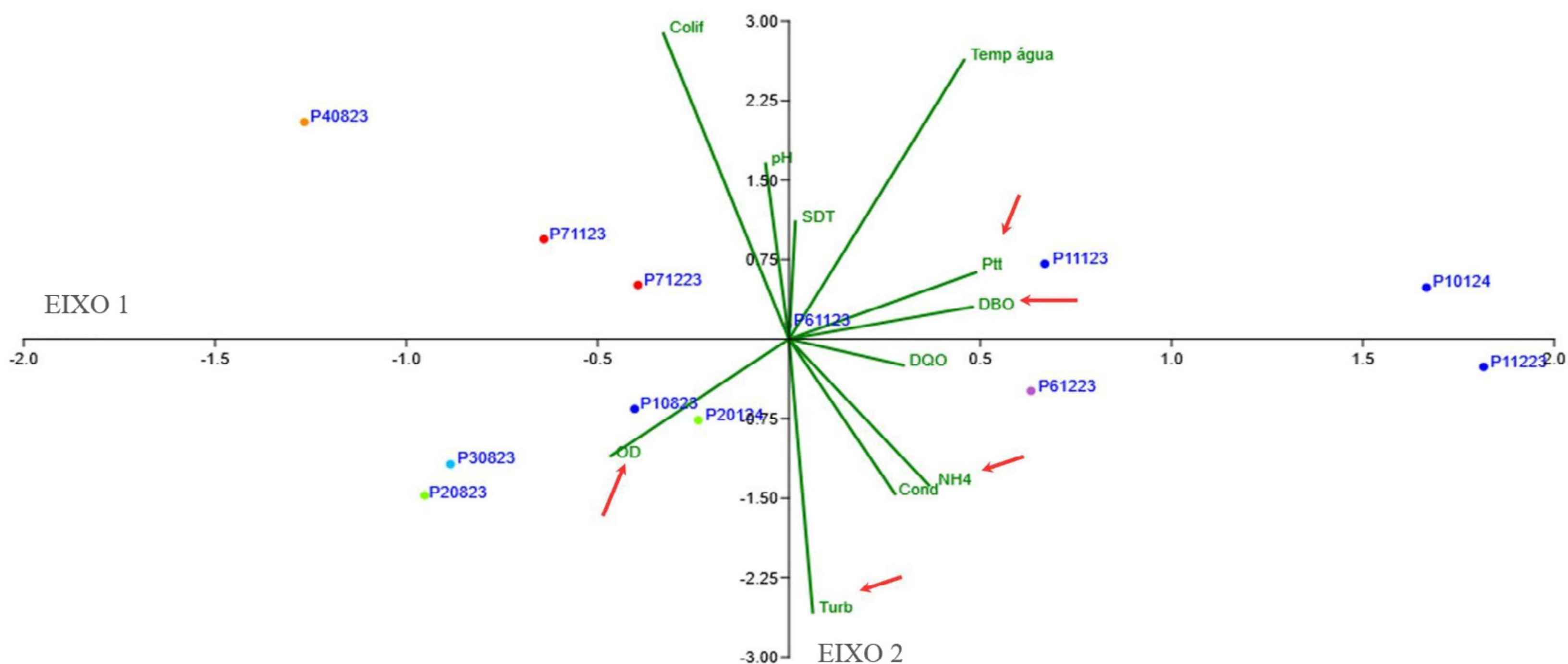


Figura 6. Resultado da Análise de componentes Principais (PCA) aplicada nos pontos de coleta P1 a P7 na Bacia Hidrográfica do Gravataí

### 3.4 ANÁLISE DE CORRESPONDÊNCIA CANÔNICA (CCA)

O gráfico de Análise de Correspondência Canônica (ACC), apresentado na Figura 7, evidencia a relação entre variáveis físico-químicas e microbiológicas, os diferentes pontos de coleta da Bacia do Rio Gravataí e as diatomáceas epilíticas abundantes. Espécies como *Eunotia subarcuatoides* Alles, Nörpel & Lange-Bertalot (EUSU) e *Frustulia neomundana* Lange-Bertalot & U. Rumrich (FRNE), localizadas no quadrante superior direito, estão associadas a variáveis como oxigênio dissolvido (OD) e pH, indicando uma preferência por ambientes bem oxigenados e com menor impacto de poluição orgânica. Por sua vez, *Navicula cryptotenella* Lange-Bertalot (NACR), *G. parvulum* (GOPA), *Gomphonema lagenula* Kützing (GOLA), *S. saugerresii* (SESA) e *S. nigri* (SENI), que apresentam média tolerância à eutrofização, e a espécie *N. palea* (NIPA), que apresenta alta tolerância à eutrofização, estão localizadas no centro do gráfico, associadas diretamente a variáveis relacionadas à eutrofização, como coliformes termotolerantes, fósforo total e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

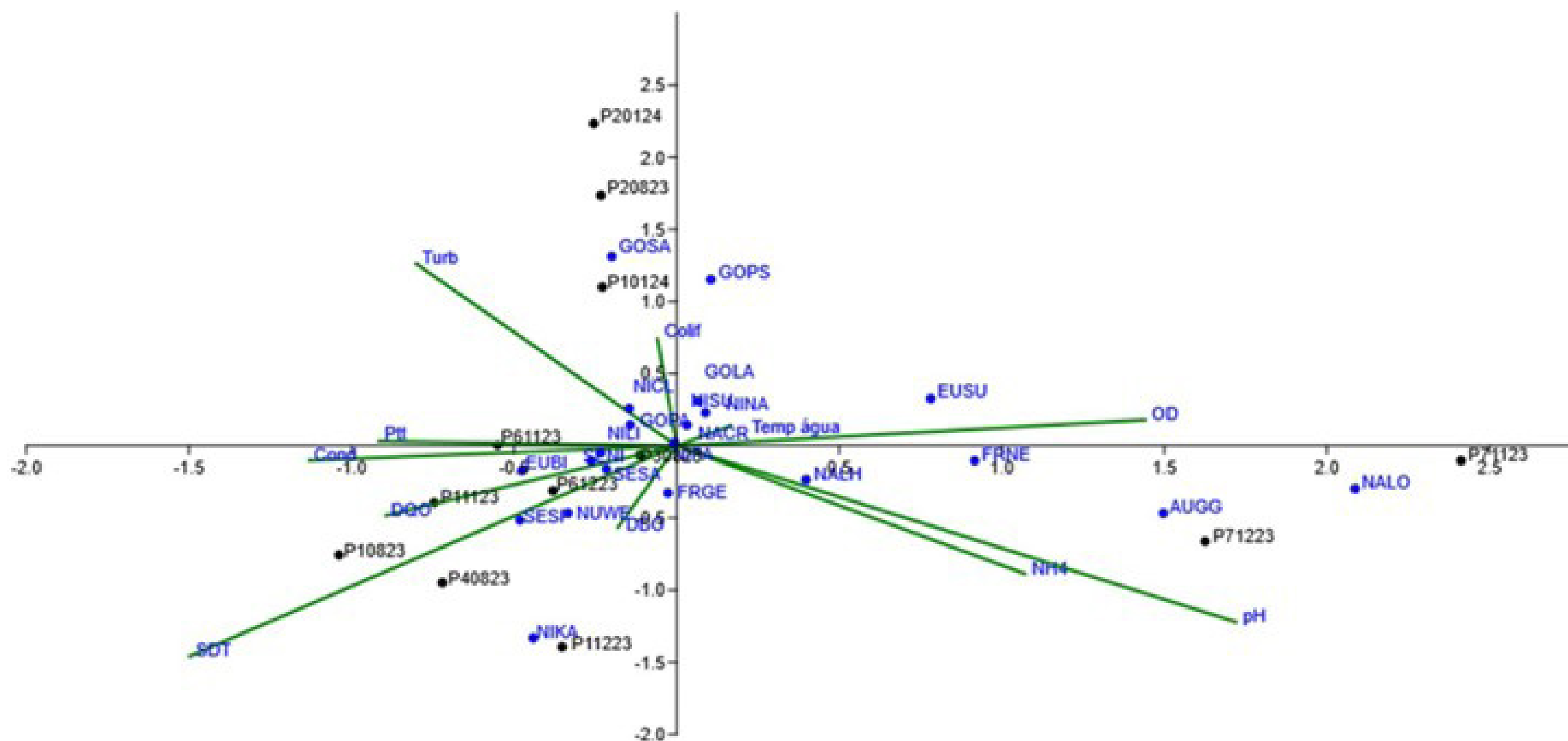


Figura 7. Resultado da Análise de Correspondência Canônica (ACC) aplicada nos pontos de coleta P1, P2, P3, P4, P6 e P7 na Bacia Hidrográfica do Gravataí

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da pesquisa indicaram que os níveis significativos de eutrofização detectados, com base em todos os indicadores que foram utilizados, podem ser atribuídos ao impacto de uma série de atividades antrópicas, como o aporte de nutrientes e carga orgânica oriundos de esgoto doméstico e criação de animais, bem como do excesso de fertilizantes e insumos agrícolas utilizados em lavouras. De forma geral, a análise evidencia a influência significativa de fontes difusas e pontuais de poluição, principalmente nos municípios de Cachoeirinha e Gravataí, que contribuem para o aporte de nutrientes e sedimentos na bacia. Os resultados reforçam a necessidade de estratégias integradas de gestão ambiental, voltadas para o controle da poluição orgânica e eutrofização, visando mitigar os impactos sobre a qualidade da água e garantindo a conservação dos recursos hídricos da região. A pesquisa, além de contribuir para o conhecimento das dinâmicas entre variáveis físico-químicas e microbiológicas e a comunidade de diatomáceas da Bacia do Rio Gravataí, atua como alerta sobre a qualidade da água associada à degradação ambiental, enfatizando a importância de uma abordagem integrada e sustentável na gestão dos recursos hídricos.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FEPAM pela parceria através da Cooperação Técnica 001/23 UNISC/FEPAM. Ao Programa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq, pela bolsa IC concedida à primeira

autora. Ao Programa CAPES de Bolsas de Pós-graduação, pela bolsa de doutorado concedida à segunda autora.

---

## ASSESSMENT OF WATER QUALITY IN THE GRAVATAÍ RIVER BASIN, RS, BRAZIL, USING THE TROPHIC INDEX OF WATER QUALITY (ITQA)

**ABSTRACT:** Brazil's water bodies are increasingly impacted by the increase in population density, industrialization and agricultural activities, with anthropogenic eutrophication being one of the most critical problems today. In this context, the Gravataí River Basin in Rio Grande do Sul not only suffers from high anthropogenic pressure, but also has a high demand for water for crop irrigation and public supply. The aim of this research was to monitor the water quality of this watershed on a monthly basis, using the epilithic diatom algae community as a bioindicator and physical-chemical and microbiological variables such as biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), dissolved oxygen, conductivity, pH, temperature, turbidity, total phosphorus, ammoniacal nitrogen, total dissolved solids and thermotolerant coliforms. The samples were collected by FEPAM between August 2023 and January 2024 at seven points throughout the watershed. The physicochemical variables were analyzed in FEPAM's laboratory. To process the data, the Trophic Index of Water Quality (ITQA), Principal Component Analysis (PCA) and the Water Quality Index (IQA) were used, as well as Canonical Correspondence Analysis (CCA). The results obtained by the WQI indicated a trophic range varying from  $\beta$ -mesotrophic (moderate pollution) to  $\alpha$ -mesotrophic (intense pollution). In terms of biological composition, 194 taxa were identified, distributed in 44 genera. Among the species identified, *Nitzschia palea*, classified as a cosmopolitan species tolerant to eutrophication, stood out for its abundance, as did *Gomphonema parvulum*, *Sellaphora nigri* and *Sellaphora saugerresii*, species classified as having an intermediate tolerance to eutrophication. The first two species were abundantly present in all the samples, while the last two were abundant in 9 of the 12 samples taken. These species were therefore responsible for the levels of eutrophication detected. The WQI revealed fair to poor water quality at sampling points P1 to P7, with the exception of point P5, with poor to very poor quality, corroborating the results of the PCA and CCA, which indicated a gradient of eutrophication, where the most representative variables were turbidity, dissolved oxygen,

total phosphorus, BOD and ammonia nitrogen, all of which were directly associated with the environmental gradient observed. In this way, the levels of eutrophication detected, based on all the indicators that were used, can be attributed to the impact of a series of anthropogenic activities, such as the input of nutrients and organic load from domestic sewage and animal husbandry, as well as the excess of fertilizers and agricultural inputs used in crops.

**Keywords:** Biomonitoring. Eutrophication. Diatom algae. Bioindicators. Water resources.

---

## REFERÊNCIAS

Álvarez-Blanco, I., Blanco, S., Cejudo-Figueiras, C. & Bécares, E. (2013). The Duero Diatom Index (DDI) for river water quality assessment in NW Spain: design and validation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 969–981.

Bellinger, B. J., Cocquyt, C. & Reilly, C. M. (2006). Benthic Diatoms as Indicators of Eutrophication in Tropical Streams. *Hydrobiologia*, 573, 75–87.

Bere, T. & Tundisi, J. G. (2009). Weighted Average Regression and Calibration of Conductivity and pH of Benthic Diatoms in Streams Influenced by Urban Pollution, São Carlos, SP, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 21, 317–325.

Bes, D., Ector, L., Torgan, L. C. & Lobo, E. A. (2012). Composition of the epilithic diatom flora from a subtropical river, Southern Brazil. *Iheringia Série Botânica*, 67, 93–125.

Bicudo, D. C., Tremarin, P. L., Almeida, P. D., Zorzal-Almeida, S., Wengrat, S., Faustino, S. B., Costa, L. F., Bartozek, E. C. R., Rocha, A. C. R., Bicudo, C. E. M. & Morales, E. A. (2016). Ecology and distribution of *Aulacoseira* species (Bacillariophyta) in tropical reservoirs from Brazil. *Diatom Research*, 31, 199–215.

Blanco, S., Cejudo-Figueiras, C., Álvarez-Blanco, I., Bécares, E., Hoffmann, L. & Ector, L. (2010). Atlas de las Diatomeas de la Cuenca del Duero. León: Universidad de León.

Brasil. (18 mar. 2005). Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente n° 357, de 17 de março de 2005. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Ministério do Meio Ambiente. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF.

- Bruno, E., Martinez de Fabricius, A. & Luque, M. E. (2003). Fitoplancton en un tramo del Río Cuarto con influencia antrópica. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 38, 1-13.
- Cantonati, M., Kelly, M. G. & Lange-Bertalot, H. (2017). (ed.). Freshwater Benthic Diatoms of Central Europe. Oberreifenberg, Alemanha: Koeltz Botanical Books.
- Castillejo, P., Chamorro, S., Paz, L., Heinrich, C., Carrillo, I., Salazar, J. G., Navarro, J. C. & Lobo, E. A. (2018). Response of epilithic diatom communities to environmental gradients along an Ecuadorian Andean River. *Comptes Rendus Biologies*, 341, 256-263.
- Castillejo, P., Ortiz, S., Jijón, G., Lobo, E. A., Heinrich, C., Ballesteros, I. & Rios Touma, B. (2023). Response of macroinvertebrate and epilithic diatom communities to pollution gradients in Ecuadorian Andean rivers. *Hydrobiologia*, 851, 431-446.
- Çelekli, A., Toudjani, A. A., Lekeşiz, H. Ö. & Çetin, T. (2018). Ecological quality assessment of running waters in the North Aegean catchment with diatom metrics and multivariate approach. *Limnologica*, 73, 20-27.
- Daruich, J., Tripole, S., Gil, M. A. & Vallania, A. (2013). Algal and Cyanobacterial communities in two rivers of the province of San Luis (Argentina) subjected to anthropogenic influence. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 25, 79-90.
- Esteves, F. A. (2011). *Fundamentos de Limnologia*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental. (2021). Qualidade da Água Superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí. Relatório Técnico.
- Freitas, N. C. W., Heinrich, C. G., Etges, T., Celente, G. S. & Lobo, E. A. (2020). Reference Sites Determination for Evaluating the Ecological Status of Subtropical and Temperate Brazilian Lotic Systems Using the Epilithic Diatom Community. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 1-11.
- Hair, J. F. (2006). Successful strategies for teaching multivariate statistics. In *Proceedings of the 7th International Conference on* (pp. 1-5).
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1-9.
- Kobayasi, H. & Mayama, S. (1982). Most pollution tolerant diatoms of severely polluted rivers in the vicinity of Tokyo. *Japanese Journal of Phycology*, 30, 188-196.

Lobo, E. A. & Callegaro, V. L. M. (2000). Avaliação da qualidade de águas doces continentais com base em algas diatomáceas epilíticas: enfoque metodológico. In Tucci, C. E. M. & Marques, D. M. (ed.). *Avaliação e Controle da Drenagem Urbana* (pp. 277–300). Porto Alegre: Ed. Universidade, UFRGS.

Lobo, E. A., Freitas, N. W. & Salinas, V. H. (2019). Diatomeas como bioindicadores: aspectos ecológicos de la respuesta de las algas a la eutrofización en América Latina. *Mexican Journal of Biotechnology*, 4, 1–24.

Lobo, E. A., Heinrich, C. D., Schuch, M., Düpont, A., Costa, A. B., Wetzel, C. E. & Ector, L. (2016). Índice trófico de qualidade da água: guia ilustrado para sistemas lóticos subtropicais e temperados brasileiros. Santa Cruz do Sul: EDUNISC.

Lobo, E. A., Heinrich, C. D., Schuch, M., Wetzel, C. E. & Ector, L. (2016). Diatoms as bioindicators in rivers. In: Necchi Jr. (ed.). *River Algae*. Springer International Publishing (pp. 245–271).

Lobo, E. A. & Leighton, G. (1986). Estructuras comunitarias de las fitocenosis planctónicas de los sistemas de desembocaduras de ríos y esteros de la Zona Central de Chile. *Revista Biología Marina*, 22, 1–29.

Lobo, E. A., Schuch, M., Heinrich, C. G., Costa, A. B., Düpont, A., Wetzel, C. E. & Ector, L. (2015). Development of the Trophic Water Quality Index (TWQI) for subtropical temperate Brazilian lotic systems. *Environmental and Monitoring Assessment*, 6, 354–366.

Lobo, E. A., Wetzel, C. E., Ector, L., Katoh, K., Blanco, S. & Mayama, S. (2010). Response of epilithic diatom community to environmental gradients in subtropical temperate Brazilian rivers. *Limnetica*, 29, 323–340.

Lobo, E. A., Wetzel, C. E., Schuch, M., Ector, L. (2014). Diatomáceas epilíticas como indicadores da qualidade da água em sistemas lóticos subtropicais e temperados brasileiros. Santa Cruz do Sul: EDUNISC.

Menye, D. É., Serge Togouet, H. Z., Menbohan, S. F., Kemka, N., Nola, M., Boutin, C., Nguetsop, V. F., Djaouda, M. & Njiné, T. (2012). Bio-écologie des diatomées épilithiques de la rivière Mfoundi (Yaoundé, Cameroun): diversité, distribution spatiale et influence des pollutions organiques. *Journal of Water Science*, 25, 203–218.

Metzeltin, D. & García-Rodríguez, F. (2003). *Las Diatomeas Uruguayas*. DI.R.A.C: Montevideo.

- Metzeltin, D. & Lange-Bertalot, H. (1998). Tropical Diatoms of South America I. *Iconographia Diatomologica*, 5, 1-695.
- Metzeltin, D. & Lange-Bertalot, H. (2007). Tropical Diatoms of South America II. *Iconographia Diatomologica*, 18, 1-877.
- Metzeltin, D., Lange-Bertalot, H. & García-Rodríguez, F. (2005). Diatoms of Uruguay. *Iconographia Diatomologica*, 15, 1-736.
- Moretto, D. L., Panta, E., Costa, A. B. & Lobo, E. A. (2012). Calibration of Water Quality Index (WQI) based on Resolution n° 357/2005 of the Environment National Council (CONAMA) Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 24, 29-42.
- Posselt, E. L., Costa, A. B. & Lobo, E. A. (2015). *software IQADData 2015*. Registration with INPI BR 512015000890-0. Graduate Program on Environmental Technology (PPGTA) and Graduate Program and Industrial Systems and Processes (PPGSPi), UNISC 2015. Recuperado de <http://www.unisc.br/ppgspi>.
- Round, F. E. (1993). A Review of Methods for the Use of Epilithic Diatoms for Detecting and Monitoring Changes in River Water Quality 1993: Methods for Examination of Waters and Associated Materials. Dunfermline: *The Stationery Office Books*.
- Rumrich, U., Lange-Bertalot, H. & Rumrich, M. (2000). Diatomeen der Anden. Von Venezuela bis Patagonien (Feurland). *Iconographia Diatomologica*, 9, 1-649.
- Salinas-Camarillo, V. H., Carmona-Jiménez, J. & Lobo, E. A. (2020). Development of the Diatom Ecological Quality Index (DEQI) for peri-urban mountain streams in the Basin of Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 14555-14575.
- Salomoni, S. E., Rocha, O., Hermany, G. & Lobo, E. A. Application of water quality biological indices using diatoms as bioindicators in Gravataí River, RS, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 71, 949-959.
- Salomoni, S. E., Rocha, O. & Torgan, L. C. (2017). Seasonal and spatial variation of the epilithic diatoms: case study of an organic pollution gradient in a subtropical region of southern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 29, 1-11.
- Schuch, M., Abreu-Junior, E. & Lobo, E. A. (2012). Water quality evaluation of urban streams in Santa Cruz do Sul city. *Brazil. Bioikos*, 26, 3-12.

