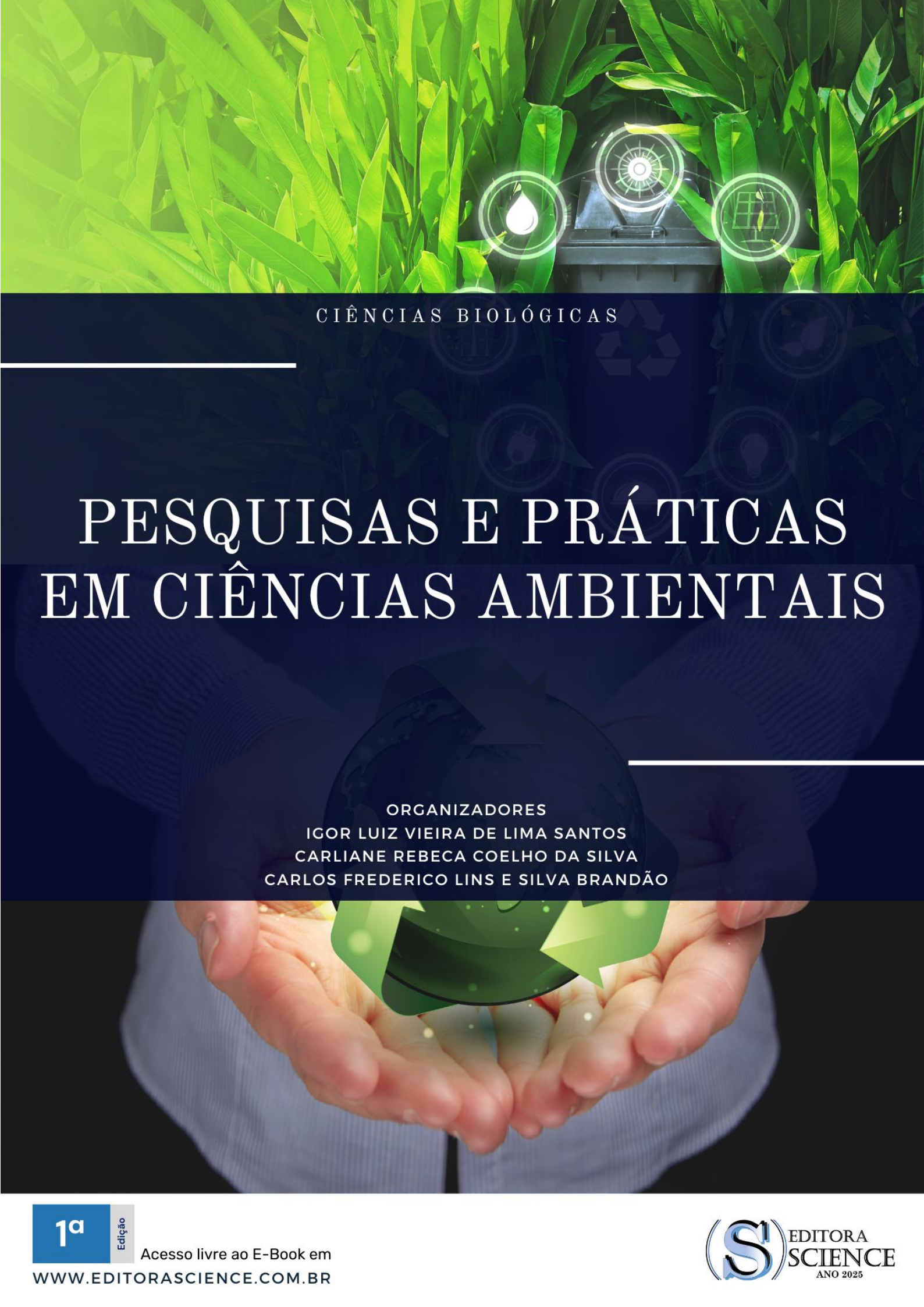




CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

PESQUISAS E PRÁTICAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

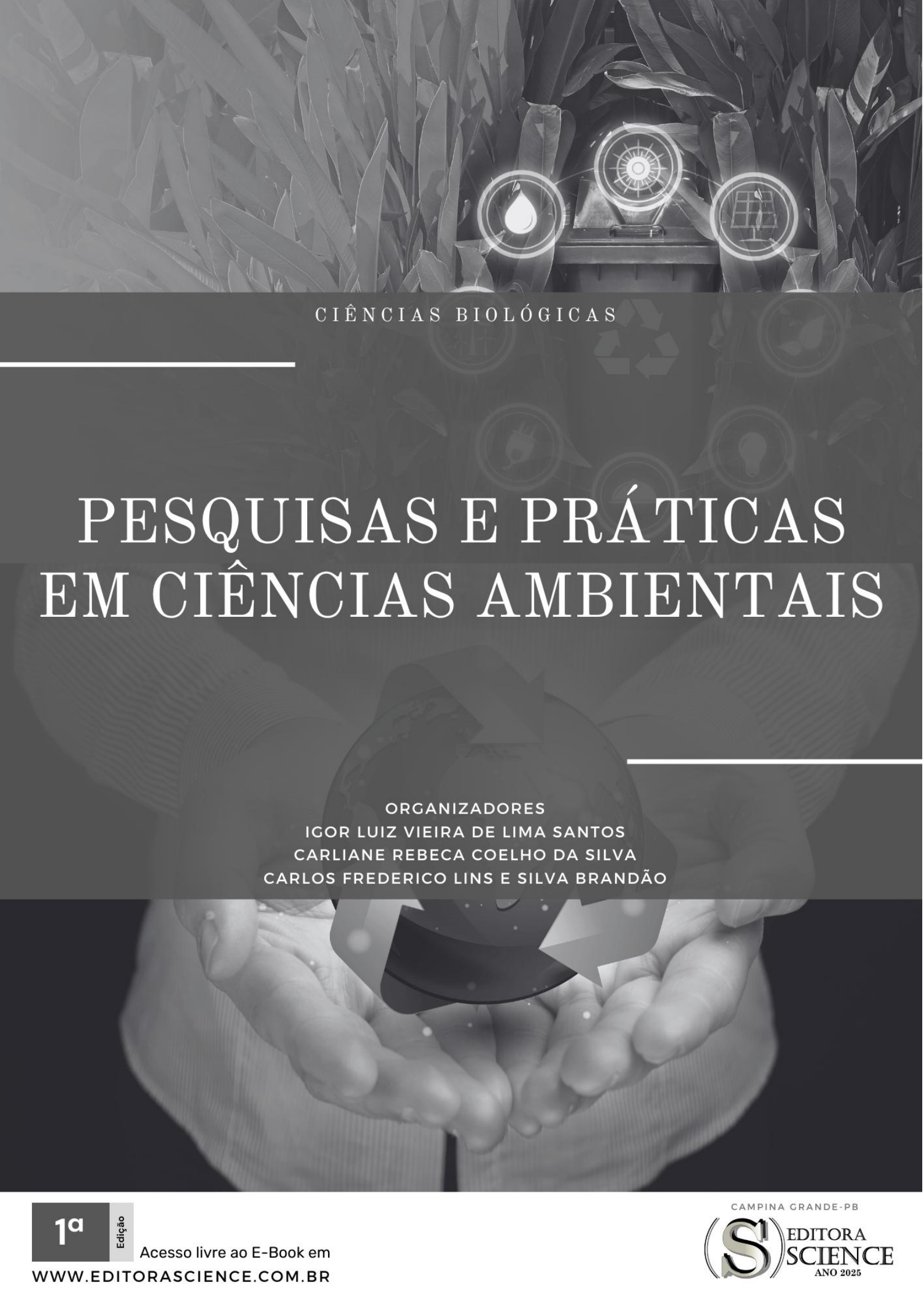
ORGANIZADORES
IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS
CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA
CARLOS FREDERICO LINS E SILVA BRANDÃO

1ª

Edição

Acesso livre ao E-Book em
WWW.EDITORASCIENCE.COM.BR

 EDITORA
SCIENCE
ANO 2025



CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

PESQUISAS E PRÁTICAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ORGANIZADORES
IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS
CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA
CARLOS FREDERICO LINS E SILVA BRANDÃO

1ª

Edição

Acesso livre ao E-Book em

WWW.EDITORASCIENCE.COM.BR

CAMPINA GRANDE-PB

 EDITORA
SCIENCE
ANO 2025

Todos os Direitos Desta Edição Reservados à
© 2025 EDITORA SCIENCE
Av. Marechal Floriano Peixoto. 5000.
Campina Grande, PB, 58434-500.
CNPJ: 42.754.503/0001-00

REGISTRO CBL (Câmara Brasileira do Livro)

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

Pesquisas e práticas em ciências ambientais [livro eletrônico] / organizadores Igor Luiz Vieira de Lima Santos, Carliane Rebeca Coelho da Silva, Carlos Frederico Lins e Silva Brandão. --
Campina Grande, PB : Ed. dos Autores, 2025.
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-01-83553-2

1. Ciências ambientais 2. Ecologia 3. Meio ambiente - Pesquisa I. Santos, Igor Luiz Vieira de Lima. II. Silva, Carliane Rebeca Coelho da. III. Brandão, Carlos Frederico Lins e Silva.