SEMA. Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Infraestrutura. (2023). G010 – Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí. Recuperado de <https://sema.rs.gov.br/g010-bh-gravatai>.

Tundisi, J. G. (2003). *Água no século XXI: enfrentando a escassez*. São Carlos: Relatório de Impacto Ambiental, IIE.

Tundisi, J. G. & Tundisi, T. M. (2008). *Limnologia*. São Paulo: Oficina de textos.





IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# OTIMIZAÇÃO DE CULTIVOS BACTERIANOS PARA A PRODUÇÃO DE BIOINSUMOS SUSTENTÁVEIS NA AGROPECUÁRIA

*Lívia Fraticelli Neves<sup>1</sup>, Ana Carolina Müller<sup>2</sup>, Ângelo Gabriel Kretzmann  
Rossa<sup>3</sup>, Mauricio Thomas da Silva<sup>4</sup>, Bruno Swarowski<sup>4</sup>, Rogério  
Mazzardo<sup>4</sup>, Rosana de Cássia de Souza Schneider<sup>1</sup>, Lisianne Brittes  
Benitez<sup>1</sup>*

---

1 Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental (PPGTA), Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

2 Cursos de Biomedicina, Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

3 Cursos de Medicina Veterinária, Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

4 Pilzer Biotecnologia Agropecuária Ltda, CEP 96835-744, Santa Cruz do Sul, Brasil.

\*E-mail: liviafraticelli@mx2.unisc.br

## RESUMO

A microbiologia aplicada à tecnologia ambiental é essencial para o desenvolvimento de bioinsumos, como fertilizantes biológicos, que reduzem a dependência de fertilizantes químicos e promovem práticas agrícolas sustentáveis. Bactérias, especialmente do gênero *Bacillus*, são usadas na agropecuária para melhorar a qualidade do ar e reduzir patógenos, criando um ambiente mais saudável para os animais. No Brasil, programas incentivam a produção e uso de bioinsumos para impulsionar a bioeconomia e promover a sustentabilidade. Portanto, este trabalho teve como objetivo otimizar os parâmetros fermentativos em escala industrial para a produção comercial de bioinsumos microbianos para utilização na agricultura e na pecuária. O estudo foi realizado na UNISC, em parceria com uma empresa de Biotecnologia. As cepas bacterianas (*Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* e *Bacillus paralicheniformis*) foram fornecidas pela empresa parceira. As bactérias foram mantidas em meio LB (Luria-Bertani) e incubadas a 37°C por 24 horas, depois preservadas em estoques criogênicos a -80°C com glicerol a 20%. A pureza das cepas foi verificada pela coloração de Gram. Curvas de crescimento foram realizadas com as três cepas em meio nutriente, incubadas a 39°C sob agitação. Os pré-inóculos foram cultivados e incubados *overnight*, depois transferidos para novos frascos e incubados novamente. O crescimento bacteriano foi monitorado por espectrofotometria e contagem padrão de células vegetativas em placas. Para otimização dos cultivos em fase submersa, foi realizado um planejamento fatorial 2<sup>3</sup> utilizando o *software* Chemoface, testando temperatura de incubação, concentração de peptona e de extrato de levedura. Os resultados mostraram que há uma influência significativa da temperatura, peptona e extrato de levedura no crescimento bacteriano. O extrato de levedura apresentou o maior efeito positivo. Nos diagramas de superfície, a combinação de 37 °C com maior concentração de extrato de levedura otimizou o crescimento bacteriano para *Bacillus subtilis*. Já para o *Bacillus licheniformis*, os fatores mais influentes foram a temperatura e a concentração de peptona, ambos com efeitos negativos significativos. No caso de *Bacillus paralicheniformis*, a peptona também foi o fator mais influente, seguida pelo extrato de levedura. A temperatura teve um efeito positivo, porém menos expressivo. Esses resultados reforçam a importância da formulação do meio para otimizar o desempenho de cada espécie.

**Palavras-chave:** Bioinsumos. *Bacillus*. Biotecnologia. Meio ambiente.

# 1 INTRODUÇÃO

A Microbiologia aplicada à tecnologia ambiental desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de bioinsumos, permitindo a seleção de microrganismos e a otimização de processos fermentativos para obtenção destes produtos. Os bioinsumos, como fertilizantes biológicos, reduzem a dependência de fertilizantes químicos, minimizando impactos ambientais negativos. Além disso, a melhoria de processos fermentativos e de cepas microbianas torna a produção de bioinsumos mais eficiente e acessível. Dessa forma, o uso de bioinsumos microbiológicos promove práticas agrícolas sustentáveis, reduzindo a utilização de produtos químicos sintéticos e contribuindo para a segurança alimentar global e a preservação ambiental e também podem ser utilizados como agentes de biocontrole de patógenos na pecuária (Monnerat et al., 2023).

O uso de bactérias de diferentes gêneros na agropecuária traz benefícios significativos tanto para a saúde e o desempenho de aves e bovinos quanto para a promoção de um ambiente mais limpo e sustentável. Esses microrganismos desempenham um papel importante na decomposição de resíduos orgânicos presentes na cama dos aviários, contribuindo para a redução de odores desagradáveis, melhoria da qualidade do ar e diminuição da proliferação de patógenos. Assim, criam um ambiente mais higiênico e adequado para as aves (Monnerat et al., 2023).

Dentre os organismos mais utilizados para controle biológico se destacam as bactérias do gênero *Bacillus*, por serem microrganismos cosmopolitas, apresentarem capacidade de se manterem viáveis por longos períodos no ambiente em virtude de suas características esporogênicas, fácil adaptabilidade e em sua grande maioria, aeróbias e capazes de crescer facultativamente em anaerobiose, lhes permitindo desenvolver-se muito bem em distintos substratos. Espécies como *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* e *Bacillus paralicheniformis* são amplamente utilizadas como bioestimulantes ou como bioprodutos de proteção devido aos seus diversos benefícios, incluindo atividades enzimáticas importantes (Carvalho Vidal & Pereira Dias, 2023).

Os bioinsumos representam o ponto inicial da bioeconomia no Brasil, uma vez que sua utilização sustentável impulsiona a evolução dos bioativos em diferentes indústrias de transformação, como as farmacêuticas, agrícolas e cosméticas (Carvalho Vidal & Pereira Dias, 2023). No Brasil, o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional foi instituído através do Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020 e tem como finalidade ampliar e fortalecer a utilização de bioinsumos na agricultura e pecuária brasileira. Diante disso, o objetivo deste estudo foi otimizar os parâmetros

fermentativos em escala industrial para a produção comercial de bioinsumos microbianos para utilização na agricultura e na pecuária.

## 2 METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido na Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC) em parceria com Pilzer Biotecnologia Agropecuária Ltda., empresa localizada no município de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul. As cepas bacterianas utilizadas na pesquisa – *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* e *Bacillus paralicheniformis* – foram fornecidas pela empresa parceira da pesquisa. Para a manutenção, as bactérias foram subcultivadas em meio Luria-Bertani (LB) e incubadas a 37 °C por um período de 24 horas. Posteriormente, as cepas foram preservadas em estoques criogênicos a -80 °C, utilizando glicerol a 20% (v/v) como crioprotetor (Zhang, Yin & Wen, 2024). A técnica de coloração de Gram foi empregada para comprovação da pureza das cepas testadas.

Foram realizados experimentos de curvas de crescimento com as três cepas das bactérias utilizando parâmetros e formulações do meio propostos pela empresa. Os pré-inóculos foram preparados individualmente, cultivando cada cepa em caldo nutriente composto por 5 g L<sup>-1</sup> de peptona e 3 g L<sup>-1</sup> de extrato de levedura. Em frascos Erlenmeyer contendo 150 mL do meio de cultura, com o auxílio de uma alça de inoculação, foram aplicadas três alçadas de cada bactéria isoladas previamente em cultura pura em ágar nutriente. Esses pré-inóculos foram incubados por 16 a 18 horas (*overnight*) a 39 °C, sob agitação de 100 rpm, seguindo o protocolo de Xue (2011), com pequenas modificações. Após o período de incubação, alíquotas correspondentes a 2% do volume inicial foram transferidas para novos frascos contendo 150 mL de caldo nutriente de mesma composição. Esses inóculos foram incubados por 12 horas em agitador orbital a 100 rpm e 39 °C.

### 2.1 CURVAS DE CRESCIMENTO

Alíquotas de cada cultura foram retiradas dos frascos a intervalos de 2 horas durante 12 horas de cultivo. O crescimento bacteriano foi monitorado pela densidade óptica determinada por espectrofotometria a 600 nm (DO<sub>600</sub>), conforme Silva (2021), e contagem padrão em placas das células vegetativas e dos endósporos. Os cultivos de cada bactéria foram previamente diluídos em série e as diluições foram semeadas em placas de ágar nutriente, que foram incubadas a 30 °C por 16 h. Os resultados foram expressos como log (UFC mL<sup>-1</sup>), que denota unidades formadoras de colônias por mililitro usando uma escala logarítmica (Li et al., 2024).

## 2.2 OTIMIZAÇÃO DOS CULTIVOS EM FASE SUBMERSA (CFSM): DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Para otimizar a utilização dos nutrientes que representavam maior impacto no custo do meio de cultura, foi realizado um planejamento fatorial  $2^3$  completo com repetição em triplicata no ponto central com o auxílio do *software* Chemoface. As variáveis testadas foram temperatura de incubação (X1), concentração de peptona (X2) e concentração de extrato de levedura (X3). Os experimentos foram conduzidos em frascos Erlenmeyer com 150 mL de meio de cultura, inoculados com 2% de pré-inóculo e incubados sob agitação orbital a 100 rpm. A tabela 1 representa a matriz do planejamento fatorial completo com valores reais e codificados e com a triplicata no ponto central.

Tabela 1. Variáveis e níveis (-1 e +1) e ponto central (PC) utilizados no planejamento experimental para adequação do meio de cultura para o cultivo submerso de *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* e *Bacillus paralicheniformis*

| Ensaio | Temperatura (°C) | Peptona (g L <sup>-1</sup> ) | Extrato de Levedura (g L <sup>-1</sup> ) |
|--------|------------------|------------------------------|--|
| 2(a)   | 37(-1)           | 2.5(-1)                      | 2.0(-1)                                  |
| 2(b)   | 37(-1)           | 2.5(-1)                      | 4.0(+1)                                  |
| 2(c)   | 37(-1)           | 7.5(+1)                      | 2.0(-1)                                  |
| 2(d)   | 37(-1)           | 7.5(+1)                      | 4.0(+1)                                  |
| 3(e)   | 41(+1)           | 2.5(-1)                      | 2.0(-1)                                  |
| 3(f)   | 41(+1)           | 2.5(-1)                      | 4.0(+1)                                  |
| 3(g)   | 41(+1)           | 7.5(+1)                      | 2.0(-1)                                  |
| 3(h)   | 41(+1)           | 7.5(+1)                      | 4.0(+1)                                  |
| 1 (PC) | 39(PC)           | 5.0(PC)                      | 3.0(PC)                                  |

As respostas avaliadas (variáveis dependentes) foram as contagens de UFC (Unidades Formadoras de Colônias) e de esporos bacterianos. Nesta etapa, novas coletas de amostras foram feitas em intervalos de 12 horas de cultivo para acompanhamento do crescimento microbiano medido através da análise da densidade óptica a 600 nm (pela contagem padrão em placas (CPP) de ágar nutriente de células vegetativas e contagem de esporos).

## 2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todas as análises estatísticas foram realizadas no *software* Chemoface, que foi utilizado tanto para o planejamento experimental quanto para a análise dos dados obtidos. Para o estudo, foi aplicado um delineamento fatorial completo  $2^3$ , permitindo investigar os efeitos principais e as interações entre as variáveis independentes: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), concentração de peptona ( $\text{g L}^{-1}$ ) e concentração de extrato de levedura ( $\text{g L}^{-1}$ ). A variável resposta foi expressa como o logaritmo do número de unidades formadoras de colônias ( $\text{UFC mL}^{-1}$ ). A significância estatística de cada termo do modelo foi avaliada por meio do teste t, com um nível de confiança de 95% ( $p < 0,05$ ).

Os gráficos de Pareto foram utilizados para ilustrar a magnitude dos efeitos principais e das interações, permitindo identificar as variáveis mais influentes no crescimento bacteriano. Neste contexto, os efeitos com valores acima da linha de significância estatística ( $p = 0,05$ ) foram considerados relevantes. Os diagramas de superfície de resposta foram gerados para avaliar as interações entre dois fatores ao mesmo tempo, enquanto o terceiro fator era mantido constante. Essas superfícies forneceram uma representação visual do impacto das variáveis na resposta, facilitando a identificação das condições experimentais ideais para maximizar o crescimento bacteriano.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 CURVAS DE CRESCIMENTO INICIAL

As análises da morfologia celular realizadas por coloração de Gram confirmaram a presença de bastonetes Gram positivos, típicos de espécies de bactérias do gênero *Bacillus* (Figura 1).

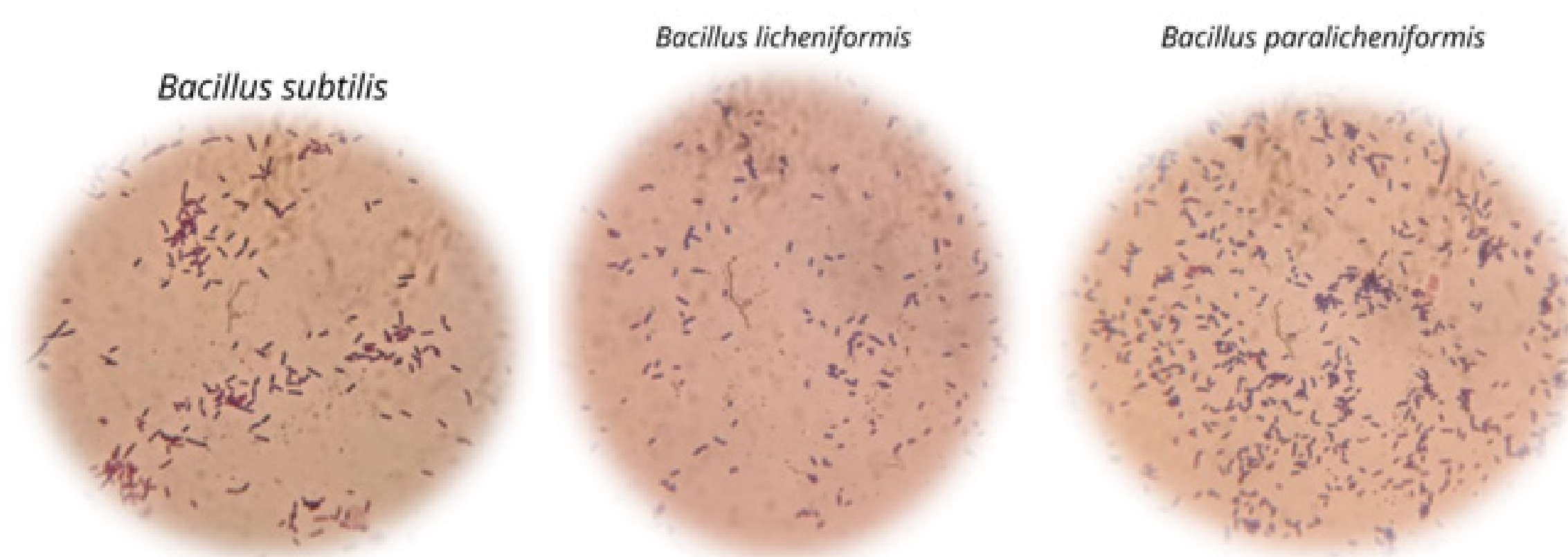


Figura 1. Coloração de Gram das bactérias utilizadas na pesquisa

Os resultados das contagens de células de cada bactéria testada foram apresentados na forma de curvas de crescimento em função do tempo de cultivo (Figura 2).

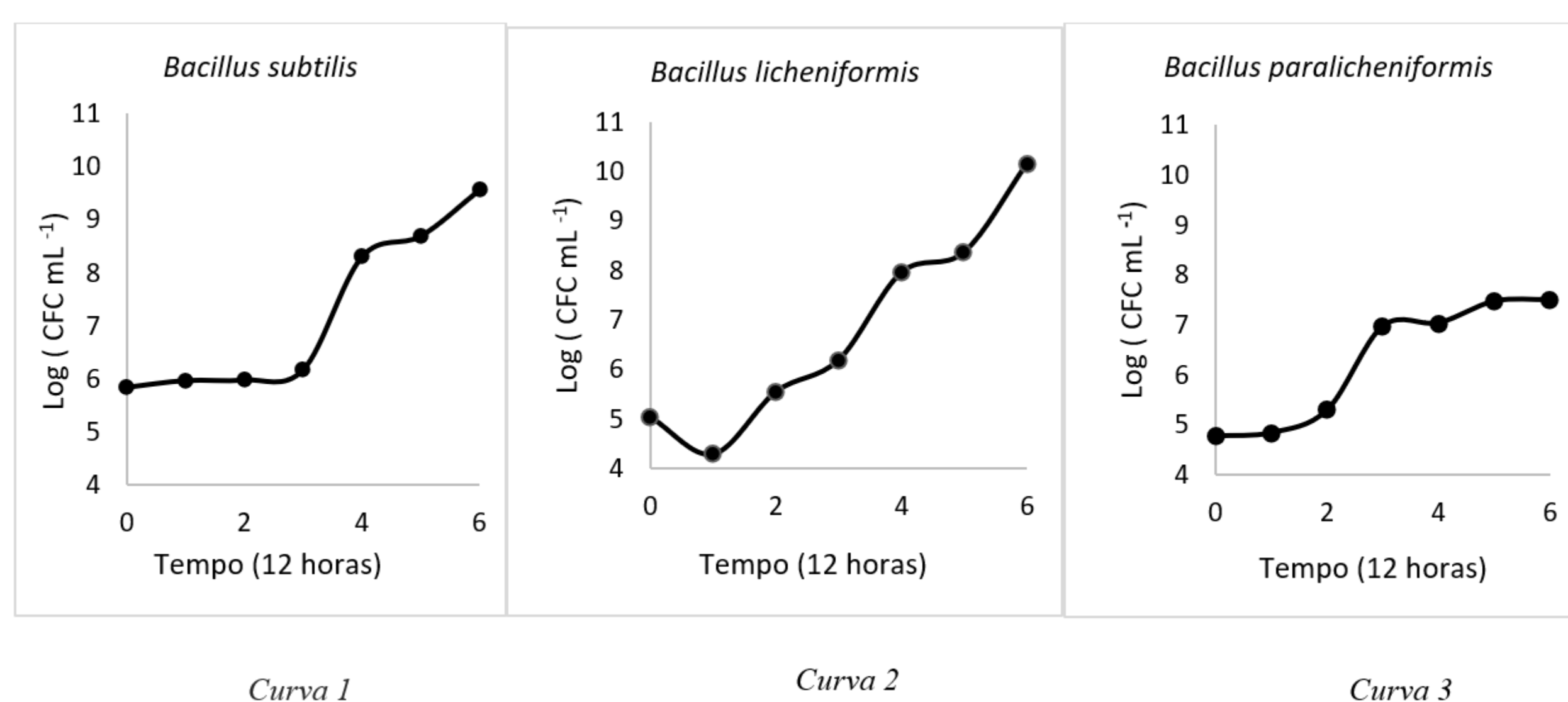


Figura 2. Curvas de crescimento bacteriano utilizando as variáveis propostas pela empresa de Biotecnologia (cultivo de 12 h)

A curva 1 mostra que a bactéria *Bacillus subtilis* apresentou uma fase lag maior quando comparada às demais bactérias, sugerindo maior dificuldade de adaptação ao meio de cultura, entretanto ao entrar na fase exponencial a taxa de crescimento aumentou até o final das 12 h de cultivo. No experimento com a bactéria *Bacillus licheniformis*, é possível observar uma queda nas contagens na primeira hora do cultivo para em seguida o microrganismo retomar o crescimento entrando na fase exponencial e continuar aumentando a população até o final das 12 h (curva 2). *Bacillus paralicheniformis*, por sua vez, apresentou fase lag curta e um crescimento exponencial rápido, entretanto apresentou estabilização do crescimento a partir de 5 h de cultivo (curva 3), o que permite inferir que, ao entrar na fase estacionária em curto espaço de tempo de cultivo, os metabólitos produzidos podem ter inibido o crescimento celular, o que afetaria a capacidade do microrganismo em manter um crescimento em tempos maiores de cultivo. Conforme Biazus et al. (2016), uma fase lag menor e maior velocidade específica máxima de crescimento de uma bactéria justificam uma curva de crescimento mais curta devido ao crescimento rápido do microrganismo.

A avaliação das variáveis que interferem no crescimento microbiano é importante porque permite identificar as etapas da curva de crescimento (fases lag, exponencial e estacionária), e conseqüentemente as condições nas quais o crescimento é mais apropriado para garantir quantidade suficiente de microrganismos que garanta a sua condição de uso como um bioinsumo.

Portanto, os resultados obtidos indicam que a *Bacillus subtilis* pode ser uma bactéria interessante em processos que exigem alta densidade celular, embora leve maior tempo para atingir o pico de crescimento. O *Bacillus licheniformis* pode ser ideal para processos que exigem rápido crescimento inicial e alta produtividade em culturas líquidas, bem como para produção de enzimas ou biossurfactantes. *Bacillus paralicheniformis* pode ser mais útil para aplicações que requerem crescimento mais rápido, mas que não demanda uma alta densidade celular ou longos períodos de cultivo.

### 3.1 ADEQUAÇÃO DO MEIO DE CULTURA PARA CULTIVO SUBMERSO

O diagrama de Pareto para *Bacillus subtilis* revelou que as variáveis temperatura (X1), peptona (X2) e extrato de levedura (X3) tiveram efeitos significativos no crescimento do microrganismo. O extrato de levedura apresentou o maior efeito positivo (0,065), destacando-se como fator crucial para o crescimento bacteriano. A interação entre X2 e X3 (0,072) demonstrou forte sinergia entre os componentes do meio. A temperatura (X1) mostrou influência indireta, afetando o impacto da peptona e do extrato de levedura, evidenciando a importância de controle rigoroso no ambiente de cultivo. Nos diagramas de superfície (Figura 4), áreas vermelhas indicaram condições ideais de temperatura e extrato de levedura para máximo crescimento, enquanto áreas azuis representaram menor atividade. Observou-se que a temperatura de 37 °C combinada com maior concentração de extrato de levedura otimiza o crescimento de *Bacillus subtilis*, o que também é similar aos resultados da autora Miranda-Durán et al. (2020).

Para *Bacillus licheniformis* (Figura 3), a temperatura (X1) e a concentração de peptona (X2) têm os maiores efeitos absolutos, sugerindo que esses fatores são os mais influentes no resultado do experimento. Esses efeitos são significativos porque ultrapassam a linha de  $p=0.05$ . O efeito absoluto da temperatura é de -2.2135, o que indica uma influência negativa significativa no resultado. Isso significa que, à medida que a temperatura aumenta ou diminui, há um impacto considerável no parâmetro medido. No caso da peptona, temos um resultado de -1.4819 também mostrando um impacto significativo. Isso sugere que a quantidade de peptona utilizada tem uma forte influência no resultado final.

No diagrama de Pareto referente a *Bacillus paralicheniformis*, apresentado na Figura 3, o efeito absoluto da peptona é de -0.7338, indicando que é o fator mais influente no crescimento ou produção de *Bacillus paralicheniformis*. Já o extrato de Levedura (X3), observa-se que o efeito absoluto é de -0.21, mostrando uma influência significativa, mas menor que a peptona. Estudo da autora Silva (2021) também apresenta resultados significativos em relação à temperatura, ou seja, o efeito absoluto é de 0.138, sugerindo



que a temperatura tem um impacto positivo, mas menor em comparação com a peptona e o extrato de levedura.

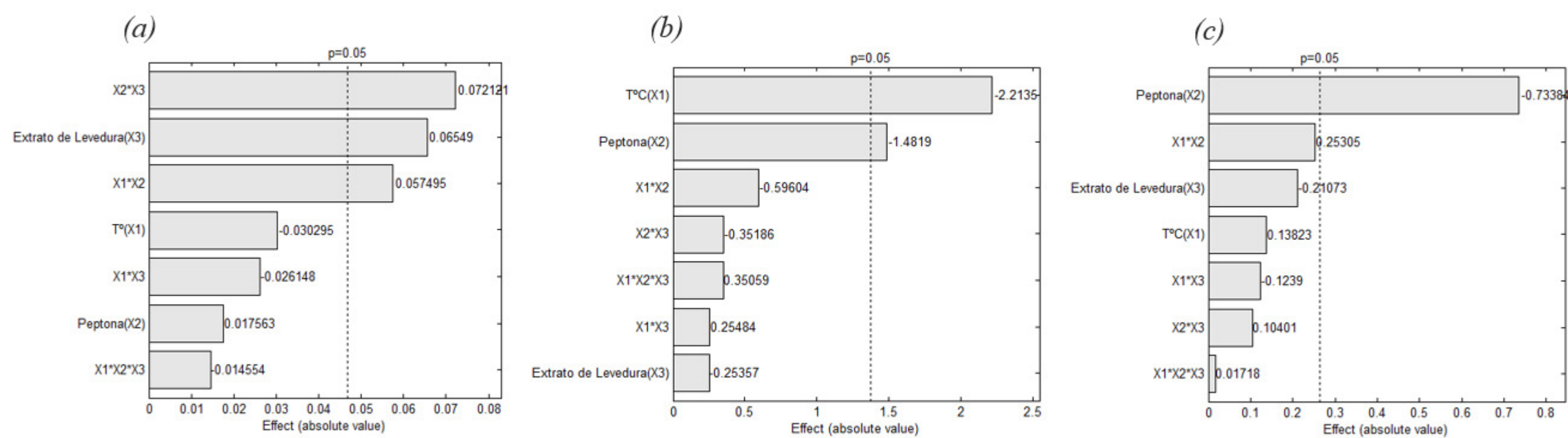


Figura 3. (a) Diagrama de Pareto com variáveis de meio de cultivo do *Bacillus subtilis*. (b) Diagrama de Pareto com variáveis de meio de cultivo do *Bacillus licheniformis*. (c) Diagrama de Pareto com variáveis de meio de cultivo para *Bacillus paralicheniformis*

Nos diagramas de superfície de resposta (Figura 4), áreas vermelhas indicaram condições ideais de temperatura e extrato de levedura para máximo crescimento, enquanto áreas azuis representaram menor atividade. Observou-se que a temperatura de 37 °C combinada com maior concentração de peptona e extrato de levedura otimiza o crescimento de *Bacillus subtilis*.

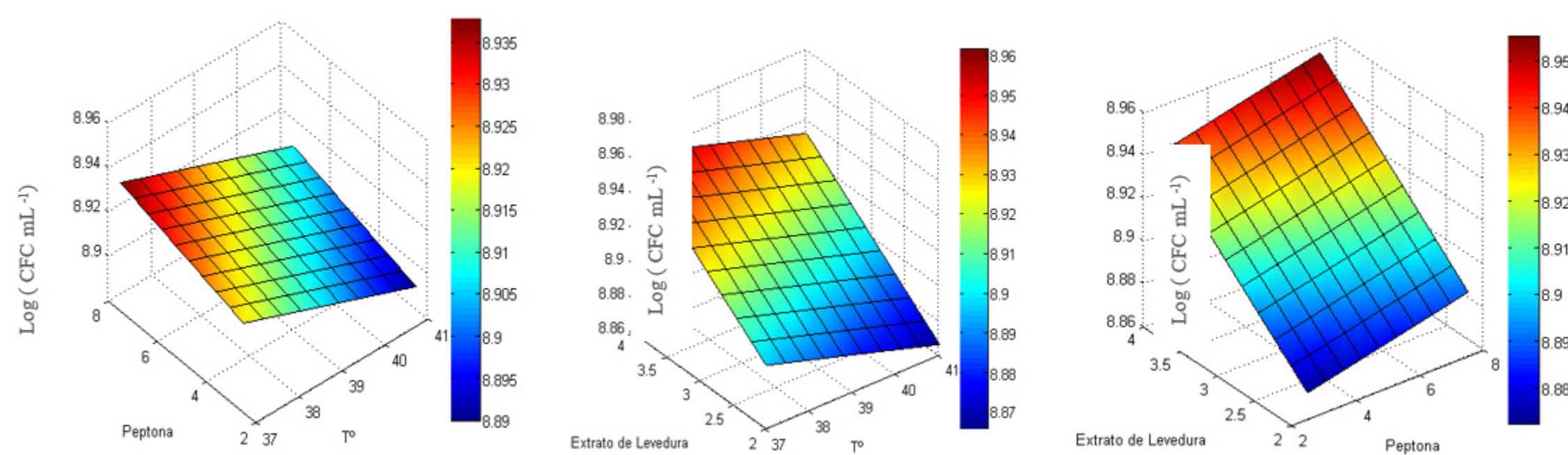


Figura 4. Gráfico de superfície de resposta para a contagem de *Bacillus subtilis* em função da temperatura e das concentrações de peptona (P), extrato de levedura (EL) e das interações entre P e EL

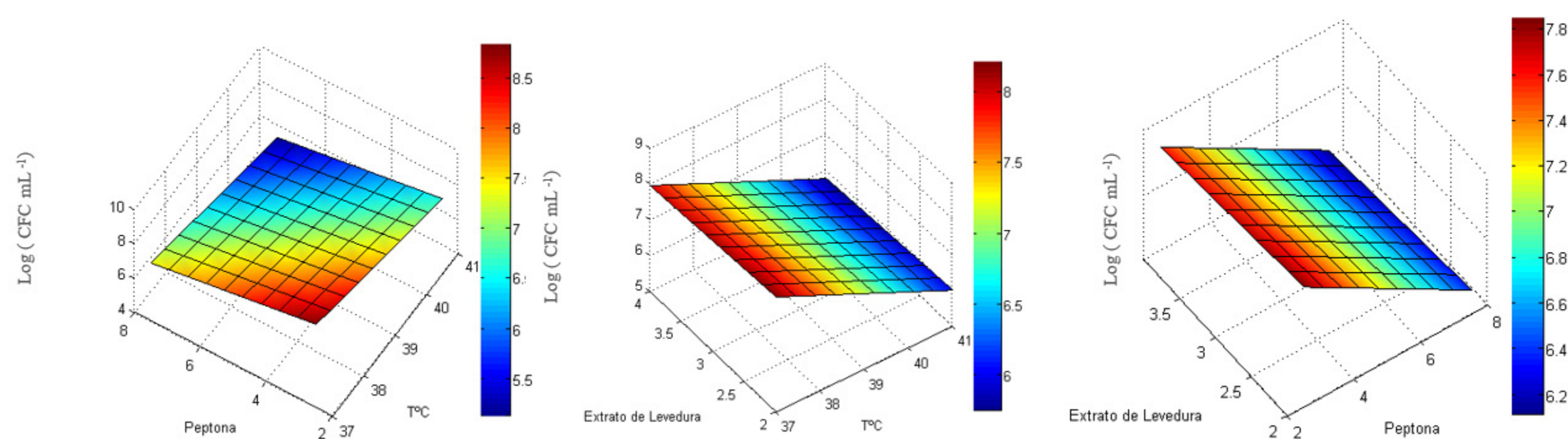


Figura 5. Gráfico de superfície de resposta para a contagem de *Bacillus licheniformis* em função da temperatura e das concentrações de peptona (P), extrato de levedura (EL) e das interações entre P e EL

Analisando o diagrama de superfície conforme a Figura 5, é possível visualizar que as áreas vermelhas indicam níveis altos de atividade ou crescimento e as áreas azuis

indicam níveis baixos. Com isso, conclui-se que, nesta etapa de otimização do meio de cultura, foi necessário utilizar a quantidade mínima de peptona ( $2,5 \text{ g L}^{-1}$ ), aumentar a concentração de extrato de levedura ( $4,0 \text{ g L}^{-1}$ ) e diminuir a temperatura para  $37^\circ\text{C}$ . Os diagramas de superfície apresentados na Figura 6 ilustram a influência de diferentes fatores no crescimento e na atividade do *Bacillus paralicheniformis*, proporcionando uma visão das condições ótimas para o cultivo da bactéria. Concentrações moderadas de extrato de levedura e de peptona apresentam promover um crescimento ótimo do *Bacillus paralicheniformis*. A temperatura não teve maiores influências nesta espécie conforme também descrito por Silva (2021).

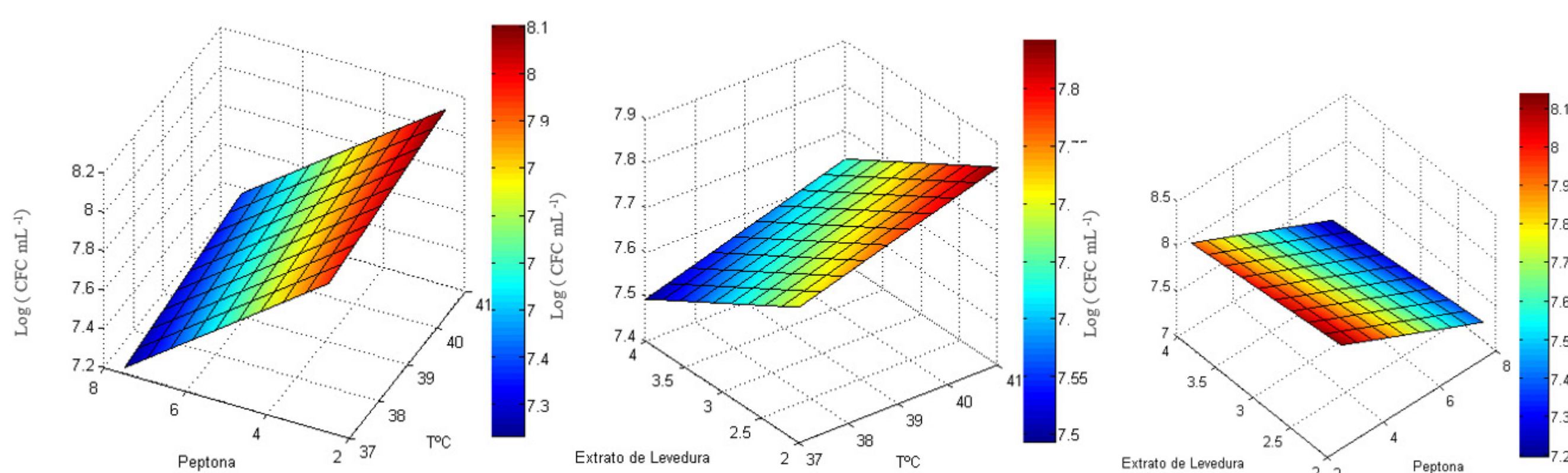


Figura 6. Gráfico de superfície de resposta para a contagem de *Bacillus paralicheniformis* em função da temperatura e das concentrações de peptona (P), extrato de levedura (EL) e das interações entre P e EL

Nos gráficos a seguir, apresentados na Figura 7, observa-se as curvas de crescimento de cada espécie conforme a variação de peptona, extrato de levedura e temperatura.

Na análise das curvas de crescimento do *Bacillus subtilis*, é possível visualizar uma mínima variação, indicando uma consistência e uniformidade em seu crescimento. Na fase de latência (tempo zero), todas as curvas iniciaram com valores aproximados. O ponto central (PC) com a coloração azul representa o ponto central realizado em triplicata conforme o desenho experimental do *software* Chemoface. Compreende-se que, mesmo variando a Temperatura entre ( $37-41^\circ\text{C}$ ), não houve uma mudança significativa em seu crescimento, bem como também demonstrado no diagrama de Pareto uma influência indireta.

*Bacillus licheniformis* se demonstra com crescimento mais variável entre fases, ou seja, teve maior dispersão entre os resultados, sugerindo um maior impacto pelas condições de cultivo. A fase 3(H) conforme a legenda apresentou uma curva com significância de impacto, se apresentando com um declínio significativo logo após 8 horas de cultivo, portanto, é um resultado similar em comparação com o diagrama de superfície de resposta desta bactéria, ou seja, o *Bacillus licheniformis* é impactado negativamente com o aumento da temperatura.

No caso da *Bacillus paralicheniformis* também ocorre uma dispersão não uniforme em suas curvas de crescimento, do qual pode-se concluir que ela também sofre impactos com variáveis de peptona e extrato de levedura. A temperatura não se demonstrou como um valor significativo conforme as análises de curva e diagramas apresentadas neste trabalho.

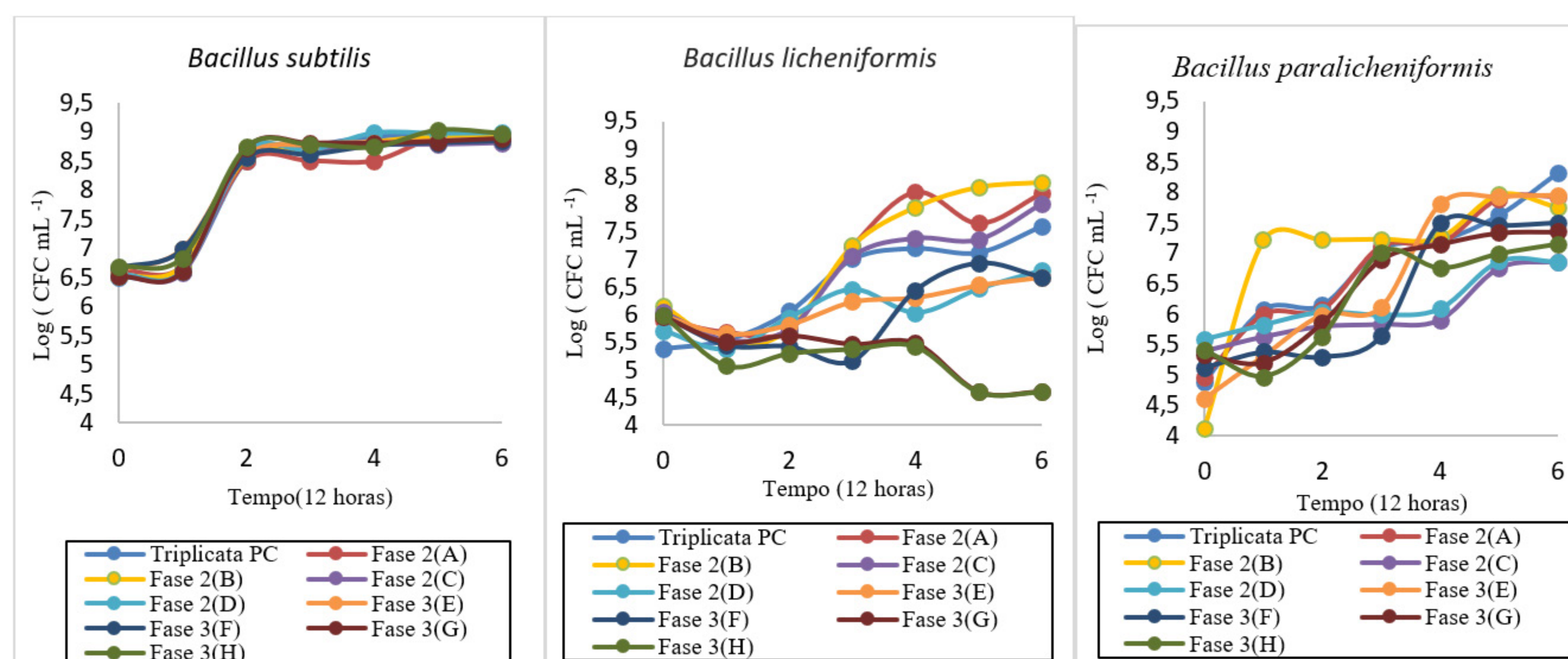


Figura 7. Curvas de crescimento bacteriano utilizando as variáveis propostas pelo *software* Chemoface (cultivo de 12 h)

Todas as bactérias testadas foram capazes de crescer nas condições fermentativas propostas pela empresa, porém apresentaram diferentes tempos para adaptação ao meio de cultura. Na otimização dos processos das bactérias *Bacillus subtilis* e *Bacillus licheniformis*, fermentativos as melhores condições observadas foram temperatura de 37°C e maior concentração de extrato de levedura está no meio de cultivo. Já para o *Bacillus paralicheniformis*, a temperatura não se demonstrou influenciar no crescimento, mas as concentrações moderadas de peptona e o aumento do extrato de levedura apresentaram efeitos no Seu crescimento.

## 4 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a viabilidade da produção de bioinsumos microbianos a partir de diferentes espécies do gênero *Bacillus*, otimizando os parâmetros fermentativos para maximizar o crescimento bacteriano e a viabilidade dos processos em escala industrial. Foi constatado que a temperatura e as concentrações de peptona e extrato de levedura desempenham papéis cruciais no desempenho de cada espécie. Para *Bacillus subtilis*, a combinação de 37°C e uma alta concentração de extrato de levedura mostrou-se ideal, enquanto *Bacillus licheniformis* foi mais influenciado negativamente pela

temperatura e pela concentração de peptona. Por outro lado, *Bacillus paralicheniformis* apresentou um crescimento otimizado com concentrações moderadas de peptona e maiores quantidades de extrato de levedura, com menor influência da temperatura.