25-321319.0

CDD-363.7

Índices para catálogo sistemático:

1. Ciência ambiental 363.7

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



<https://doi.org/10.56001/25.9786501835532>

Para consulta na CBL acesse: <https://www.cbldados.org.br/isbn/pesquisa/>



Editora–Chefe

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva

Editores Organizadores

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva

Prof. Dr. Carlos Frederico Lins e Silva
Brandão

Editores e Diagramação

Corpo Técnico da Editora Science

Revisão Principal/Par Pares

Os Autores / Revisores *Ad Hoc* / Corpo
Editorial / Organizadores

Revisão Final

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva

Programas Registrados de Design

©Canva Pro Registered Design



Copyright © 2025 Editora Science

Copyright Textual © 2025 Os autores

*Copyright da Edição © 2025 Editora
Science*

*Todos os Direitos e os Termos de Cessão de
Direitos Autorais para esta edição foram
cedidos à Editora Science pelos próprios
autores.*

Declaração de Direitos

Todos os direitos reservados.

Qualquer parte deste livro pode ser reproduzida, transmitida de qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotocópia, microfilmagem, gravação ou de outra forma, desde que citada a fonte. Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Todos os artigos de autoria inédita, revisão, comentários, opiniões, resultados, conclusões ou recomendações são de inteira responsabilidade do(s) autor(es), e não refletem necessariamente as opiniões dos editores e/ou da empresa.

Para cópias impressas, para compras em massa e/ou informações sobre este e outros títulos da © Editora Science, entre em contato com a editora pelo telefone: Tel.: +55-83-991647953; E-mail: contato@editorascience.com ou editorascience@gmail.com

Siga nossas redes sociais fique por dentro das novidades e amplie o alcance dos nossos livros:

Facebook: <http://www.facebook.com/editorascience>

Instagram: <https://www.instagram.com/editorascience>

© 2025 EDITORA SCIENCE

Editora-Chefe:

PÓS-DRA. CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA (EDITORA-CHEFE)

Gerente Editorial:

PROF. DR. IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS (UFCG)

Conselho Editorial:

PÓS-DRA. CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA (EDITORA-CHEFE)

PROF. DR. IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS (UFCG)

DRA. LUCIANA AMARAL DE MASCENA COSTA (UFRPE)

PÓS-DRA. AYRLES FERNANDA BRANDÃO DA SILVA (UFCE)

Corpo Editorial:

DR. MARCUS VINICIUS PERALVA SANTOS (IFTO)

DR. RÔMULO ALVES DE OLIVEIRA (IFSE)

DRA. ROSEANNE SANTOS DE CARVALHO (IFSE)

PÓS-DRA. CARLIANE REBECA COELHO DA SILVA (EDITORA-CHEFE)

DRA. FERNANDA MIGUEL DE ANDRADE (FMS)

DR. MILTON GONÇALVES DA SILVA JUNIOR (UNIARAGUAIA)

DRA. WELMA EMIDIO DA SILVA (FIS)

DRA. AYRLES FERNANDA BRANDÃO (UFCE)

DR. GABRIEL PARISOTTO (UNISUAM)

DR. IGOR LUIZ VIEIRA DE LIMA SANTOS (UFCG)

ME. LÚCIA MAGNÓLIA ALBUQUERQUE SOARES DE CAMARGO (UNIFACISA)

DRA. LUCIANA AMARAL DE MASCENA COSTA (UFRPE)

ME. MARCELO SALVADOR CELESTINO (UNESP)

PÓS-DRA. ELIANA NAPOLEÃO COZENDEY DA SILVA (FIOCRUZ-ENSP)

DR. EDIGAR HENRIQUE VAZ DIAS (UFCAT)

DR. HENRIQUE MACIEL VIEIRA DE MORAES (UFRJ)

DR. CRISTIANO CUNHA COSTA (UFS)

MSC. DANIEL DA SILVA GOMES (UFPB)

DRA. FRANCIELI DE FATIMA MISSIO (UFSM)

DR. JOSÉ OLÍVIO LOPES VIEIRA JÚNIOR (UENF)

DRA. NARA HELENA TAVARES DA PONTE (UEAP)

DR. LUIZ ALEXANDRE VALADÃO DE SOUZA (SME-RJ)

PÓS-DRA. MICHELE APARECIDA CERQUEIRA RODRIGUES (UFLO)

PÓS-DR. MARCOS PEREIRA DOS SANTOS (FACUR)

LICENSE PUBLICATION DETAILS

Copyright © 2025 Editora Science

Copyright Notice

All content in this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) license which permits copying, distribution, and adaptation of the work, provided the original work is properly cited and any changes from the original work are properly indicated. Any altered, transformed, or adapted form of the work may only be distributed under the same or similar license to this one.