Os resultados obtidos reforçam a importância da formulação do meio de cultivo e da adaptação às necessidades específicas de cada microrganismo para aplicações comerciais em bioinsumos. Esses avanços contribuem para o desenvolvimento da bioeconomia, promovendo práticas agrícolas e pecuárias mais sustentáveis, ao mesmo tempo em que reduzem a dependência de insumos químicos tradicionais.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES – código 001 e AO Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq – processo 306216/2022-1.

---

## OPTIMIZATION OF BACTERIAL CULTIVATION FOR SUSTAINABLE BIOINPUT PRODUCTION IN AGRICULTURE

**ABSTRACT:** Applied microbiology in environmental technology is essential for developing bio-inputs, such as biological fertilizers, which reduce dependence on chemical fertilizers and promote sustainable agricultural practices. Bacteria, particularly from the *Bacillus* genus, are used in livestock farming to improve air quality and reduce pathogens, thereby creating a healthier environment for animals. In Brazil, programs encourage the production and use of bio-inputs to boost the bioeconomy and promote sustainability. This study aimed to optimize industrial-scale fermentation parameters for the commercial production of microbial bio-inputs for use in agriculture and livestock farming. The study was conducted at UNISC in partnership with a biotechnology company. The bacterial strains (*Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, and *Bacillus paralicheniformis*) were provided by the partner company. The bacteria were maintained in LB medium and incubated at 37°C for 24 hours, then preserved in cryogenic stocks at -80°C with 20% glycerol. The purity of the strains was verified through Gram staining. Growth curves were performed with the three strains in nutrient medium, incubated at 39°C under agitation. Pre-inocula were cultured and incubated overnight, then transferred to new flasks and

incubated again. Bacterial growth was monitored using spectrophotometry and standard plate counting of vegetative cells. To optimize submerged culture conditions, a 2<sup>3</sup> factorial design was implemented using Chemoface *software*, testing incubation temperature, peptone concentration, and yeast extract concentration. The results demonstrated a significant influence of temperature, peptone, and yeast extract on bacterial growth. Yeast extract had the most positive effect. In the response surface diagrams, the combination of 37°C and a higher yeast extract concentration optimized bacterial growth for *Bacillus subtilis*. For *Bacillus licheniformis*, the most influential factors were temperature and peptone concentration, both of which had significant negative effects. For *Bacillus paralicheniformis*, peptone was the most influential factor, followed by yeast extract, while temperature had a positive but less pronounced effect. These results underscore the importance of medium formulation in optimizing the performance of each species.

**Keywords:** bioinputs.bacillus.biotechnology.environment.

---

## REFERÊNCIAS

Biasuz, T., Vasconcelos, L. I. M., Kalschne, D. L., Buzanello, R.A., Marinês Paula Corso, M. P. & Canan, C. (2016). Modelagem do crescimento de espécies de *Lactobacillus* probióticos. *Anais II Mostra Científica de alimentos, II*, 145.

Carvalho Vidal, M. & Pereira Dias, R. (2023). Bioinsumos a partir das contribuições da agroecologia. *Revista Brasileira de agroecologia*, 18(1), 171-192.

Da Silva, R. N., Melo, L. F. D. A. & Luna Finkler, C. L. (2021). Optimization of the cultivation conditions of *Bacillus licheniformis* BCLLNf-01 for cellulase production. *Biotechnology Reports*, 29, e00599.

Li, Q., Zhang, L., Jespersen, L., Nielsen, D. S. et al. (2024). The role of *Bacillus* strains and growth medium in shaping  $\gamma$ -glutamyl peptide production. *Food Bioscience*, 62, 105103.

Miranda-Durán, S., Porrás-Reyes, L. & Schmidt-Durán, A. (2020). Evaluación de residuos agroindustriales producidos en Costa Rica para la formulación de un medio de cultivo de bajo costo utilizando *Bacillus subtilis* 168. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(4), 15-25.

Monnerat, R., Montalvão, S., Queiroz, E. M., Queiroz, P. M. et al. (2023). *Produção e controle de qualidade de produtos biológicos à base de bactérias do gênero Bacillus para uso na agricultura*. Brasília, D. E. R. G. E. B., 2020: 46 p. (Documentos / Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 369).

Zhang, P., Yin, Y. & Wen, J. (2024). Fermentation optimization and metabolomic analysis of a *Bacillus subtilis* co-culture system for fengycin production from mixed sugars. *Biochemical Engineering Journal*, 209, 109406.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# ANÁLISE PRELIMINAR DE UM SISTEMA INTEGRANDO SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES

*Gustavo S. Colares<sup>1\*</sup>, Lenin D. Garcia<sup>1</sup>, Taina Conzatti<sup>1</sup>, Fernanda N. Brum<sup>1</sup>, Jeferson S. Couto<sup>1</sup>, Juliana F. Barbosa<sup>5</sup>, Luana T. Junqueira<sup>2</sup>, Milena Y. Couto<sup>3</sup>, Letícia Mesacasa<sup>4</sup>, Munique Marder<sup>1</sup>, Odorico Konrad<sup>1</sup>*

---

1 Programa de Pós-Graduação em Ambiente em Desenvolvimento (PPGAD), Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES), 95914-014, Lajeado, Brasil

2 Graduação em Biologia, Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, 95914-014, Lajeado, Brasil

3 Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 97105-900, Santa Maria, Brasil

4 Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental (PPGTA), Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Av. Independência, 2293, 96815-900, Santa Cruz do Sul, RS, Brasil

5 Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (Cpets), Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES), 95914-014, Lajeado, Brasil

\*E-mail: [gustavoscolares@gmail.com](mailto:gustavoscolares@gmail.com)

# RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi conduzir uma análise inicial do desempenho de tratamento de um sistema integrando um tanque de microalgas, um tanque com ilhas flutuantes e das unidades de *Wetlands* Construídos Híbridos (fluxo vertical + fluxo horizontal sub superficial). Durante o período de monitoramento, cerca de 25 litros dos efluentes gerados em um prédio onde ocorrem análises laboratoriais foram coletados e encaminhados ao sistema integrado. Foram analisados os parâmetros turbidez (NTU) cor (Pt-Co), absorvância (420 nm) e sólidos sedimentáveis (mL/L). Em paralelo, foram conduzidos ensaios para selecionar, dentre 3 espécies, a macrófita que melhor se adaptava às condições ambientais. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que o sistema foi eficiente na redução dos parâmetros analisados, apresentando eficiências médias de redução de 95,4% para turbidez, 75,0% para sólidos sedimentáveis, 84,2% para cor e 89,4% para absorvância (420 nm). Em relação às macrófitas flutuantes, a espécie que melhor se adaptou às condições impostas foi a *Lemna*. Entretanto, é importante destacar que este é apenas um monitoramento analítico inicial, que deve ser considerado um período mais longo de análises e englobando mais parâmetros, conforme a legislação ambiental vigente.

**Palavras-chave:** *Wetlands* Construídos. Fitorremediação. Macrófitas. Sistema Híbrido. Policultivo.

---

## 1 INTRODUÇÃO

Soluções Baseadas na Natureza estão sendo aplicadas na busca por tornar cidades e outros ambientes mais resilientes. Além de apresentar uma alternativa eficiente e com custo-benefício interessante, o conceito de SBN está diretamente relacionado com diversos outros conceitos, como sustentabilidade, serviços ecossistêmicos, infraestrutura verde, dessa forma trazendo benefícios para a sociedade e o meio ambiente (Laforteza et al., 2018). O emprego de SBNs nas cidades tem impulsionado o desenvolvimento de diversas pesquisas avaliando sistemas de tratamento de efluentes em escalas laboratorial, piloto e real. Dentre as diferentes SBNs, os *Wetlands* Construídos (WCs) têm se destacado por serem uma tecnologia de fitorremediação considerada limpa e eficiente no tratamento de efluentes, além de promover integração paisagística, detoxicação e recuperação de áreas degradadas (Mesacasa et al., 2024).



Além dos WCs, outras tecnologias consideradas SBNs e que vêm aumentando em popularidade são as ilhas flutuantes e os tanques de cultivo de microalgas. As ilhas flutuantes consistem em sistemas nos quais macrófitas naturalmente emergentes são fixadas em suportes flutuantes, de forma que as raízes atuam como um filtro natural na coluna d'água, retendo partículas e absorvendo nutrientes (Colares et al., 2020). Já a remediação de efluentes através de microalgas é realizada em uma dessas configurações: lagoas de alta taxa, filtro de algas (ATS) e tanques fechados do tipo coluna. Um dos principais benefícios dessas tecnologias de cultivo de algas é a prevenção da poluição associada ao conceito de economia circular, devido à possível recuperação de recursos e geração de bioprodutos (Leong et al., 2021). Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi de avaliar o monitoramento inicial de um sistema integrando diferentes tecnologias consideradas SBNs, como tanque de microalgas, ilhas flutuantes e WC.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 LOCAL DE ESTUDO E OPERAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

O sistema piloto desenvolvido no presente trabalho foi construído e operado dentro da Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES), no *campus* Lajeado. Durante as primeiras 3 semanas, as unidades foram alimentadas com efluente secundário diluído (50% efluente e 50% água d'água). A partir de junho de 2024, o sistema passou a ser alimentado diariamente com 30 litros de efluentes oriundos de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETA) após o tratamento primário (composto por tanque anaeróbico compartimentado). Esse efluente é gerado em um prédio em que são conduzidas análises laboratoriais, principalmente ambientais e de alimentos. A ETE do estabelecimento recebe cerca de 12 m<sup>3</sup>/dia, e desses apenas uma fração dos efluentes era coletada e levada para alimentação do sistema integrado desenvolvido.

### 2.2 LAYOUT DO SISTEMA INTEGRADO

O sistema integrado era composto por quatro unidades de tratamento sequenciais compostas por diferentes SBNs. Cada uma construída em tanques de fibra com volume de 100 litros. A tubulação utilizada foi de diâmetro 32 mm e a passagem do efluente de um tanque para o outro era por gravidade. O primeiro estágio consistiu em um tanque de microalgas com uma bomba submersa recirculando a água até uma rampa, de onde por gravidade o efluente caía de volta para o tanque. O segundo estágio de tratamento

era composto por uma Ilha Flutuante, na qual um suporte mantinha 6 mudas (3 mudas de *Canna generalis* e 3 mudas de *Cyperus papyrus* Nanus); este tanque foi planejado para desempenhar um papel de decantador da biomassa algal.

Os estágios seguintes foram compostos por *Wetlands* Construídos híbridos, em uma configuração de fluxo vertical (WCFV) seguida por uma unidade de fluxo horizontal subsuperficial (WCFH). O WCFV foi preenchido com brita n. 0 (pedrisco) na camada superior e brita n. 1 na cada inferior para drenagem. Neste tanque, duas tubulações perfuradas foram posicionadas acima do substrato para distribuir o efluente pela superfície do material filtrante e entrar em contato com ar atmosférico.

Já o WCFH foi preenchido com brita n. 0 na entrada e na saída do tanque, sendo tanto as tubulações de entrada e saída enterradas nesse tanque. A região central do tanque foi preenchida com areia grossa. O material filtrante de ambas as unidades foi previamente lavado para remover o pó da brita, que poderia causar problemas de colmatção no sistema. Na Figura 1, é apresentado um desenho simplificado do sistema integrado desenvolvido:

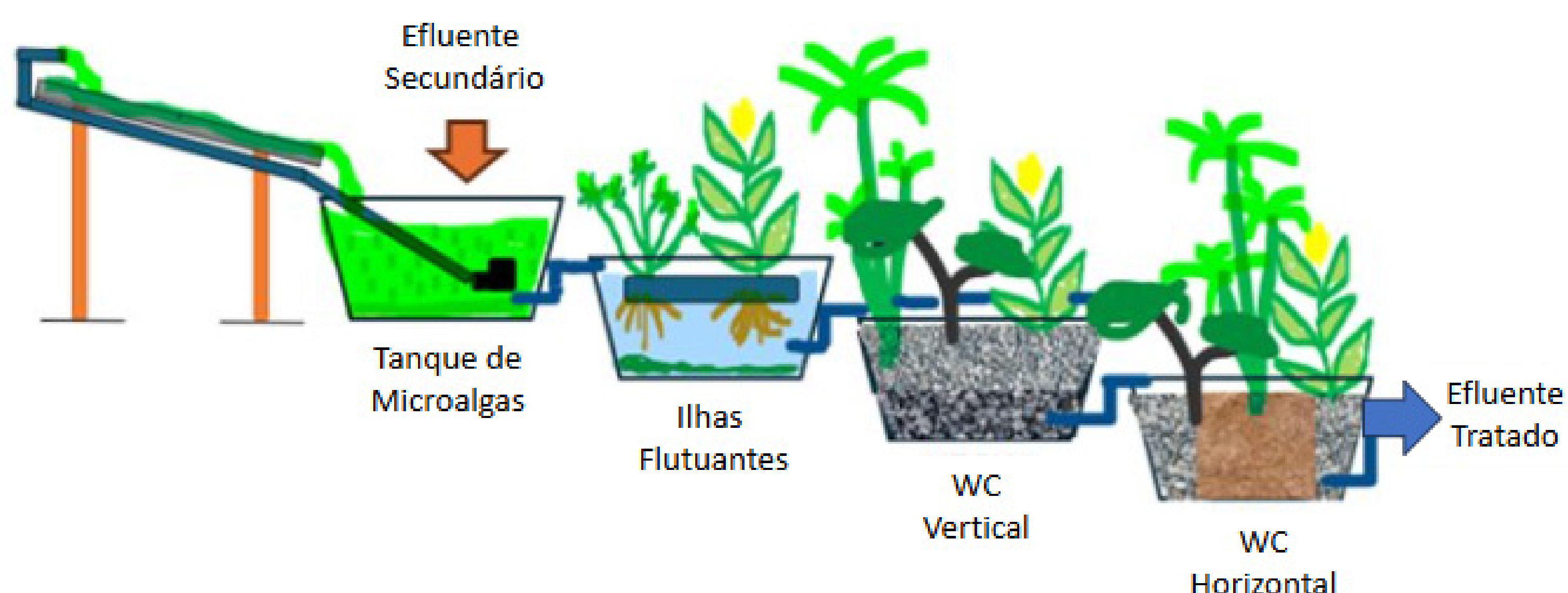


Figura 1. Representação gráfica das unidades que compõem o sistema integrado de tratamento

Em relação às macrófitas empregadas, foram testadas e utilizadas diferentes combinações de espécies. No tanque de microalgas (TM), esperou-se crescer naturalmente as microalgas presentes no próprio ambiente. Nas ilhas flutuantes, foram inseridas mudas de *Canna generalis* e *Cyperus papyrus* Nanus. Já os *Wetlands* Construídos foram vegetados com mudas de *C. generalis*, *C. papyrus*, *Zantedeschia aethiopica*, *Xanthosoma sagittifolium* e *Typha domingensis*. Além disso, foram testadas diferentes espécies de macrófitas flutuantes, para selecionar a que melhor se adaptava às condições do efluente em tratamento.

## 2.3 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA DOS AFLUENTES

Em relação ao monitoramento analítico do sistema, as amostras foram coletadas semanalmente em frascos plásticos e preservadas conforme as recomendações *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* – APHA / AWWA (2012). As análises foram realizadas no Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (CPETS) e no Laboratório de Química do Bloco 8 da Univates. Os parâmetros analisados foram Cor (Pt-Co), Absorbância (420 nm), Turbidez e Sólidos Sedimentáveis (1 hora em cones Imhoff). Para esta análise inicial, foi considerado o período de partida do sistema, durante três 3 semanas (3 campanhas de análises), visando avaliar principalmente a capacidade de clarificação do sistema integrado desenvolvido.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 DESEMPENHO DE TRATAMENTO

O monitoramento analítico dos efluentes nessa fase preliminar consistiu na campanha de coleta a análise de amostras durante um período inicial de 3 semanas. Na Figura 2, são apresentados os resultados verificados em relação aos parâmetros monitorados.

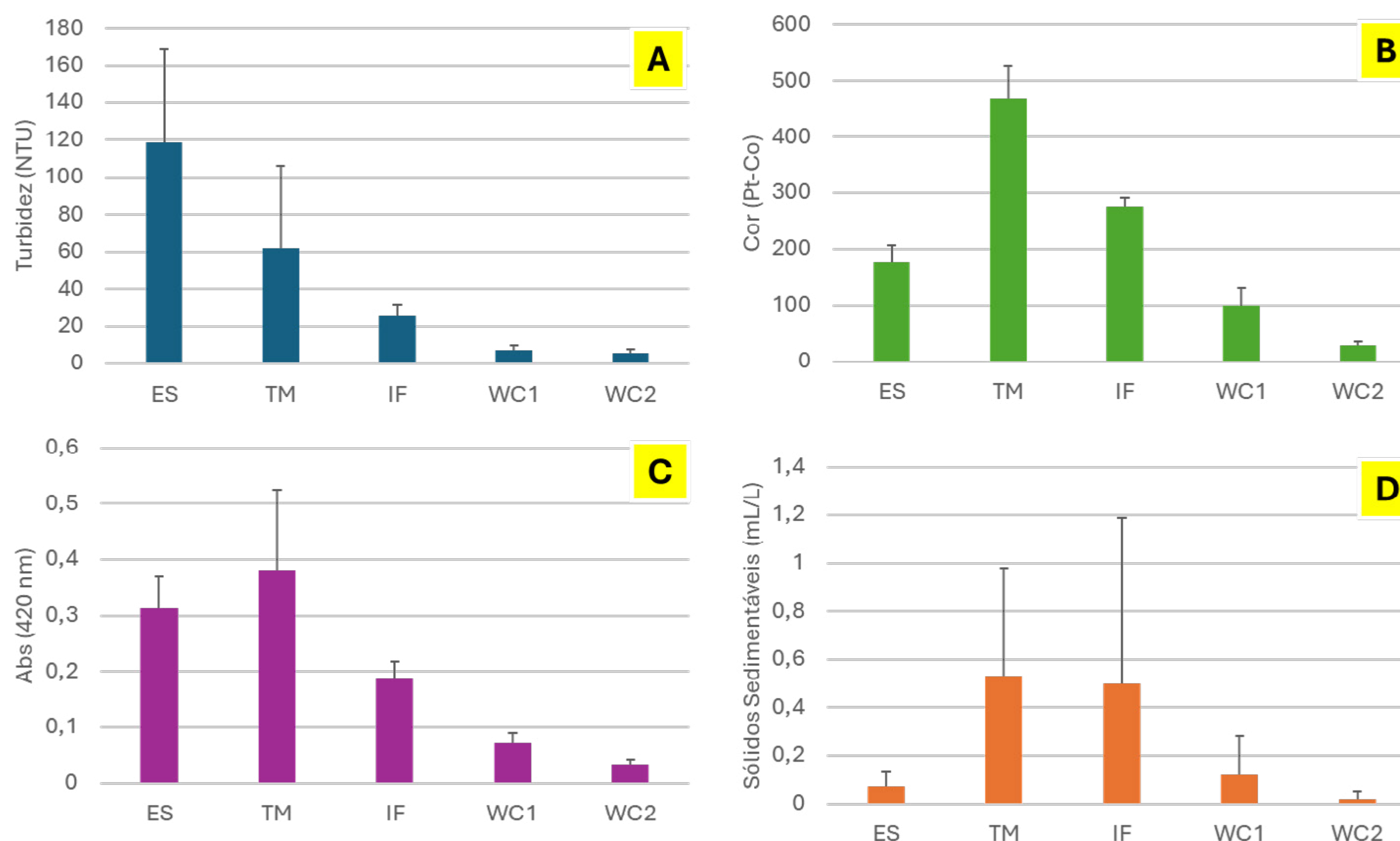


Figura 2. Médias e desvios padrões dos efluentes antes e após cada uma das etapas de tratamento. A: turbidez; B: Cor; C: Absorbância (420 nm) e D: Sólidos sedimentáveis (mL/L). ES: Efluente Secundário, TM: Tanque de Microalgas, IF: Ilhas Flutuantes, WC1: *Wetland* Construído de Fluxo Vertical, WC2: *Wetland* Construído de Fluxo Horizontal Subsuperficial

A partir dos resultados encontrados, o sistema integrado demonstrou uma eficiência média de 95,4% em termos de turbidez presente no efluente. As duas unidades que mais reduziram este parâmetro foram o TM e as IF, provavelmente devido à absorção e adsorção das partículas coloidais pelas microalgas e pelas raízes das plantas flutuantes, assim como pela ação de decantação dos sólidos, principalmente no segundo estágio. Em relação à cor, o sistema de tratamento alcançou uma eficiência média de 84,2%. Entretanto, é interessante destacar que um aumento considerável foi observado no TM, que deve ter sido provocado diretamente pelo elevado crescimento de microalgas verificado nesta unidade.

Uma tendência semelhante foi observada com o parâmetro sólidos sedimentáveis. Para este parâmetro, foi observada uma eficiência global do sistema de 75,0%. Todavia, foram verificados aumentos deste parâmetro após a unidade da TM e da IF. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da biomassa das microalgas e pela passagem de pedaços de raízes das plantas suspensas no segundo estágio. Neste sentido, mostrou-se importante a presença de um material filtrante nos estágios seguintes, para filtrar e reter estes sólidos sedimentáveis. Não somente, após o tratamento, o efluente apresentava os sólidos sedimentáveis em acordo com o padrão estabelecido pela Resolução CONSEMA 355/17, que é de 1 mL/L de efluente (CONSEMA, 2017). A Figura 3 apresenta registros fotográficos das amostras durante a realização dos ensaios de sólidos sedimentáveis.

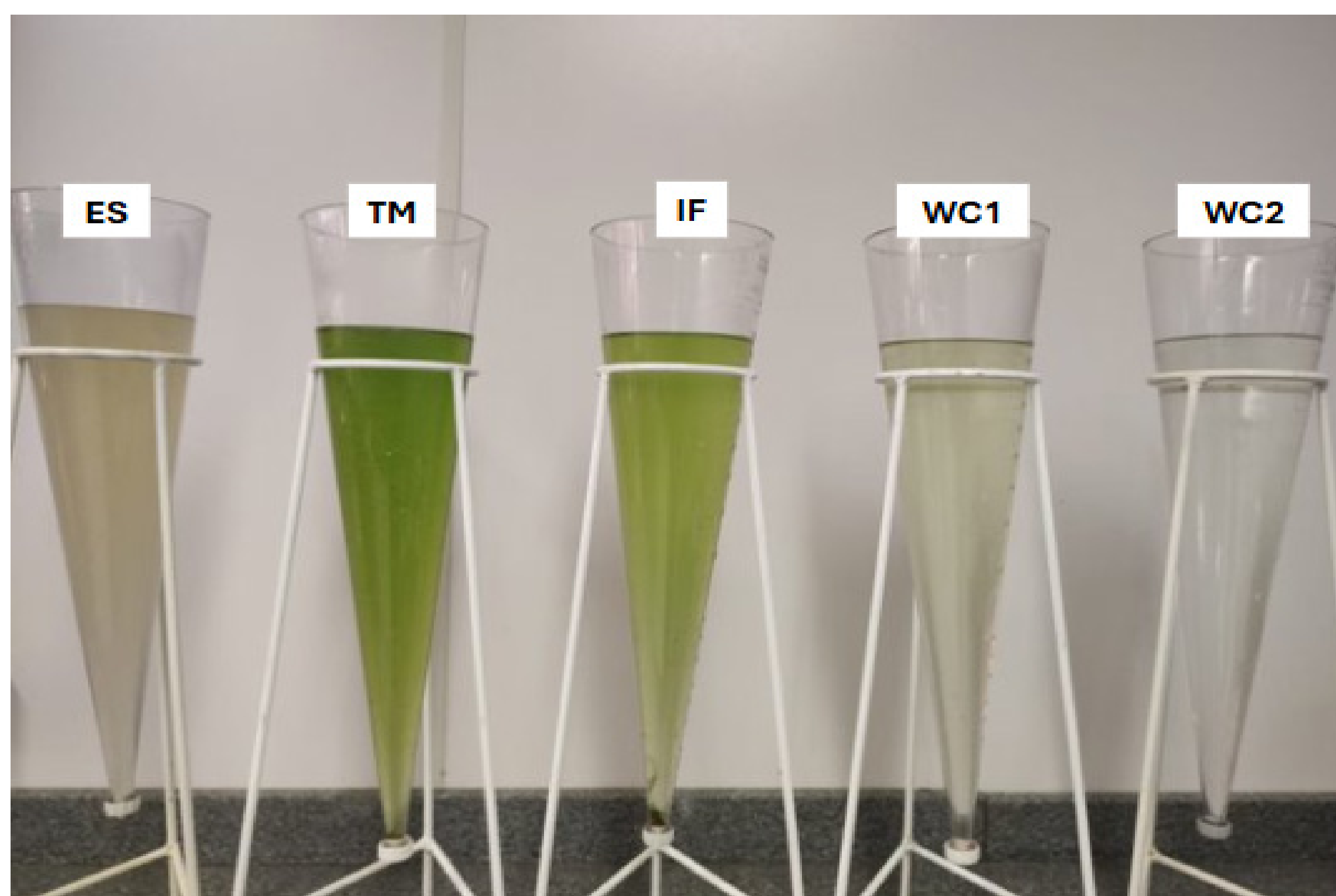


Figura 3. Registro das amostras coletadas antes e após cada uma das etapas de tratamento do sistema integrado. Onde ES: Efluente Secundário, TM: Tanque de Microalgas, IF: Ilhas Flutuantes, WC1: *Wetland* Construído de Fluxo Vertical e WC2: *Wetland* Construído de Fluxo Horizontal Subsuperficial

A partir das Figuras 2 e 3, fica visível o desenvolvimento de microalgas na primeira unidade de tratamento (TM) assim como a capacidade de retenção delas nas etapas seguintes. Resultados semelhantes foram verificados por Silveira et al. (2020), os quais avaliaram um sistema de microalgas seguido por duas unidades sequenciais de WCs de fluxo vertical para o tratamento de efluentes oriundos de *campus* universitário. Os autores obtiveram eficiências médias de redução de turbidez de 97,3% e de 88,2% para absorvância (420 nm), valores semelhantes aos verificados no presente trabalho.

### 3.2 SELEÇÃO DE MACRÓFITAS FLUTUANTES

Em relação aos testes com macrófitas flutuantes, foi avaliada a aplicação de três espécies diferentes: *Azolla* sp., marrequinha d'água (*Salvinia* sp.) e lentilha d'água (*Lemna* sp.). Cada uma das espécies coletadas foi adicionada em um recipiente plástico (20 L) alimentado pelos efluentes em tratamento durante cerca de 15 dias com efluentes diluídos (50%) e 1 mês com o efluente diretamente da ETE. A Figura 4 apresenta registros fotográficos das 3 espécies de macrófitas flutuantes avaliadas:

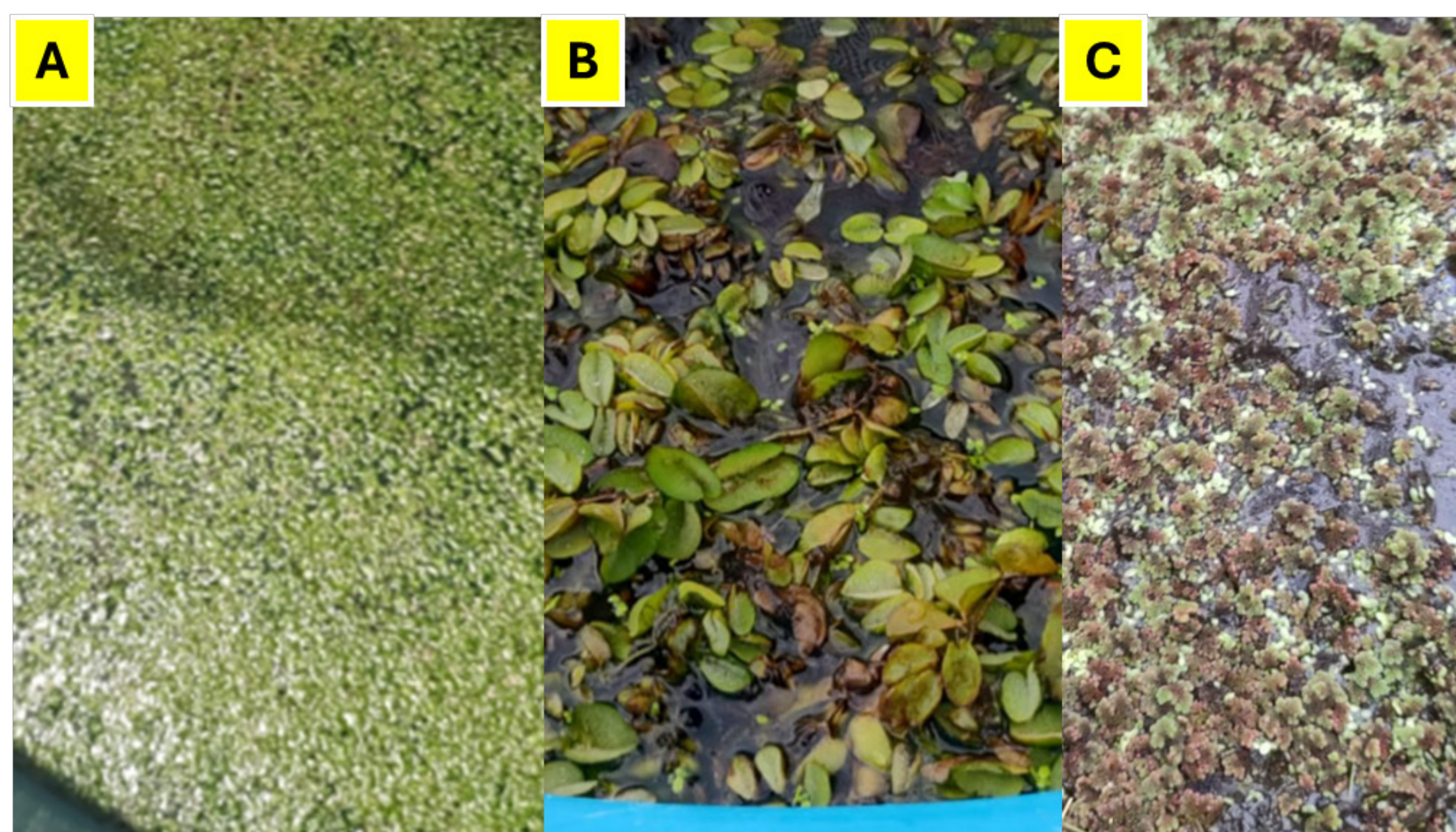


Figura 4. Registros fotográficos das diferentes espécies de macrófitas flutuantes avaliadas. A: *Lemna* sp. B: *Salvinia* sp. e C: *Azolla* sp

Após o período de aclimação e alimentação, foi avaliado o crescimento das macrófitas selecionadas. A *Azolla* sp. foi a primeira a não se adaptar às condições ambientais (temperatura, pH, carga de poluentes) e rapidamente foi reduzindo seu número até os poucos indivíduos que sobraram serem descartados. Enquanto isso, a *Salvinia* apresentou um rápido crescimento inicial, principalmente durante o período de aclimação com efluente diluído. Porém, passadas algumas semanas, essa espécie também teve seu crescimento comprometido e aos poucos foi morrendo no recipiente. Já a *Lemna* sp. foi a espécie que melhor se adaptou e respondeu às condições impostas,

tendo seu crescimento extremamente rápido durante a aclimação e no período posterior. Por este motivo, esta espécie foi selecionada para os experimentos que se sucederam utilizando o efluente a ser tratado.

## 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar que o sistema de tratamento desenvolvido (TM + IF + WC1 + WC2) foi eficiente no desempenho de descolorimento do efluente empregado, considerando os parâmetros analisados (turbidez, cor, absorvância e sólidos sedimentáveis). Entretanto, é importante destacar que um monitoramento analítico mais longo é necessário e que sejam incluídos também análises em relação à presença de matéria orgânica (como  $\text{DBO}_5$  e DQO) assim como o potencial eutrofizante do efluente, por exemplo, avaliando-se as concentrações de NTK e P total.

## AGRADECIMENTOS

Gustavo Stolzenberg Colares agradece à FAPERGS/CNPq – Programa de apoio à fixação de jovens doutores no Brasil, Processo 150208/2023-5.

---

## PRELIMINARY ANALYSIS OF A SYSTEM INTEGRATING NATURE-BASED SOLUTIONS FOR WASTEWATER TREATMENT

**ABSTRACT:** The objective of the present work was to conduct an initial analysis regarding the treatment performance of a system integrating a microalgae tank, a tank with floating islands and the two units of Hybrid Constructed Wetlands (Vertical Flow + Subsurface Horizontal Flow). During the monitoring period, about 25 liters of effluents generated in a building where laboratory analyses took place were collected and sent to feeding the integrated system. The parameters turbidity (NTU), color (Pt-Co), absorbance (420 nm) and sedimentable solids (mL/L) were analyzed. In parallel, assays were conducted to select, among 3 species, the macrophyte that best adapted to environmental conditions. From the results obtained, it was verified that the system efficiently reduced the parameters analyzed, presenting average reduction efficiencies of 95.4% for turbidity, 75.0% for sedimentable solids, 84.2% for color and 89.4% for absorbance (420 nm). Regarding the floating macrophytes, the species that best adapted

to the conditions imposed was Lemna. However, it is important to highlight that this is only an initial analytical monitoring, which should be considered a longer period of analysis and encompassing more parameters, according to the current standards from the environmental legislation.

**Keywords:** Constructed Wetlands. Phytoremediation. Macrophytes. Hybrid System. Policulture.

---

## REFERÊNCIAS

Colares, G. S., Dell’Osbel, N., Wiesel, P. G., Oliveira, G. A., Lemos, P. H. Z., da Silva, F. P., ... & Machado, Ê. L. (2020). Floating treatment wetlands: a review and bibliometric analysis. *Science of the Total Environment*, 714, 136776.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – CONSEMA. Resolução CONSEMA 355. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no estado do Rio Grande do Sul. 2017.

Lafortezza, R., Chen, J., Van Den Bosch, C. K. & Randrup, T. B. (2018). Nature-based solutions for resilient landscapes and cities. *Environmental research*, 165, 431-441.

Leong, Y. K., Huang, C. Y. & Chang, J. S. (2021). Pollution prevention and waste phycoremediation by algal-based wastewater treatment technologies: the applications of high-rate algal ponds (HRAPs) and algal turf scrubber (ATS). *Journal of Environmental Management*, 296, 113193.

Mesacasa, L., Cabral, F. S., Fochi, D. A. T., da Silva Oliveira, W., Oliveira, F., Kersting, M., ... & Machado, Ê. L. (2024). Constructed Wetlands and the role of the fungal community for wastewater treatment: A review. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 4.

Silveira, E. O., Lutterbeck, C. A., Machado, Ê. L., Rodrigues, L. R., Rieger, A., Beckenkamp, F. & Lobo, E. A. (2020). Biomonitoring of urban wastewaters treated by an integrated system combining microalgae and constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 705, 135864.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# PROCESSO FOTOSSINTÉTICO DE REMOÇÃO DE CO<sub>2</sub> DO BIOGÁS POR MEIO DE APLICAÇÃO DE MICROALGAS DA ESPÉCIE *CHLORELLA* *SOROKINIANA*

*Fernanda Nicolodi Brum<sup>1\*</sup>, Munique Marder<sup>1</sup>, Gustavo S. Colares<sup>1</sup>,  
Romualdo J. C. Wanderley<sup>2</sup>, Joice Mors<sup>1</sup>, Camila N. G. Stacke<sup>1</sup>, Marciana  
Cechin<sup>1</sup>, Rodrigo da Silveira<sup>3</sup>, Odorico Konrad<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> \*Programa de Pós-Graduação em Ambiente em Desenvolvimento, Universidade do Vale do Taquari, 95914-014, Lajeado, Brasil.

<sup>2</sup> Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (Cpets), Universidade do Vale do Taquari, 95914-014, Lajeado, Brasil.

<sup>3</sup> Graduação em Biologia, Universidade do Vale do Taquari, 95914-014, Lajeado, Brasil.

\*E-mail: nicolodinanda@gmail.com



# RESUMO

Este estudo investigou a eficiência da remoção de CO<sub>2</sub> do biogás utilizando microalgas *Chlorella sorokiniana*, cultivadas em um fotobiorreator em conjunto com uma coluna de absorção. O experimento foi realizado em uma planta piloto, com fotobiorreator de 87,5 L e coluna de 7,85 L, durante 72 horas. O biogás utilizado foi gerado a partir de resíduos orgânicos em um biodigestor. A circulação de líquidos e gases foi monitorada e a eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> foi calculada. Os resultados mostraram que a concentração de metano aumentou após a purificação, enquanto os níveis de CO<sub>2</sub> diminuíram, indicando que as microalgas foram eficazes na remoção do gás. A eficiência média de remoção de CO<sub>2</sub> foi de 40,68%. O melhor desempenho ocorreu durante a noite, quando a aeração e a temperatura mais amenas favoreceram a atividade das microalgas. A variação no pH foi mínima, mantendo-se em níveis próximos ao neutro. A pesquisa sugere que o método fotossintético de purificação de biogás pode ser uma solução promissora e econômica para o tratamento de biogás, com potencial de aplicação em escala real.

**Palavras-chave:** Biogás. Purificação. Biometano. Energias renováveis.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O biogás é uma fonte de energia renovável produzida a partir da decomposição anaeróbia de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, alimentares e até mesmo de esgoto. O processo ocorre na ausência de oxigênio e resulta principalmente em metano (CH<sub>4</sub>), um gás que pode ser utilizado para a geração de eletricidade, aquecimento ou como combustível para veículos (Zhou, Chaemchuen & Verpoort, 2017). A produção de biogás não só oferece uma solução energética sustentável, mas também tem um impacto positivo na redução da poluição. A utilização de biogás pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, comparado a fontes de energia fósseis tradicionais (Silva, 2015).

A composição do biogás é principalmente feita por metano (40 - 75%) e dióxido de carbono (15 - 60%), podendo conter também pequenas quantidades de vapor de água (5 - 10%), sulfeto de hidrogênio (0,005 - 2%), siloxanos (0 - 0,2%), hidrocarbonetos (< 0,6%), amônia (< 1%), oxigênio (0 - 1%), monóxido de carbono (< 0,6%) e nitrogênio (0 - 2%) (Ghouali; Sari; Harmand, 2015). Para que o biogás possa ser usado com eficiência e segurança, os gases poluentes como dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio precisam ser removidos.

Para mitigar esses efeitos, tecnologias de purificação e remoção de CO<sub>2</sub> têm sido desenvolvidas, com destaque para métodos biológicos que utilizam microalgas e outras formas de biomassa. A utilização de microalgas para captura de CO<sub>2</sub>, como a espécie *Chlorella sorokiniana*, tem sido considerada promissora, pois essas algas realizam a fotossíntese e podem converter o CO<sub>2</sub> em biomassa (Castro, 2022). Em suma, o biogás representa uma importante alternativa para a geração de energia renovável, ao mesmo tempo em que enfrenta desafios relacionados à purificação e à captura de CO<sub>2</sub>. O aumento do consumo de energia e crescimento da demanda populacional causaram novas demandas a fim de atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 das Nações Unidas (ODS), dando ênfase ao sétimo objetivo, ao movimento de Green Building, no qual é imperativo realizar um esforço significativo para incrementar a produção de energia renovável, que pode gerar menores valores de consumo que a proveniente de combustíveis fósseis (Da Silva Dantas; Fontgalland, 2021).

Nesse cenário, o objetivo deste trabalho foi avaliar o processo fotossintético de remoção de CO<sub>2</sub> do biogás por meio de aplicação de microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana*. Acredita-se que, assim, o uso de microalgas para capturar CO<sub>2</sub> do biogás não só poderá contribuir para a produção de energia limpa e renovável, mas também oferecer uma estratégia promissora para lidar com os desafios ambientais atuais.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 SISTEMA DE FOTOBIORREATOR E COLUNA DE TRANSFERÊNCIA PARA CULTIVO DE MICROALGAS

A pesquisa foi realizada no Centro de Pesquisa em Energias e Tecnologias Sustentáveis (CPETS), localizado no Parque Científico e Tecnológico do Vale do Taquari (Tecnovates) da Universidade do Vale do Taquari – Univates. Os protótipos foram montados e instalados na Planta Piloto (Prédio 26).

O fotobiorreator foi confeccionado em vidro temperado, de 8 mm de espessura, em formato quadrado com dimensões de 0,50 m, totalizando um volume de 87,50 L. Durante um período de 2 semanas antecedendo o experimento, houve a adaptação das microalgas. A coluna de purificação foi composta em polimetilmetacrilato transparente com diâmetro de 0,10 m e altura de 1 metro, com volume total de 7,85 L com conexões interligadas por meio de uniões de cloreto de polivinila (PVC). Durante um período de 12 horas (6 pm a 6 am), transcorreu a iluminação e a aeração do fotobiorreator, ao longo da

aclimação e dos dias do experimento. A iluminação foi realizada por uma lâmpada de led UVB (Raios Ultravioleta B) rosa, já a aeração foi realizada por um compressor de ar da marca VigoAr, modelo 100, com potência de 2,5 W e vazão de 4 L/min. Durante os testes, a coluna de absorção foi preenchida com 5,5 L da solução inserida no fotobiorreator.

Os testes de purificação duraram 72 horas ininterruptas, do dia 22 a 25 de outubro de 2024, com início às 12:00 horas. Durante esse período, a circulação do líquido foi mantida a uma vazão constante de 65 L/h. Entretanto, após 72 horas de testes de remoção de CO<sub>2</sub>, a vazão do biogás não foi suficiente para manter o sistema e foi finalizado o experimento. O sistema operou em temperatura ambiente e com iluminação natural durante o dia, durante a noite com iluminação artificial e aeração.