© 2025 by Carliane Rebeca Coelho da Silva is licensed under Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International 



**Attribution-NonCommercial-
NoDerivatives 4.0 International
(CC BY-NC-ND 4.0)**

HOW CITE THIS BOOK:

NLM Citation

Santos ILVL, Silva CRC, Brandão CFLS, editor. *Pesquisas e Práticas em Ciências Ambientais*. 1st ed. Campina Grande (PB): Editora Science; 2025.

APA Citation

Santos, I. L. V. L., Silva, C. R. C. & Brandão, C. F. L. S. (Eds.). (2025). *Pesquisas e Práticas em Ciências Ambientais*. (1st ed.). Editora Science.

ABNT Brazilian Citation NBR 6023:2018

SANTOS, I. L. V. L.; SILVA, C. R. C.; BRANDÃO, C. F. L. S. **Pesquisas e Práticas em Ciências Ambientais**. 1. ed. Campina Grande: Editora Science, 2025.

WHERE ACCESS THIS BOOK:

www.editorascience.com.br/

Sumário

CAPÍTULO 1	1
A SCIENTOMETRIC ANALYSIS OF BIOMONITORING WITH PLANTS	1
UMA ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DO BIOMONITORAMENTO COM PLANTAS	1
DOI: https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.01	1
Nair Stem	1
Rafael Nunes Briet	1
Edson Gonçalves Moreira	1
CAPÍTULO 2	17
O ESTUÁRIO DO RIO CLARO E OS DESAFIOS DIANTE DAS NOVAS POLÍTICAS BRASILEIRAS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL	17
THE CLARO RIVER ESTUARY AND THE CHALLENGES FACING THE NEW BRAZILIAN ENVIRONMENTAL LICENSING POLICIES	17
DOI: https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.02	17
Bruna Luzia Barbosa da Costa	17
Kepler Ribeiro Sousa	17
Thamiris Luana Costa da Rocha	17
Luís Henrique de Oliveira Reis Silva	17
Andréa Patrícia Castro Leite	18
Flávia Rebelo Mochel	18
CAPÍTULO 3	37
ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA COBERTURA VEGETAL EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DA MINERAÇÃO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO	37
SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION COVER IN AREAS OF MINING INFLUENCE IN THE SEMIARID REGION OF ALAGOAS	37
DOI: https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.03	37
Keilane Alves de Souza	37
Maria José de Holanda Leite	37
Alisson Henrique Silva dos Santos	37
Ariane Leticia Arruda dos Santos	37
Jhonathan Gomes dos Santos	37
CAPÍTULO 4	54
MARCOS LEGAIS E A DINÂMICA DA COLETA SELETIVA NA GESTÃO DE RESÍDUOS NO BRASIL	54

LEGAL FRAMEWORKS AND THE DYNAMICS OF SELECTIVE WASTE COLLECTION IN BRAZILIAN WASTE MANAGEMENT	54
DOI: https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.04	54
Graziela Pinto de Freitas	54
Maria José de Holanda Leite	54
Ana Cecília Novaes de Sá	54
Gracielle Ferreira de Souza	54
Ana Soraya Santos	55
Denise Maria Santos	55
Natanael Batista Pereira Alves	55

CAPÍTULO 5 **76**

EDUCAÇÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE NA TERRA INDÍGENA DO POVO ANACÉ CAUCAIA/CE	76
ENVIRONMENTAL EDUCATION AND SUSTAINABILITY IN THE ANACÉ INDIGENOUS LAND, CAUCAIA/CE	76
DOI: https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.05	76
Denise Maria Santos	76
Larissa Warnavin	76
Maria José de Holanda Leite	76
Ana Soraya Santos	76
José Marinho do Nascimento Neto	77

CAPÍTULO 6 **84**

TÉCNICAS NUCLEARES APLICADAS À ANÁLISE AMBIENTAL: IMAGEAMENTO COM NÊUTRONS, RADIOTRAÇADORES, MONITORAÇÃO E COMUNICAÇÃO CIENTÍFICA	84
NUCLEAR TECHNIQUES APPLIED TO ENVIRONMENTAL ANALYSIS: NEUTRON IMAGING, RADIOTRACERS, MONITORING, AND SCIENCE COMMUNICATION	84
DOI: https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.06	84
Erica Silvani Souza	84
André Nunes Barbosa	84
Francisco José de Oliveira Ferreira	84

CAPÍTULO 7 **103**

PUBLIQUE COM A SCIENCE EM FLUXO CONTÍNUO	103
<i>PUBLISH WITH SCIENCE IN CONTINUOUS FLOW</i>	103
DOI:	103
AUTORES	103
AUTORES	103
AUTORES	103

<u>CAPÍTULO 8</u>	<u>105</u>
PUBLIQUE COM A SCIENCE EM FLUXO CONTÍNUO	105
<i>PUBLISH WITH SCIENCE IN CONTINUOUS FLOW</i>	105
DOI:	105
AUTORES	105
AUTORES	105
AUTORES	105
<u>SOBRE OS ORGANIZADORES DO LIVRO DADOS CNPQ:</u>	<u>107</u>

PREFÁCIO À 1ª EDIÇÃO

As Ciências Ambientais ocupam hoje um papel central nos debates sobre desenvolvimento sustentável, saúde pública, preservação da biodiversidade e bem-estar das futuras gerações. Em um cenário marcado por rápidas transformações climáticas, pressões antrópicas e desafios socioambientais complexos, a produção de conhecimento científico torna-se indispensável para orientar políticas, ampliar a consciência coletiva e promover ações efetivas de cuidado com o planeta.

O livro Pesquisas e Práticas em Ciências Ambientais reúne contribuições que dialogam diretamente com essas demandas contemporâneas. Ele nasce do compromisso de integrar teoria e prática, oferecendo ao leitor uma visão ampla, interdisciplinar e atualizada sobre temas fundamentais da área, tais como conservação ambiental, recursos hídricos, educação ambiental, gestão territorial, microbiologia ambiental, impactos antrópicos e tecnologias sustentáveis.

Composto por capítulos elaborados por pesquisadores, docentes e profissionais atuantes, este volume apresenta resultados de estudos, reflexões metodológicas e experiências aplicadas que evidenciam a importância de compreender o ambiente como um sistema dinâmico e interdependente. A obra também destaca caminhos possíveis para enfrentamento dos desafios ambientais, incentivando práticas responsáveis, inovação científica e engajamento social.

Mais do que um livro, esta coletânea representa um convite para que estudantes, pesquisadores e gestores ampliem seu olhar crítico e se comprometam com uma atuação ambientalmente ética e transformadora. Que suas páginas inspirem novos trabalhos, fortaleçam a pesquisa aplicada e contribuam para a formação de profissionais capazes de atuar com sensibilidade, rigor científico e compromisso com a sustentabilidade.

Boa Leitura
Os Organizadores

CAPÍTULO 1

A SCIENTOMETRIC ANALYSIS OF BIOMONITORING WITH PLANTS

UMA ANÁLISE CIENCIOMÉTRICA DO BIOMONITORAMENTO COM PLANTAS

DOI: <https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.01>

Submetido em: 18/11/2025

Revisado em: 03/12/2025

Publicado em: 15/12/2025

Nair Stem

Nuclear and Energy Research Institute (IPEN/CNEN)

<http://lattes.cnpq.br/0775379983088297>

Rafael Nunes Briet

Faculty of Medicine of the University of São Paulo (FMUSP)

<https://lattes.cnpq.br/1080896028411941>

Edson Gonçalves Moreira

Nuclear and Energy Research Institute (IPEN/CNEN)

<http://lattes.cnpq.br/5179535565063558>

Resumo

Este trabalho é focado no biomonitoramento de poluentes atmosféricos de elementos traço utilizando Tillandsias, musgos e líquenes. Foi realizada uma análise cienciométrica utilizando duas bases de dados: Scopus e Web of Science, resultando na seleção de 249 registros. O biomonitoramento passivo foi dominante (~52%), enquanto o monitoramento ativo representou ~36%. Uma comparação do uso de musgo, Tillandsia e líquen foi realizada, mostrando casos de sucesso. As principais técnicas de caracterização incluíram ICP-MS/OES, INAA e AAS. Ambientes urbanos (35%) e industriais (38,4%) foram os mais estudados. Apesar de algumas limitações, o biomonitoramento é uma ferramenta poderosa, de baixo custo e uma Solução Baseada na Natureza, especialmente adequada para regiões de baixa renda.

A Rússia e a Romênia se destacam na adoção no período desta pesquisa (2020–2025), mas as Américas e a África apresentam falta de incentivos, destacando a necessidade de maior apoio global.