O sistema desenvolvido no presente trabalho foi baseado no sistema descrito por Mörs et al. (2024) e é composto por um fotobiorreator e uma coluna de absorção (Figura 1).

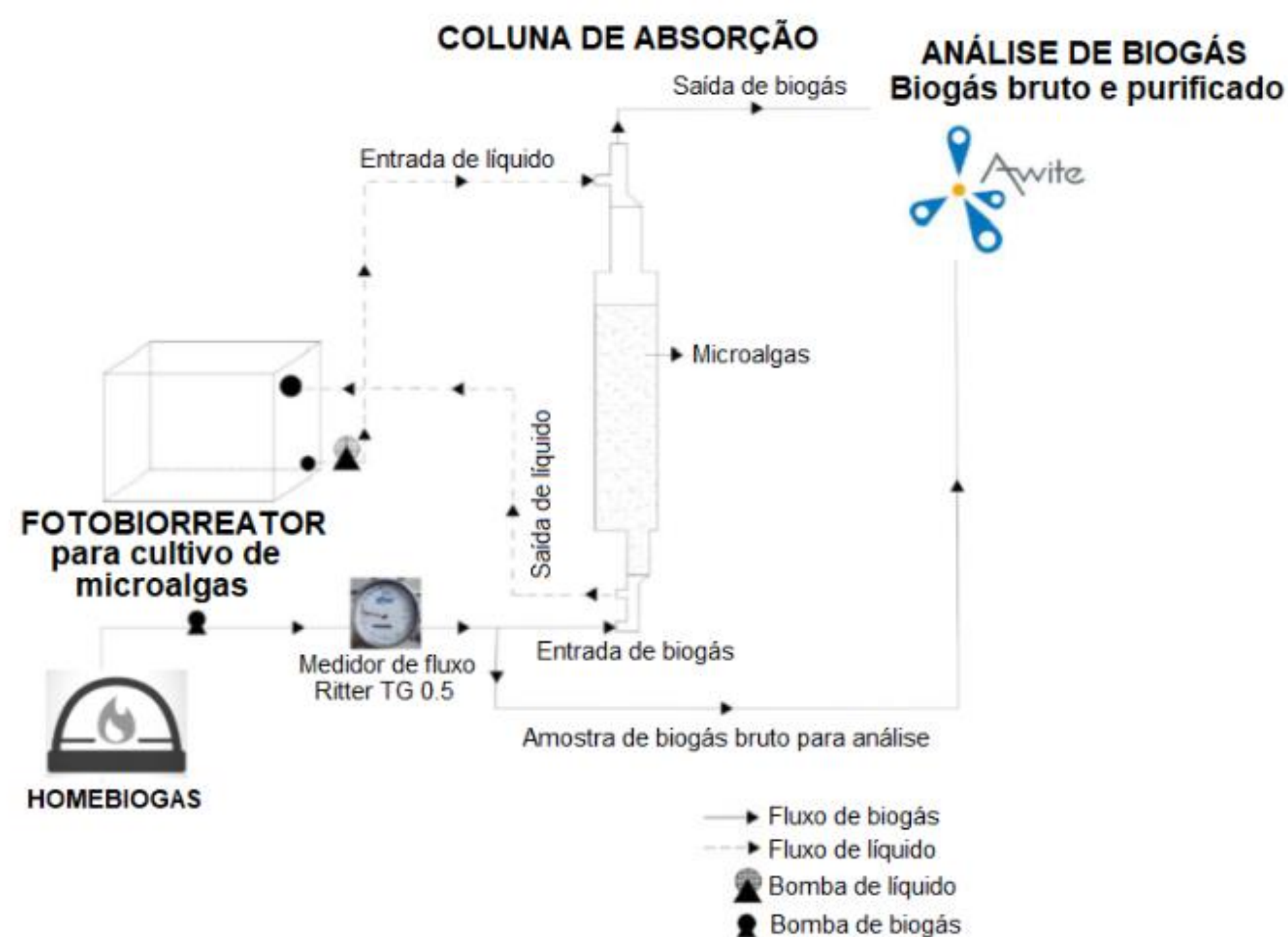


Figura 1. Sistema adaptado de Mörs et al. (2024)

## 2.2 CHLORELLA SOROKINIANA E BIOGÁS

A espécie de microalga utilizada nos testes foi a *Chlorella sorokiniana* Shi-hira & R.W.Krauss, de Domínio: Eukaryota, Reino: Protista, Divisão: Chlorophyta, Classe: Trebouxiophyceae, Ordem: Chlorellales, Família: Chlorellaceae, Gênero: Chlorella. Fornecida pela empresa especializada em microalgas Syntalgae Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos à Base de Microalgas Ltda. Foram utilizados 0,5 L de solução nutritiva (meio de cultivo comercial desenvolvido e fornecido pela Syntalgae) e 0,5 L de microalgas (*C. sorokiniana*) para 46L de água deionizada, totalizando 47 L.

O biogás utilizado para os experimentos foi gerado em um biodigestor HomeBiogas 7.0, com volume do tanque de gás de 2,5m<sup>3</sup> e volume do tanque de digestão de 4,3 m<sup>3</sup>. A alimentação desse sistema ocorreu através de resíduos orgânicos de uma empresa alimentícia da região, que foram inseridos no biodigestor, que realiza uma digestão anaeróbia, transformando os resíduos em gás (biogás). A temperatura do reator variou de acordo com a temperatura ambiente, visto que ele se encontra em um local aberto. Para possibilitar a avaliação da remoção de CO<sub>2</sub> com diferentes concentrações, foi realizada a purificação do biogás armazenado no gasômetro do próprio HomeBiogas durante o período do experimento.

Para a circulação do líquido e do biogás foram utilizadas bombas Mini Water Pump modelo Rs-385, acopladas à fonte de alimentação variável, modelo FA 3005M, marca AFR, com tensão de saída ajustável variando de 0 a 32 V DC e corrente de 0 a 5 A DC, permitindo a regulação do fluxo de bombas de biogás e líquidos. O biogás é movimentado através de mangueiras e de uma bomba Rs-385 para a coluna de absorção, e uma bomba para o meio líquido, para movimentar as microalgas entre o fotobiorreator e a coluna. A vazão de água foi monitorada medindo o volume ao longo do tempo usando uma proveta de 1L e um cronômetro; o volume do gás foi determinado por um medidor de vazão da Ritter, modelo TG 0.5. Diariamente foi feito o registro manual dos valores da vazão no meio gasoso, cujo valor utilizado foi de 0,5 L por minuto; já no meio líquido a vazão foi de 1 L por minuto. Para uniformizar e reduzir o diâmetro das bolhas de biogás injetadas na coluna de absorção e melhorar a transferência do gás/líquido, foi utilizada uma pedra difusora porosa no fundo da coluna.

As amostras de biogás para análise de qualidade foram coletadas logo após a saída do HomeBiogas 7.0, antes da passagem pela coluna de absorção (biogás bruto) e após a passagem da coluna (biogás purificado). As análises de qualidade do gás foram realizadas a cada 1 hora, utilizando o analisador de gases Awiflex da Awite. O analisador de gases faz a leitura da composição do biogás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) por meio de sensores individuais, sensor infravermelho de feixe duplo ou eletroquímico. Para a eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> no biogás foi calculada conforme Equação 1 (Flores-Cortés et al., 2021):

$$\text{Eficiência de Remoção} = \frac{\text{concentração da entrada da coluna} - \text{concentração da saída da coluna}}{\text{concentração da entrada da coluna}} \times 100$$

O pH do fotobiorreator foi monitorado com leituras realizadas em triplicata no início e no final de cada dia de experimento por meio de um pHmetro digital da marca DIGIMED, modelo DM-2P. Não houve correção de pH durante o período de teste ou de aclimatização. O sistema operou 24 horas diariamente e amostras de biogás bruto e de

biogás purificado para análise foram coletadas a cada 1 hora durante as 72 horas do experimento. As amostras coletadas foram analisadas pelo espectrofotômetro Thermo Scientific, modelo Genesys 10S UV-Vis, para avaliar o crescimento de microalgas durante o período de teste. Foram analisadas quatro amostras no comprimento de onda de 680 nm, coletadas após aclimação das microalgas e no primeiro, segundo, terceiro e quarto dias do experimento. Na fotossíntese existe um comprimento de onda indicado para leituras, pois o intervalo espectral que compreende do UV ao infravermelho, onde a fluorescência fica em torno de 680 nm (Betemps & Ramos, 2021).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 MONITORAMENTO DE BIOGÁS

Os valores da composição do biogás, antes da coluna de absorção, estão dispostos na Figura 2. Nela é possível observar que o percentual de metano no biogás mantém-se relativamente constante, próximo de 50-60%. Já os níveis de CO<sub>2</sub> têm valores médios em torno de 30-40%. O nível de oxigênio foi baixo, permanecendo próximo a 1-2%. O controle da composição inicial é crucial para avaliar a eficiência dos métodos de purificação e garantir que o biogás esteja dentro dos padrões de qualidade esperados.

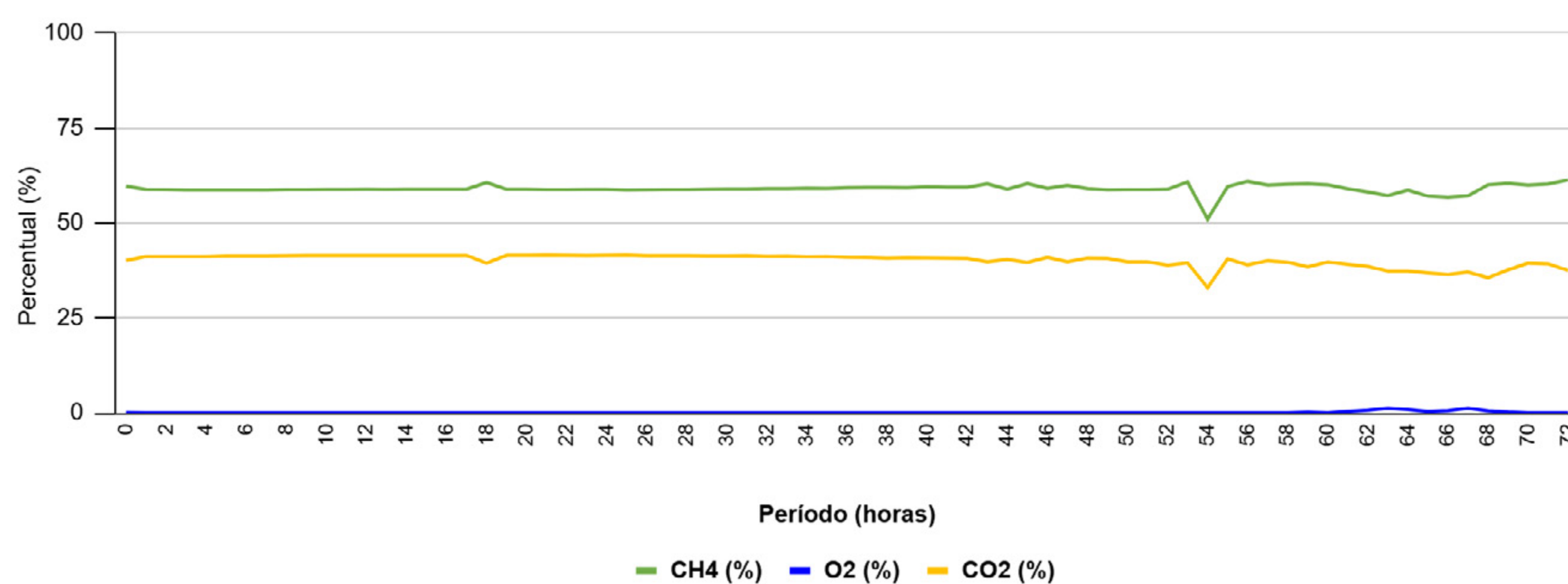


Figura 2. Composição de Biogás antes da coluna de absorção (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>)

A Figura 3 demonstra a composição de biogás (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>) após a passagem pela coluna de absorção. Com o processo de purificação do biogás, foi possível observar que os níveis de metano aumentam significativamente, ultrapassando 75% em diversos momentos, indicando eficiência no enriquecimento do biogás. Há uma queda notável nos níveis de CO<sub>2</sub>, que pode se correlacionar diretamente com o aumento de eficiência do CH<sub>4</sub>. A redução do CO<sub>2</sub> reflete a capacidade fotossintética da *Chlorella sorokiniana*,

que o consome como fonte de carbono para crescer e se reproduzir (Camargo, 2020). O percentual de oxigênio permanece baixo, sem variações relevantes, mantendo-se entre 1-3%; esse pequeno aumento em relação aos valores iniciais pode ser relacionado ao fato de que o experimento estava recebendo aeração 12 horas por dia.

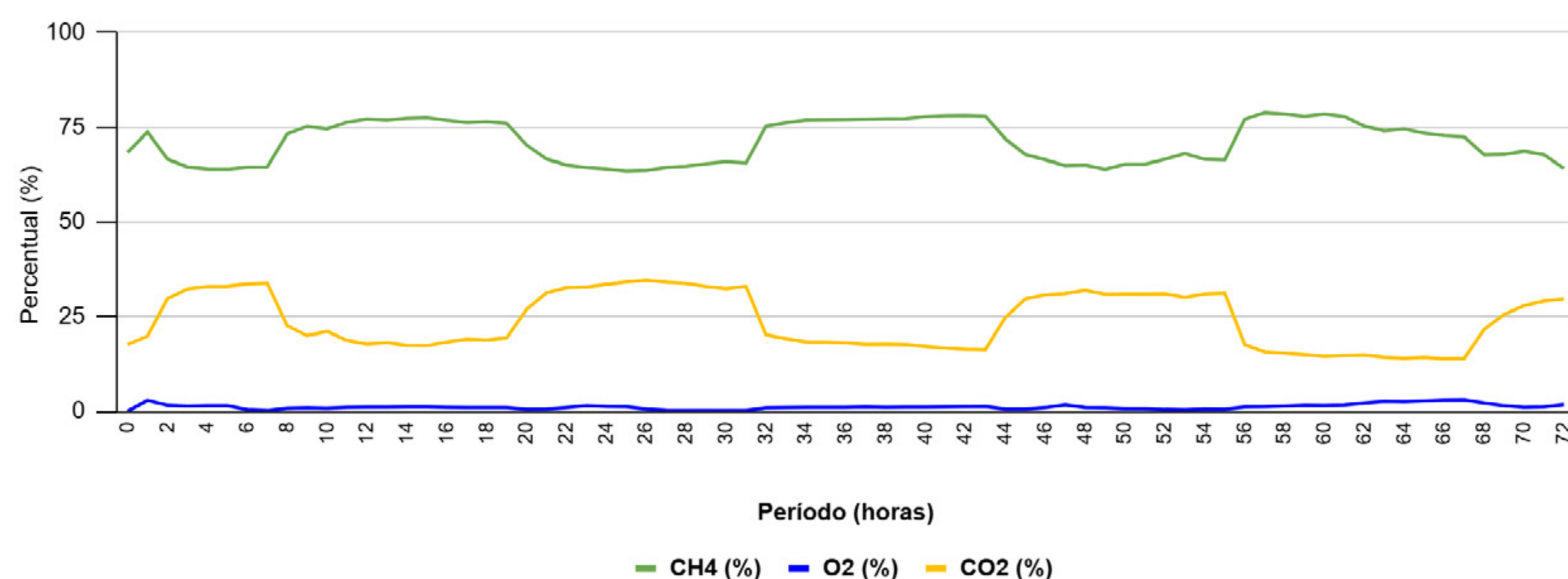


Figura 3. Composição de Biogás (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>) após coluna de absorção

O aumento considerável no teor de CH<sub>4</sub> indica que a purificação foi eficaz, removendo o dióxido de carbono. A redução do CO<sub>2</sub> para níveis menores mostra a eficiência de purificação através das microalgas *Chlorella sorokiniana*. Durante a noite, a temperatura, a luz artificial e a aeração estavam ligadas, o que pode ter influenciado os resultados encontrados, já que os melhores resultados ocorreram no período noturno.

Durante a operação do sistema, a temperatura não foi controlada. As temperaturas do ambiente variaram de 13 °C a 30 °C, ao longo do dia, com menores temperaturas no período noturno. Como a solubilidade do CO<sub>2</sub> diminui com o aumento da temperatura, temperaturas um pouco mais baixas nesta fase experimental poderiam ter favorecido uma melhor dissolução do biogás no meio líquido, facilitando a biofixação do CO<sub>2</sub> pelas microalgas (Castro, 2022).

## 3.2 ABSORBÂNCIA E PH

Na Tabela 1, são apresentados os valores de pH e absorvância (680 nm) das amostras coletadas de biogás, durante as 72 horas de experimento. O pH mostrou uma leve variação nos valores, indicando uma estabilidade relativa das amostras ao longo dos dias. Os valores variam entre 7,28 e 7,43, mantendo-se em uma faixa neutra, o que é importante para diversos processos químicos e biológicos. A absorvância indica os valores diferentes em cada um dos dias, variando de 1,11 a 1,66. Esses números refletem a interação da passagem do biogás pelas microalgas, sugerindo mudanças nos compostos presentes.

Tabela 1. Valores de pH e absorvância

| Dia | pH   | Absorbância (680 nm) |
|-----|------|----------------------|
| 1   | 7,28 | 1,11                 |
| 2   | 7,32 | 1,38                 |
| 3   | 7,43 | 1,20                 |
| 4   | 7,35 | 1,66                 |

A faixa neutra dos valores do pH pode ser essencial para garantir a eficiência de processos biológicos, como a purificação do biogás, nesse caso. A variação na absorvância que o aumento dos valores pode indicar que houve um crescimento na densidade celular das microalgas ao longo dos dias (Turati, 2020). Isso pode ser associado a condições favoráveis, como aeração, disponibilidade de luz, nutrientes (biogás) e temperatura.

### 3.3 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE CO<sub>2</sub>

A Figura 4 apresenta dois conjuntos de dados principais: a eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> e o percentual de aumento de CH<sub>4</sub> ao longo de diferentes períodos. O biogás purificado continha em média 59,02% ± 1,26% de CH<sub>4</sub> e 40,23% ± 1,70% de CO<sub>2</sub>. Isto representa uma eficiência média de 40,68 ± 17,96% de redução de CO<sub>2</sub> e um aumento médio de 20,66 ± 9,42% na concentração de CH<sub>4</sub>.



Figura 4. Eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> e percentual de aumento de CH<sub>4</sub>

A eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> e o aumento de CH<sub>4</sub> demonstraram proporcionalidade, ou seja, quanto maior a redução na concentração de CO<sub>2</sub>, maior será a eficiência do conteúdo CH<sub>4</sub>. Esse comportamento é evidenciado pela Figura 4. Durante o dia é possível

observar períodos de estabilidade, já no período noturno nota-se quedas bruscas e maiores eficiências na remoção. Na hora 54, é possível observar uma discrepância em relação aos demais resultados, proveniente de uma queda de luz, que ocorreu nesse momento fazendo com que o sistema tivesse que ser reiniciado.

A aeração e a luminosidade durante o período da noite podem ter sido responsáveis pela melhora na remoção de CO<sub>2</sub> devido a fatores relacionados ao aumento na disponibilidade de oxigênio e à ativação dos processos microbiológicos envolvidos no tratamento. Quando há uma maior disponibilidade de oxigênio, ocorre o aumento do oxigênio dissolvido no sistema, o que favorece as atividades de microrganismos aeróbicos que consomem CO<sub>2</sub> como parte do processo metabólico. Outro ponto é que, durante a noite, as temperaturas tendem a ser mais amenas e estáveis, o que pode criar um ambiente mais favorável para a atividade microbiológica, otimizando o desempenho do sistema (Meier et al., 2017).

Portanto, a partir dos resultados obtidos, observou-se que o período noturno com aeração favoreceu um ambiente mais propício para os microrganismos que removem o CO<sub>2</sub>, resultando em um desempenho superior. A aeração noturna pode ser especialmente eficaz na remoção de CO<sub>2</sub> devido à maior eficiência do metabolismo aeróbico dos microrganismos em condições otimizadas, como níveis adequados de oxigênio dissolvido e temperaturas mais estáveis.

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a remoção de CO<sub>2</sub> do biogás por meio de métodos fotossintéticos empregando um protótipo composto por fotobiorreator e coluna de absorção com utilização de microalgas da espécie *Chlorella sorokiniana*. A partir dos resultados iniciais, concluiu-se que o sistema é promissor para remoção de CO<sub>2</sub> do biogás. Porém, é necessário desenvolver estudos que considerem o controle do pH e a vazão do biogás, por períodos superiores, fatores que podem ter influenciado na remoção dos componentes analisados para que se obtenha melhores resultados.

Os resultados desta pesquisa demonstram que a maior eficiência ocorreu no período da noite, relacionada diretamente à aeração, temperatura e luminosidade empregadas ao experimento. Esses dados permitem avançar no conhecimento sobre o tratamento biológico do biogás, uma vez que foi avaliada uma espécie isolada de microalga e o biogás produzido em um piloto foi utilizado um HomeBiogas em escala com resíduos sólidos provenientes de uma indústria alimentícia, elaborando assim uma estratégia promissora para lidar com os desafios ambientais atuais.



# AGRADECIMENTOS

Fernanda Nicolodi Brum agradece ao CNPq, Processo 405689/2022-5.

---

## PHOTOSYNTHETIC PROCESS FOR REMOVING CO<sub>2</sub> FROM BIOGAS THROUGH THE APPLICATION OF MICROALGAE OF THE SPECIES CHLORELLA SOROKINIANA

**ABSTRACT:** This study investigated the efficiency of CO<sub>2</sub> removal from biogas using *Chlorella Sorokiniana* microalgae, cultivated in a photobioreactor combined with an absorption column. The experiment was conducted in a pilot plant, with a 87.5 L photobioreactor and a 7.85 L column, for 72 hours. The biogas used was generated from organic waste in a biodigester. The circulation of liquids and gases were monitored, and the CO<sub>2</sub> removal efficiency was calculated. The results showed that the methane concentration increased after purification, while CO<sub>2</sub> levels decreased, indicating that the microalgae were effective in removing the gas. The average CO<sub>2</sub> removal efficiency was 40.68%. The best performance occurred during the night, when aeration and cooler temperatures favored the activity of the microalgae. pH variation was minimal, remaining close to neutral levels. The research suggests that the photosynthetic biogas purification method can be a promising and cost-effective solution for biogas treatment, with potential for real-scale application.

**Keywords:** Biogas; Purification; Biomethane; Renewable energies.

---

## REFERÊNCIAS

Betemps, D. L. & Ramos, R. F. (2021). Avaliações não destrutivas em pós-colheita. *Informe Agropecuário*, 42(314).

Camargo, E. C. de. (2020). *Estudo da fisiologia do crescimento, produção de biomoléculas e fotossíntese em 30 espécies de microalgas verdes de água doce*.

Castro, A. A., Junges, E. L., Marder, M., Mörs, J. & Konrad, O. (2022). Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água. *Research, Society and Development*, 11(10).

Castro, A. A., Horn, B. C., Becker, C. M., Oliveira, G. & Konrad, O. (2022). Purificação biológica de biogás por processo fotossintético utilizando microalgas. *Research, Society and Development*, 11(13).

Da Silva Dantas, N. & Fontgalland, I. L. (2021). Análise das leis ambientais brasileiras e sua interface com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável-ODS. *Research, Society and Development*, 10(4), p. e32010414248-e32010414248.

Flores-Cortés, M. et al. (2021). H<sub>2</sub>S oxidation coupled to nitrate reduction in a two-stage bioreactor: Targeting H<sub>2</sub>S-rich biogas desulfurization. *Waste Management*, 120, 76-84.

Ghouali, A., Sari, T. & Harmand, J. (2015). Maximizing biogas production from the anaerobic digestion. *Journal of Process Control*, 36, 79-88.

Meier, L., Barros, P., Torres, A., Vilchez, C. & Jeison, D. (2017). Photosynthetic biogas upgrading using microalgae: effect of light/dark photoperiod. *Renewable Energy*, 106, 17-23.

Mörs, J., Colares, G. S., Junqueira, L. T., Oliveira, G. M. de, Dullius, A., Buffon, G. & Konrad, O. (2024). Photosynthetic process for removing H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> from biogas using the microalgae *Chlorella sorokiniana*. *Caderno Pedagógico*, 21(4), e3723.

Turati, D. F. M. et al. (2020). *Efeito de nanopartículas de carbono fluorescentes (Krill A32) no crescimento da microalga Chlorella sorokiniana Embrapa/LBA# 39*.

Zhou K., Chaemchuen, S. & Verpoort, F. (2017). Alternative materials in technologies for Biogas upgrading via CO<sub>2</sub> capture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1414-1441.



IV SEMINÁRIO SUL  
DE INOVAÇÕES  
EM TECNOLOGIAS  
AMBIENTAIS

# INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: O IMPACTO POSITIVO DOS FERTILIZANTES FLUÍDOS NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA

*Adrize Medran Rangel<sup>1\*</sup>, Eduarda Medran Rangel<sup>2</sup>, Eduardo Franceschette<sup>3</sup>*

---

1 Mestranda no PPGCamb, UFPel, Pelotas, Brasil.

2 Docente vinculada ao curso de Gestão Ambiental, UFPel, Pelotas, Brasil

3 Diretor Comercial, Ourofertil Fertilizantes LTDA, Pelotas, Brasil

\*E-mail: [adrizemr@hotmail.com](mailto:adrizemr@hotmail.com)

# RESUMO

O Brasil é um dos maiores consumidores de fertilizantes no mundo devido à sua forte agricultura, especialmente em culturas como soja, milho e café. Os fertilizantes são divididos em três categorias principais: nitrogenados, fosfatados e potássicos, todos essenciais para garantir a produtividade agrícola, especialmente em solos tropicais como os do Brasil, que são frequentemente pobres em nutrientes. Os fertilizantes fluidos são aliados essenciais na agricultura, combinando alta eficiência na nutrição de plantas com práticas sustentáveis. O objetivo desta pesquisa é destacar como essa tecnologia na produção de fertilizantes fluidos pode aumentar significativamente a produtividade das culturas enquanto reduz impactos ambientais, atendendo às demandas do crescimento populacional. A metodologia se define como uma revisão documental verificando o panorama dos fertilizantes no Brasil e um estudo de caso, avaliando como os fertilizantes fluidos podem melhorar culturas agrícolas. Os resultados mostram que o Brasil importa grande parte dos fertilizantes, um cenário preocupante de dependência externa. Quanto à aplicação do fertilizante fluido, esta é mais precisa e com menor desperdício, pois os fertilizantes fluidos representam uma solução inovadora para equilibrar a eficiência agrícola e a sustentabilidade ambiental. É possível concluir que, além de ser mais preciso e evitar desperdícios, o fertilizante fluido reduz a necessidade de maquinário pesado no campo, economizando combustíveis fósseis e diminuindo a compactação do solo, sendo um produto mais sustentável comparado com outros usados em demasia no setor agrícola.

**Palavras-chave:** Adubo líquido. Sustentabilidade. Agricultura.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por práticas agrícolas mais sustentáveis tem se intensificado nos últimos anos, diante da crescente pressão para atender à demanda mundial por alimentos, ao mesmo tempo em que se preserva o meio ambiente (Benzouche et al., 2024). Nesse contexto, a inovação no uso de insumos agrícolas desempenha um papel fundamental para garantir a segurança alimentar sem comprometer os recursos naturais. Os fertilizantes, essenciais para o aumento da produtividade agrícola, têm sido objeto de pesquisa e desenvolvimento, visando sua adaptação às exigências de um setor mais verde e eficiente (Eddarai et al., 2024).

Uma dessas inovações é o uso de fertilizantes fluídos, uma alternativa que tem ganhado destaque por suas vantagens em termos de aplicação, absorção e redução de impactos ambientais (Chojnacka & Moustakas, 2024). Estes fertilizantes, ao contrário dos tradicionais sólidos, oferecem maior eficiência na entrega de nutrientes às plantas e possibilitam uma gestão mais precisa e econômica dos recursos. Além disso, sua utilização pode contribuir para a redução do desperdício e da poluição do solo e da água. Os fertilizantes fluídos oferecem várias vantagens, como uma absorção mais rápida e eficiente pelas plantas, devido à sua forma dissolvida. Sua aplicação precisa permitir maior controle sobre a quantidade de nutrientes fornecidos, reduzindo desperdícios e o risco de contaminação do solo e da água (Divyangkumar & Panwar, 2024). Além disso, podem ser facilmente misturados com outros insumos, aplicados por sistemas de irrigação e são menos propensos à volatilização e lixiviação. Essas características tornam os fertilizantes fluidos uma opção mais sustentável e econômica, contribuindo para uma produção agrícola mais eficiente e com menor impacto ambiental (Zhan et al., 2024).

Os fluidos nitrogenados, fertilizantes fluidos à base de nitrogênio, podem ser uma solução sustentável para a agricultura ao promoverem uma maior eficiência no uso de nutrientes (Asadu et al., 2024). Sua forma líquida permite uma absorção mais rápida pelas plantas e reduz as perdas por volatilização, o que diminui o desperdício e o impacto ambiental. Além disso, a aplicação controlada e precisa desses fertilizantes, possibilitada por tecnologias de agricultura de precisão, minimiza o risco de fertilização, evitando a contaminação de águas e a emissão de gases de efeito estufa (Mylonas et al., 2020). Ao serem formulados para atender às necessidades específicas do solo e das culturas, os fluidos nitrogenados contribuem para uma agricultura mais sustentável, aumentando a produtividade com menor impacto no meio ambiente.

O objetivo desta pesquisa é destacar como essa tecnologia na produção de fertilizantes fluidos pode aumentar significativamente a produtividade das culturas enquanto reduz impactos ambientais, atendendo às demandas do crescimento populacional. A partir de uma análise das tecnologias envolvidas, das práticas de aplicação e dos benefícios ambientais e econômicos, busca-se entender como essa inovação pode transformar o cenário agrícola, criando um equilíbrio entre aumento de produtividade e preservação ambiental.

## 2 METODOLOGIA

A parte inicial da pesquisa se trata de uma pesquisa documental, um método que utiliza documentos como fonte principal de dados. Esses documentos podem incluir diários, cartas, transcrições de entrevistas, filmes documentais, entre outros. A análise desses documentos pode fornecer *insights* detalhados sobre questões a serem pesquisadas, visando contextualizar o panorama dos fertilizantes fluidos no Brasil (Kneale, Rojas-García & Thomas, 2018). A segunda parte da pesquisa é um estudo de caso. A pesquisa de estudo de caso é uma metodologia qualitativa que incorpora mais complexidade do que um relatório de caso típico e ajuda os leitores a entender o caso e se as descobertas podem ser aplicáveis além daquele cenário (Alpi & Evans, 2019).

A empresa do qual os fertilizantes serão analisados fica localizada no sul do Rio Grande do Sul na cidade de Pelotas. A Ourofertil é uma empresa de fertilizantes cujas principais atividades são importação, produção e comercialização de fertilizantes e matérias-primas, possuindo unidades industriais no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Ceará.

Este estudo demonstra que a adoção de uma abordagem fundamentada em práticas de gestão eficazes e técnicas industriais avançadas assegura um controle rigoroso e contínuo em todas as etapas do processo produtivo. Essa abordagem contribui significativamente para a redução de desperdícios, a minimização dos impactos ambientais e o aumento da produtividade.

Os fertilizantes analisados serão o OuroPro e o OuroPlus. O OuroPro é desenvolvido com três fontes de nitrogênio: amídico, amoniacal, nítrico, sendo um fertilizante nitrogenado fluido para uso via solo, de maior eficiência comparada às outras fontes de nitrogênio. Melhora o arranque inicial das plantas, permite melhor uniformidade de aplicação, além de garantir menor perda por volatilização. Já o OuroPlus é um fertilizante fluido para uso via foliar, que busca garantir aporte de nitrogênio, enxofre e boro, contribuindo para o fornecimento de auxiliares não entregues pelos rizóbios, promovendo aumento de peso de mil sementes e proporciona maior enchimento de grãos. Até o momento, a distribuição de OuroPlus é exclusivamente para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Para a coleta dos dados foi feito um acompanhamento fotográfico enviado pelos produtores, buscando verificar a eficácia dos fertilizantes fluidos nas culturas diante do controle (pedido pela empresa para eles colocarem a critério de comparação) e os benefícios ambientais nas culturas aplicadas. Também ocorre acompanhamento por parte da equipe técnica da empresa.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 PANORAMA DOS FERTILIZANTES NO BRASIL

Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária, o Brasil é responsável, atualmente, por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, ocupando a quarta posição, atrás apenas da China, Índia e dos Estados Unidos. Mesmo sendo um grande consumidor, 80% é advindo de importação, mostrando a dependência do país para a manutenção do setor.

A Figura 1 traz um panorama disponível pela revista eletrônica *Poder 360* sobre a situação do Brasil diante da dependência de fertilizantes importados.



Figura 1. Brasil e sua dependência de importação de fertilizantes.  
Fonte: Poder360

Sabendo da importância do uso de fertilizantes e a dependência do Brasil da importação, o Plano Nacional de Fertilizantes busca uma redução desta importação em 50% (Brasil, 2022). No plano, ainda são previstos outros objetivos importantes para o setor de fertilizantes:

1. Estimular e ampliar a pesquisa, exploração e transformação mineral no Brasil oferecendo fontes competitivas de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para a agricultura nacional, visando reduzir a dependência de importação de fertilizantes;
2. Possibilitar a competição de diferentes fontes e origens de matérias-primas, fertilizantes e nutrientes a serem ofertados à agropecuária nacional, visando à ampla concorrência e à possibilidade de desenvolvimento de instrumentos de estimativas de preços;
3. Contribuir com a construção de ambiente de negócios estável e longo no país, visando à atração de investimentos nacionais ou estrangeiros na exploração, transformação, desenvolvimento ou distribuição de fertilizantes no Brasil;
4. Contribuir na planificação para investimento público ou privado e otimização de infraestrutura e logística, além da atração de investimentos para a distribuição de fertilizantes no Brasil, de maneira convergente com o Plano Nacional de Logística;
5. Estimular e promover a capacitação de recursos humanos para atuar nas áreas de pesquisa, desenvolvimento, mineração, produção, transformação e outras relacionadas à nutrição de plantas, contribuindo para a competitividade do Brasil no setor.

Esses objetivos mostram uma preocupação além da parte econômica, pois ao fomentar a pesquisa e a tecnologia, é possível que produtos sejam desenvolvidos buscando atender a demanda deste mercado, buscando eficiência e sustentabilidade, além da valorização das empresas nacionais, que possuem total potencial para buscar suprir a demanda atual.

### 3.2 AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA NA AGRICULTURA E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DOS FERTILIZANTES FLUÍDOS

Os resultados obtidos através dos dados fornecidos pela empresa dos estudos de caso estão apresentados nas figuras a seguir.



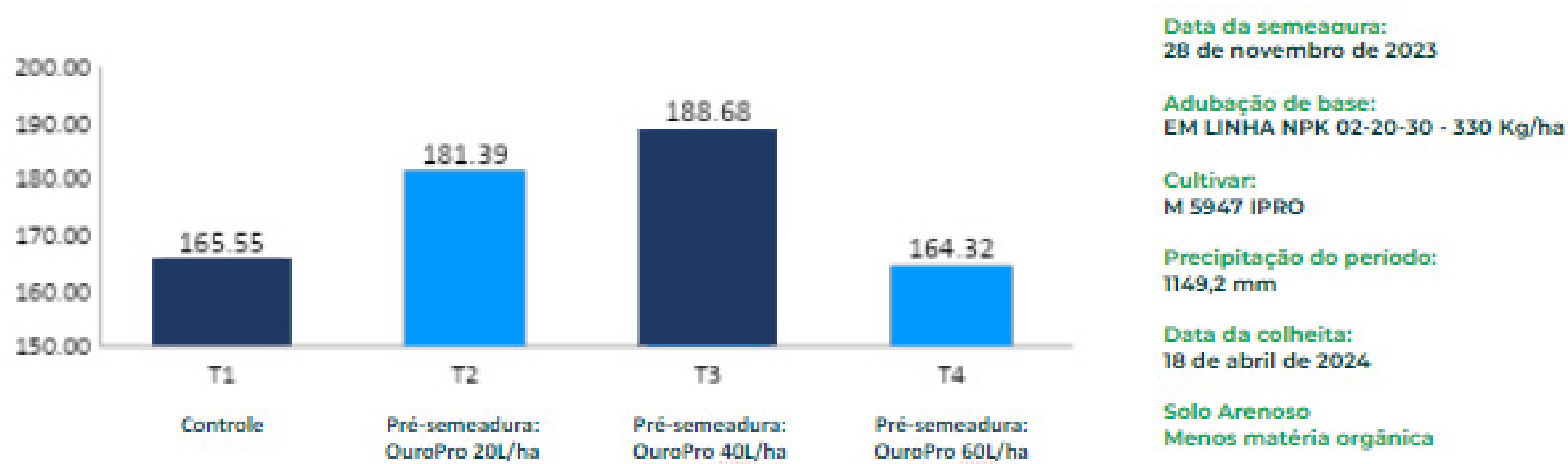


Figura 2. Incremento de peso por mil sementes com utilização de OuroPro

Através dos dados fornecidos pela empresa, pode-se verificar que houve um incremento significativo em relação ao controle nas sementes com a utilização do fertilizante OuroPro aplicado no solo. Pesquisas como a de Erenoğlu e Dündar (2020) trazem resultados que confirmam que a utilização de fertilizante fluido, além de ser melhor aproveitado quando comparado com os granulados, aumenta o rendimento e minimiza também as preocupações ambientais.

É importante salientar que a quantidade de precipitação do período (1.149,2 mm) influencia a eficácia do fertilizante escolhido. O fertilizante granular tem uma liberação mais lenta, o que diante da chuva pode sofrer arraste e ser menor aproveitado. O tipo de fertilizante e a taxa de aplicação impactam significativamente a perda de nitrogênio, enquanto a precipitação desempenha um papel fundamental na produção agrícola (Hou et al., 2021).

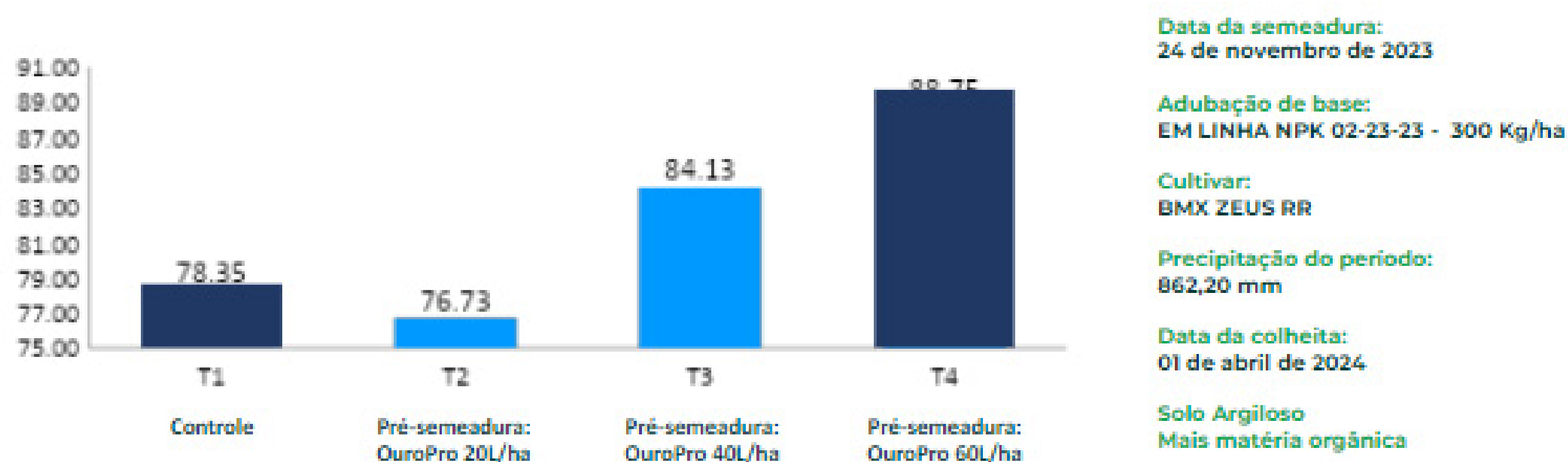


Figura 3. Incremento de peso por mil sementes com utilização de OuroPro na cultura da soja

Foi possível aumentar em 10 sacas a produção da soja em relação ao controle com a utilização do fertilizante fluido OuroPro. Na produção agrícola, 30% do gasto é com fertilizantes; ao aumentar sua produção, o agricultor diminui seus gastos, aumentando o lucro e podendo tornar seu preço mais atrativo, trazendo benefícios para a economia e para a sociedade. Isso mostra o quanto o OuroPro é um produto que vai de encontro ao

tripé da sustentabilidade, pois sua tecnologia colabora com a sustentabilidade, ajuda a melhorar a economia, o que conseqüentemente melhora o meio social.

A Figura 4 apresenta as melhorias obtidas na cultura da soja de forma visual. Além do aumento de sacas/ha, apresenta maior crescimento de ramos laterais que surgem das axilas das folhas ao longo do caule principal, o que contribui para a formação de mais flores, vagens e, conseqüentemente, maior produção de grãos.