Palavras-Chave: Poluição Atmosférica, Metais, *Tillandsias*, Musgos, Líquenes

Abstract

This work is focused on the biomonitoring of trace element atmospheric pollutants using *Tillandsias*, mosses, and lichens. A scientometric analysis was conducted by using two databases: Scopus and Web of Science, resulting in the selection of 249 records. Passive biomonitoring was dominant (~52%), while active monitoring represented ~36%. A comparison of the usage of moss, *Tillandsia*, and lichen was performed, showing successful cases. Main characterization techniques included ICP-MS/OES, INAA, and AAS. Urban (35%) and industrial (38.4%) environments were the most studied. Despite some limitations, biomonitoring is a powerful, low-cost tool and a Nature-based Solution, especially suitable for low-income regions. Russia and Romania stand out in adoption in the period of this research (2020 – 2025), but the Americas and Africa show a lack of incentives, highlighting the need for greater global support.

Keywords: Air pollution, Metals, *Tillandsias*, Mosses, Lichens

Introdução

Air pollution arises from two primary sources: natural and anthropogenic. Monitoring and controlling it has become a global priority under the United Nations 2030 Agenda for Sustainable Development (United Nations, 2015), due to its global impacts on human health and the environment. Among the diseases associated with high levels of environmental pollution, the World Health Organization (WHO, 2025) identifies the following: lower respiratory tract infections (such as pneumonia and acute bronchitis), cancers of the trachea, bronchus, or lungs, ischemic heart disease, stroke, and chronic obstructive pulmonary disease (COPD). According to the WHO Global Air Quality 2025 guidelines (WHO, 2025), the recommended annual concentration limit for particulate matter with an aerodynamic diameter of $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) is about $5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. However, $\text{PM}_{2.5}$ is considered the largest environmental risk factor for human health. According to the WHO (2020), the 10 chemicals of major public health concern are: As, asbestos, benzene, Cd, dioxins, Pb, Hg, and hazardous pesticides, as well as excess F. Meanwhile, Chen, Maciejczyk, and Thurston (2022) stated that transition metals (Ni, V, Fe, Cu) can participate in redox reactions, producing oxidative stress and therefore being harmful to health. The authors also cited in their review that Si, Fe, and K are principally associated with soil; B and Pb with motor vehicles; V and Ni with residual oil, Mn and Zn with

metal/steel industries, and Se and S with coal combustion. Besides, microplastics and organic compounds are also factors to be concerned about (Roblin and Aherne, 2020).

There are a few options to perform elemental analysis in a commercial version. In this context, bioindicators and biomonitors have been increasingly recognized as cost-effective solutions for elemental analysis and as Nature-based Solutions (NbS) (Theophilo et al., 2021; Dunlop et al., 2024). In the field of air pollution biomonitoring, mosses, lichens, *Tillandsia* (from the Bromeliaceae family), tree barks, and other materials—generally epiphytic—have been widely used. Epiphytic species attach themselves to other plants and typically absorb nutrients directly from the air, rainfall, and wind. They possess specialized leaves adapted to store water and nutrients without relying on soil, where several factors influence this capacity. These include surface-to-volume ratio, morphology, the nature of specific pollutants, pollutant retention ability, leaf age, and more. The main advantages of biomonitoring are: a) a low-cost technique, making it possible to monitor hazardous places where expensive equipment cannot be installed; b) the opportunity to evaluate the environment on living organisms and to estimate the potential impact on other organisms, and c) to allow long term monitoring and to determine spatial and temporal trends in the occurrence (Badamsi, 2017).

Biomonitoring can be either passive or active. In passive biomonitoring, samples are collected directly from the target area and subsequently analyzed, depending on the availability of native species, the season, and the ease of taxonomic identification (Calas et al., 2025). After collection, researchers must decide whether to wash the samples with deionized water or analyze them unwashed (Boonpeng et al., 2021). The main advantage of this approach is that it requires no laboratory preparation before exposure, although spatial representation is limited due to the low density of stations. On the other hand, in active biomonitoring, the most common approach is to prepare bags of the desired species for transplantation to the monitoring site (Ares et al., 2012), and it does not depend on the existence of chosen species in the future studied area, since the samples are transplanted to the area, as discussed afterward.

One disadvantage of biomonitoring is that this is not a real-time measurement, since the organisms must be exposed for about 4 weeks at least (in an active biomonitoring case), then the samples are collected and analyzed by a chosen characterization technique.

The most varied chemical analytical techniques have been used, such as X-ray Fluorescence (XRF), Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS),

Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP OES), Atomic Absorption Spectrometry (AAS), and Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) (Ishimaru, Santos, and Saiki, 2021; Swislawski et al., 2022). Focusing on image characterization, Scanning Electron Microscopy with Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM – EDS) or Transmission Electron Microscopy (TEM) has been used (Schreck et al., 2025). Meanwhile, the structural analysis has been performed by X-ray Diffraction (XRD) or Transmission Electron Microscopy (TEM) (Zheng, 2024). In general, authors employ multiple techniques to complement information, as seen in Zeb et al. (2018), who characterized particle matter in urban regions using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive X-ray (EDX) Spectroscopy.

This study aims to provide an overview of air pollution biomonitoring using three organism types—*Tillandsia*, lichen, and moss—and their elemental analysis over the period from 2020 to 2025, by updating the most recently used keywords, number of publications, authors, university and country interaction networks, evaluated environments, analyzed pollutants, and characterization techniques.

Materials and methods / experimental details / methodology

Eligibility Criteria

The eligibility criteria included articles published in journals, conference proceedings, books, and book chapters, which involved air pollution biomonitoring, excluding soil and water pollution. Studies employing *Tillandsia*, moss, or lichen as biomonitors were included if they focused on the following subject areas: Chemical Engineering, Environmental Science, Chemistry, Multidisciplinary, Forestry, Nuclear Science and Technology, and Atmospheric Sciences.

Information Sources and Search

To conduct the scientometric survey, two databases were used: Web of Science and Scopus. Publications from 2020 to June 2025 were considered, and the search keywords were adapted to the specific requirements of each database. The searches were carried out between April 2025 and June 2025, and the search strategy combined terms related to air pollution, biomonitoring, and specific organisms (*Tillandsia*, moss, and

lichen), as well as target pollutants (metals, particulate matter, and related elements). The full search string used in each database is presented in Table 1.

Study Selection and Data Collection Process

The searches were performed in the databases via the CAPES (Brazilian Federal Agency for Support and Evaluation of Graduate Education) portal. The selected documents were exported to an Excel spreadsheet (Scopus) and a plain text file (Web of Science). PRISMA 2020 search model, outlining the study stages, was followed (Page et al., 2022). Initially, a total number of 1026 papers were found, where 831 were retrieved from Scopus and 195 were retrieved from Web of Science. In sequence, 56 papers were removed from Scopus and 18 from Web of Science, when only the categories Chemical Engineering, Environmental Science, Chemistry, Multidisciplinary, Forestry, Nuclear Science and Technology, and Atmospheric Sciences were selected. Then, with 776 papers from Scopus and 177 from Web of Science, their abstracts were analyzed, and papers related to medicine, soil, and water were excluded, focusing only on *Tillandsia*, moss, and lichen (Scopus (n =521) and Web of Science (n=47)), resulting in a total of 385 papers with the two bases together.

Table 1 – Search Keywords used to perform research in the two databases, Web of Science and Scopus.

Data-base	Search Keywords
Web of Science	atmosphere OR air AND pollution (All Fields) and biomonitor OR biomonitoring or monitoring and air (All Fields) and tillandsia or bromeliads or bromeliad or lichen or moss and air (All Fields) and metals or metal or heavy metal or particulate or heavy metals or climate (All Fields) and 2026 or 2025 or 2024 or 2023 or 2022 or 2021 or 2020 (Publication Years).
Scopus	(TITLE-ABS-KEY(atmosphere OR air AND pollution) AND TITLE-ABS-KEY(biomonitor OR biomonitoring) OR TITLE-ABS-KEY(tillandsia) OR TITLE-ABS-KEY(bromeliads)) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English"))

Source: The authors (2025).

Using R Studio and the *Bibliometrix* package (Aria and Cuccurullo, 2017) and (Stem and Briet, 2025), the files were merged, then 89 duplicate records were removed, and a set of 295 documents was obtained. Then, a manual review was performed

carefully, excluding the papers that were not accessible (with no identified DOI); moreover, papers that were not directly related to the evaluation of toxic elements in air were also removed, resulting in a total of 249 papers. This study was prospectively registered in the Open Science Framework (OSF) before data extraction and analysis, publicly available at <https://osf.io/pyq4v/overview>.

Statistical and bibliometric Analysis Performed with the Bibliometrix Package in R Studio

The *Bibliometrix* package (Aria and Cuccurullo, 2017) provides tools for bibliometric analysis through functions such as summary and plot. To obtain collaboration networks and data correlations, analyses were performed in R Studio using packages such as *biblietwork*, by programming in R or Excel, or Vosviewer.