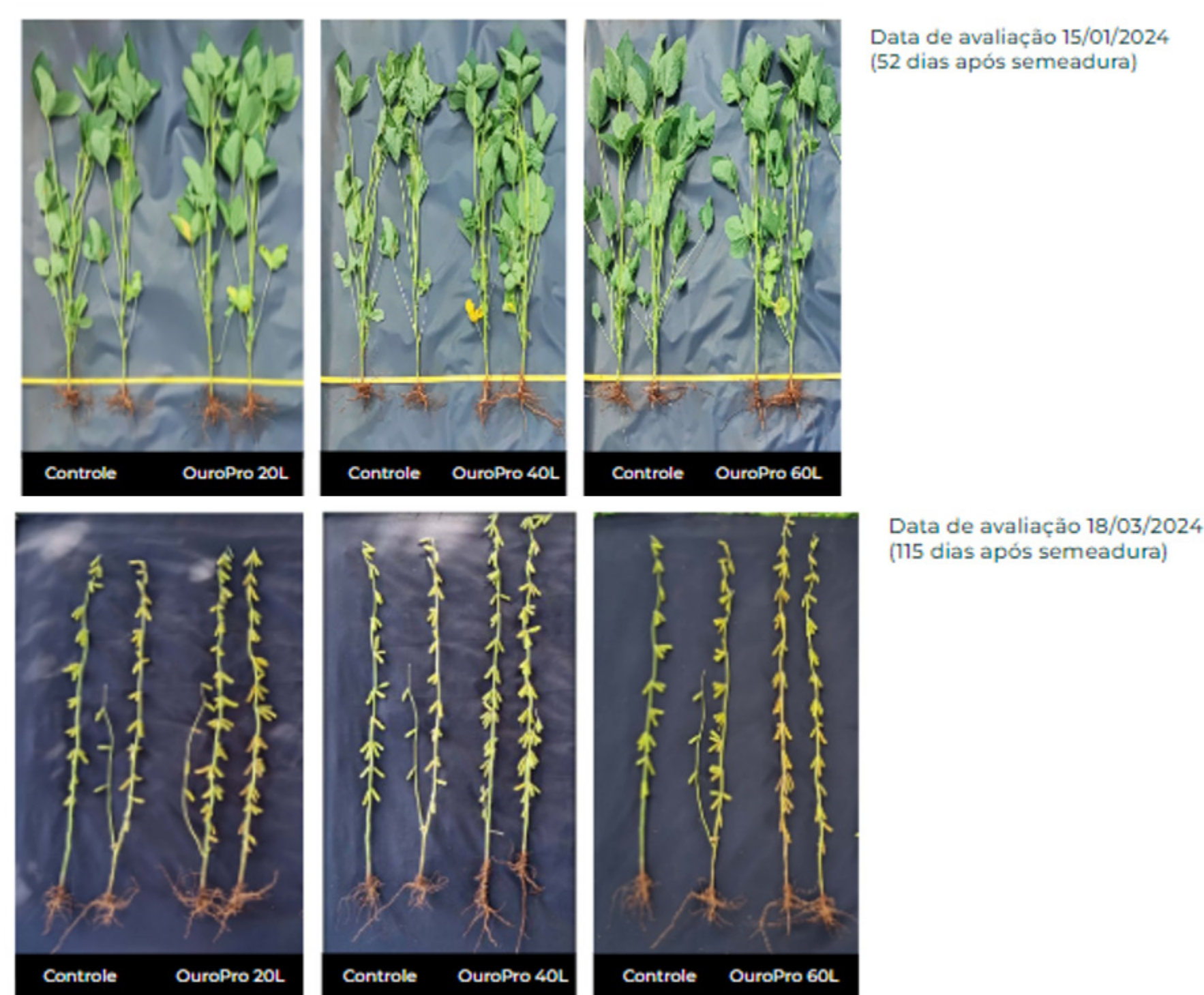


Figura 4. Cultura de soja com utilização de OuroPro, avaliação com 52 dias (superior) e 115 dias após a semeadura (inferior)

As imagens apresentam uma melhora significativa em diversos aspectos das plantas, como no incremento inicial no crescimento vegetativo, maior uniformidade no desenvolvimento da planta, o que resulta no aumento do número de vagens e grãos e na redução de estresses abióticos.

É possível observar uma melhoria nas raízes, mostrando que a planta absorve os nutrientes necessários do solo. As plantas com a aplicação de OuroPro também tiveram um crescimento significativo em relação ao controle. O resultado mostrou que o aumento nos parâmetros vegetativos, no rendimento e nos componentes do rendimento foram correlacionados ao efeito da aplicação do fertilizante fluido.

Mais um resultado positivo no incremento de sementes utilizando fertilizante fluido na cultura de soja, apresentando uma melhoria de 7% em relação ao controle. Pesquisas realizadas na Universidade Federal do Vale do São Francisco desenvolvida em parceria com a empresa Tecnifértil, em estágio inicial, já identificou que houve 70% na redução da

lixiviação de nutrientes com a utilização de fertilizante fluido (Seiva do Vale, 2024). Um uso mais adequado de fertilizante contribui para a qualidade ambiental, pois aumentar a sustentabilidade do uso de nutrientes na produção agrícola requer melhorar a eficiência do uso de nutrientes, reduzir as perdas de nutrientes e promover a transferência de tecnologia para atingir altos rendimentos e eficiência com baixos riscos ambientais (Jiao et al., 2016).

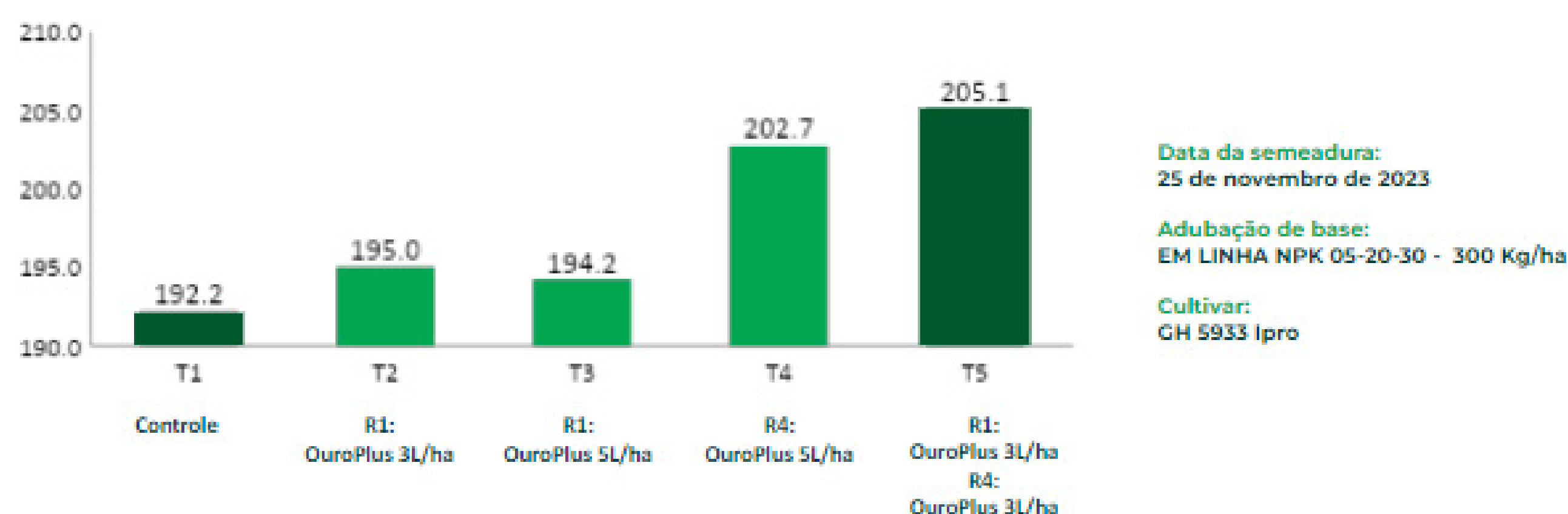


Figura 5. Incremento de peso por mil sementes com OuroPlus na cultura da soja.

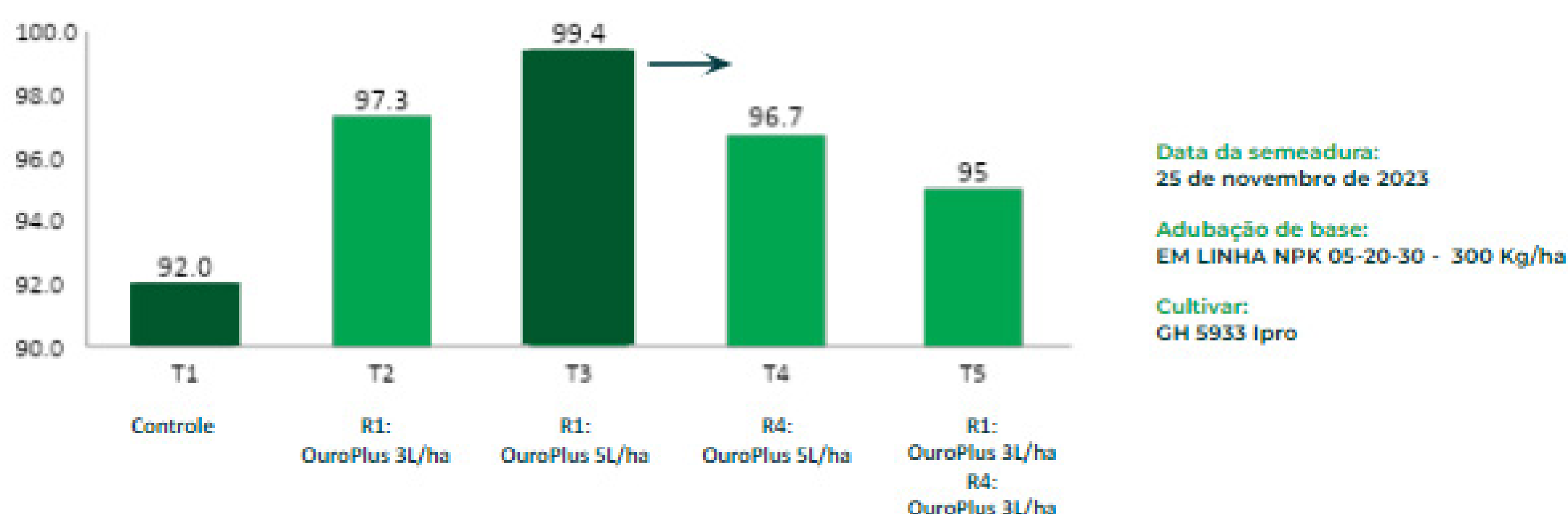


Figura 6. Incremento em sacas/ha de soja com o uso do fertilizante fluido foliar OuroPlus

Os resultados trazem um aumento de quase 8 sacas em relação ao controle, mais uma vez evidenciando a qualidade do produto e a sua importância para a melhoria econômica e ambiental do mercado agrícola.

Segundo Vidal et al. (2022), mais de 80% dos fertilizantes consumidos no Brasil são importados, sendo que a produção nacional responde por menos de 20% da demanda do país, isso mostra a necessidade de cada vez mais investimento e valorização do produto feito no nosso país, e ainda mais, produtos com alta eficiência e tecnologia aplicada.

A pesquisa mostrou que a empresa OuroFértil oferece produtos altamente eficazes e sustentáveis, que não apenas elevam a produtividade das culturas, mas também reduzem significativamente o risco de lixiviação, promovendo um manejo agrícola mais eficiente

e ambientalmente responsável. Os fertilizantes fluidos são produtos promissores e vão de encontro a diversos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015), tais como: ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável; ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura; ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis; e ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima.

No ODS 2, “Fome Zero e Agricultura Sustentável”, o uso de fertilizantes fluidos pode promover maior eficiência na nutrição das plantas, aumentando a produtividade agrícola e contribuindo para a segurança alimentar. Além disso, sua aplicação precisa reduz o desperdício de recursos e os impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água. Quando produzidos a partir de resíduos orgânicos, os fertilizantes fluidos também incentivam práticas de economia circular e agricultura regenerativa, beneficiando pequenos agricultores e fortalecendo uma agricultura sustentável, essencial para erradicar a fome e proteger o meio ambiente.

O ODS 9, “Indústria, Inovação e Infraestrutura”, vai de encontro ao uso de fertilizantes fluidos pela promoção de inovações tecnológicas no setor agrícola e industrial. A produção e aplicação de fertilizantes fluidos demandam desenvolvimento de tecnologias eficientes e infraestrutura avançada para armazenamento e transporte, que otimizam recursos e reduzem desperdícios. Essas práticas impulsionam o crescimento de indústrias verdes e fortalecem infraestruturas resilientes, promovendo o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

Relacionando os fertilizantes fluidos com o ODS 12, “Consumo e Produção Responsáveis”, podemos citar o incentivo a práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes. A aplicação precisa desses fertilizantes reduz o desperdício de nutrientes, minimiza impactos ambientais como a contaminação do solo e da água, e promove o uso racional de recursos naturais. Essas práticas sustentam padrões de produção e consumo mais responsáveis, contribuindo para reduzir a pegada ecológica da agricultura e apoiar sistemas alimentares sustentáveis.

O uso de fertilizantes fluidos, quando integrado a práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias de precisão, pode ajudar a alcançar os objetivos do ODS 13 “Ação Contra a Mudança Global do Clima”, especialmente no que diz respeito à mitigação das mudanças climáticas e à redução de emissões de gases de efeito estufa. No entanto, seu uso deve ser gerido de forma responsável para evitar impactos negativos, como emissões excessivas de óxido nitroso e poluição hídrica, que poderiam agravar as mudanças climáticas.

Lembrando que todos, sejam pessoas físicas ou jurídicas, são responsáveis pela colaboração em prol do alcance dos ODS.

## 4 CONCLUSÕES

O uso de fertilizantes fluidos no Brasil representa uma inovação promissora para o setor agrícola, equilibrando o aumento da produtividade com a preservação ambiental. A pesquisa mostrou que esses fertilizantes oferecem vantagens significativas, como maior eficiência na entrega de nutrientes, menor desperdício, redução na necessidade de maquinário pesado e menores emissões de gases de efeito estufa, tornando-os uma solução sustentável em comparação aos fertilizantes sólidos tradicionais.

Os estudos de caso realizados com os produtos OuroPro e OuroPlus demonstraram incrementos expressivos na produtividade agrícola, com benefícios econômicos diretos aos agricultores e impactos positivos no tripé da sustentabilidade: econômico, ambiental e social. Além disso, os fertilizantes fluidos alinham-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), contribuindo para práticas agrícolas mais responsáveis e mitigando os efeitos das mudanças climáticas.

No entanto, a dependência brasileira de fertilizantes importados ainda é um desafio estrutural que precisa ser enfrentado. A promoção da pesquisa, inovação tecnológica e valorização de produtos nacionais, como os fertilizantes fluidos, pode não apenas diminuir essa dependência, mas também fortalecer a competitividade do Brasil no mercado agrícola global.

Assim, os fertilizantes fluidos se mostram como ferramentas essenciais para atender à crescente demanda por alimentos, de forma sustentável e eficiente, contribuindo para um modelo de agricultura que respeite o meio ambiente e impulse o desenvolvimento econômico.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa Ourofértil pela disponibilidade em contribuir com os dados e todo suporte documental para esta pesquisa. A Universidade Federal de Pelotas por proporcionar um ambiente acadêmico propício para o desenvolvimento da pesquisa, ensino e extensão, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCamb).

# SUSTAINABLE INNOVATION: THE POSITIVE IMPACTS OF FLUID FERTILIZERS ON AGRICULTURAL PRODUCTION

**ABSTRACT:** Brazil is one of the largest consumers of fertilizers in the world due to its robust agricultural sector, particularly in crops such as soybeans, corn, and coffee. Fertilizers are categorized into three main types: nitrogen-based, phosphate-based, and potassium-based, all of which are essential for ensuring agricultural productivity, especially in tropical soils like those in Brazil, which are often nutrient-poor. Fluid fertilizers have emerged as essential allies in agriculture, combining high efficiency in plant nutrition with sustainable practices. The objective of this research is to highlight how this technology in fluid fertilizer production can significantly increase crop productivity while reducing environmental impacts, meeting the demands of a growing population. The methodology consists of a documentary review analyzing the fertilizer landscape in Brazil and a case study evaluating how liquid fertilizers can improve agricultural crops. The results indicate that Brazil imports a substantial portion of its fertilizers, reflecting a concerning scenario of external dependency. Regarding the application of fluid fertilizers, their use is more precise and involves less waste. Fluid fertilizers represent an innovative solution for balancing agricultural efficiency with environmental sustainability. It is possible to conclude that, in addition to being more precise and waste-reducing, fluid fertilizers lower the need for heavy machinery in the field, conserving fossil fuels and reducing soil compaction. Thus, they are a more sustainable alternative compared to other fertilizers that are excessively used in the agricultural sector.

**Keywords:** Liquid Fertilizer. Sustainability. Agriculture.

---

## REFERÊNCIAS

Alpi, K. M., Evans, J. J. (4 jan. 2019). Distinguishing case study as a research method from case reports as a publication type. *Journal Of The Medical Library Association*, 107(1), 1-9. University Library System, University of Pittsburgh. <http://dx.doi.org/10.5195/jmla.2019.615>.

Asadu, C. O., Ezema, C. A., Ekwueme, B. N., Onu, C. E., Onoh, I. M., Adejoh, T., Ezeorba, T. P. C., Ogbonna, C. C., Otuh, P. I., & Okoye, J. O. (out. 2024). Enhanced efficiency fertilizers: overview of production methods, materials used, nutrients release mechanisms, benefits and considerations. *Environmental Pollution And Management*, 1, 32–48. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epm.2024.07.002>.

Benziouche, S. E., Khechai, S. & Cheriet, F. (dez. 2024). Environmental agricultural practices in the Ziban palm groves: should we choose between yield and sustainability? *World Development Sustainability*, 5, 100187. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wds.2024.100187>.

Brasil (2022). Ministério da Agricultura e Pecuária. *Plano Nacional de Fertilizantes*. Recuperado de <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/o-plano-nacional-de-fertilizantes>.

Chojnacka, K. & Moustakas, K. (jan. 2024). Anaerobic digestate management for carbon neutrality and fertilizer use: a review of current practices and future opportunities. *Biomass And Bioenergy*, 180, 106991. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106991>.

Divyangkumar, N. & Panwar, N. L. (out. 2024). Standardization, certification, and development of biochar based fertilizer for sustainable agriculture: an overview. *Environmental Pollution And Management*, 1, 186–202. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epm.2024.10.001>.

Eddarai, E. M., Mouzahim, M. E., Ragaoui, B., Eladaoui, S., Bourd, Y., Bellaouchou, A. & Boussen, R. (out. 2024). Review of current trends in chitosan based controlled and slow-release fertilizer: from green chemistry to circular economy. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 278, 134982. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134982>.

Erenoğlu, E. B. & Dündar, Ş. (2020). Application of liquid phosphorus fertilizer improves the availability of phosphorus in calcareous soils. *Applied Ecology And Environmental Research*, 18(2), 3615–3626. ALOKI Ltd. [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1802\\_36153626](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1802_36153626).

Hou, P., Jiang, Y., Yan, L., Petropoulos, E., Wang, J., Xue, L., Yang, L. & Chen, D. (nov. 2021). Effect of fertilization on nitrogen losses through surface runoffs in Chinese farmlands: a meta-analysis. *Science Of The Total Environment*, 793, 148554. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148554>.

Jiao, X., Lyu, Y., Wu, X., Li, H., Cheng, L., Zhang, C., Yuan, L., Jiang, R., Jiang, B. & Rengel, Z. (3 ago. 2016). Grain production versus resource and environmental costs: towards increasing sustainability of nutrient use in china. *Journal Of Experimental Botany*, 67(17), 4935-4949. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erw282>.

Kneale, D., Rojas-García, A. & Thomas, J. (1 mar. 2018). Exploring the importance of evidence in local health and wellbeing strategies. *Journal Of Public Health*, 40(1), 13-23, Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/pubmed/fox152>.

Mylonas, I., Stavrakoudis, D., Katsantonis, D. & Korpetis, E. (2020). Better farming practices to combat climate change. *Climate Change And Food Security With Emphasis On Wheat*, 1-29. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-819527-7.00001-7>.

ONU – Organização das Nações Unidas. (2015). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

Seiva do vale. (2024). *Uso de adubos líquidos reduz 70% perda de nutrientes no solo*. Recuperado de <https://g1.globo.com/pe/petrolina-regiao/especial-publicitario/seiva-do-vale/seiva-do-vale/noticia/2024/09/12/uso-de-adubos-liquidos-reduz-70percent-perda-de-nutrientes-no-solo-diz-estudo.ghtml>.

Zhan, X., Zhang, Q., Li, M., Hou, X., Shang, Z., Liu, Z. & He, Y. (mar. 2024). The shape of reactive nitrogen losses from intensive farmland in China. *Science Of The Total Environment*, 915, 170014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170014>.



Publique com a gente e  
compartilhe o conhecimento



[www.letraria.net](http://www.letraria.net)