Results and Discussion

Results of this bibliometric investigation were: a) Keywords and Groups of Biomonitorers and Country Interactions; b) Number of publications and University Network, and c) Pollutants, Types of Environments, Characterization Techniques, and Types of Biomonitoring

Keywords, Groups of Biomonitorers, and Country Publication

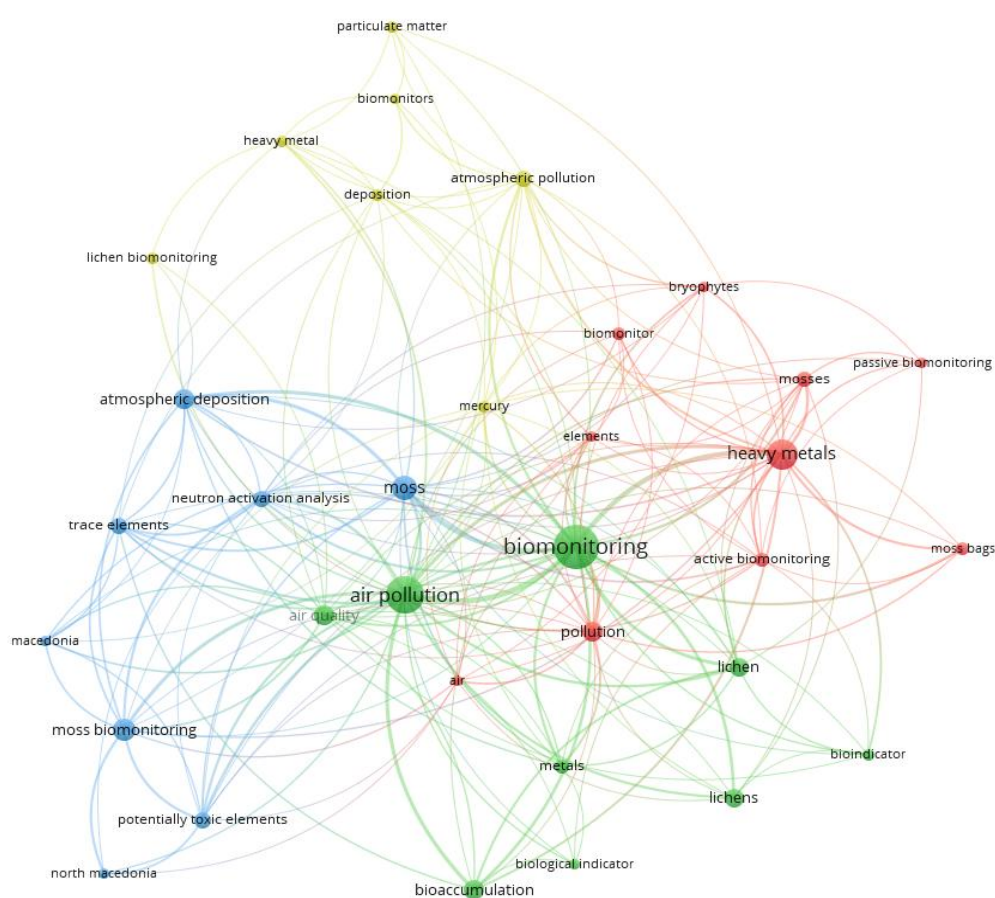
According to the summary provided by *Bibliometrix*, when selecting the top 30 keywords, the most frequent terms are biomonitoring (in 89 publications), air pollution (in 68 publications), and heavy metals (in 40 publications). Arranging them in decreasing order of frequency: *biomonitoring* (89), *air pollution* (68), *heavy metals* (40), *moss* (30), *moss biomonitoring* (23), *bioaccumulation* (19), *atmospheric deposition* (18), *air quality* (17), *pollution* (17), *lichens* (15), *lichen* (16), *neutron activation analysis* (14), *atmospheric pollution* (13), *potentially toxic elements* (12), *trace elements* (12), *active biomonitoring* (11) and *mosses* (11). This suggests that biomonitoring research has likely focused not only on heavy metals but also on pollutants in general, given that the number of publications using the keyword biomonitoring is significantly higher than those using *heavy metal(s)*. Below, in Figure 1, is presented a word cloud with the keywords, where the larger the circles, the higher the frequency of the words.

According to the analyzed results, it was found that there are 28 publications about only *Tillandsia*, 129 publications about only moss, 69 publications with only lichen, a

combination of moss and lichen about 16 publications, a combination of *Tillandsia* and lichen about 1 publication, and with the three organisms (moss + lichen + *Tillandsia*) about 1 paper, and about 5 papers are generic (no counting of these words in title, in keywords or abstracts), resulting in a total of 249 papers, as shown in Figure 2.

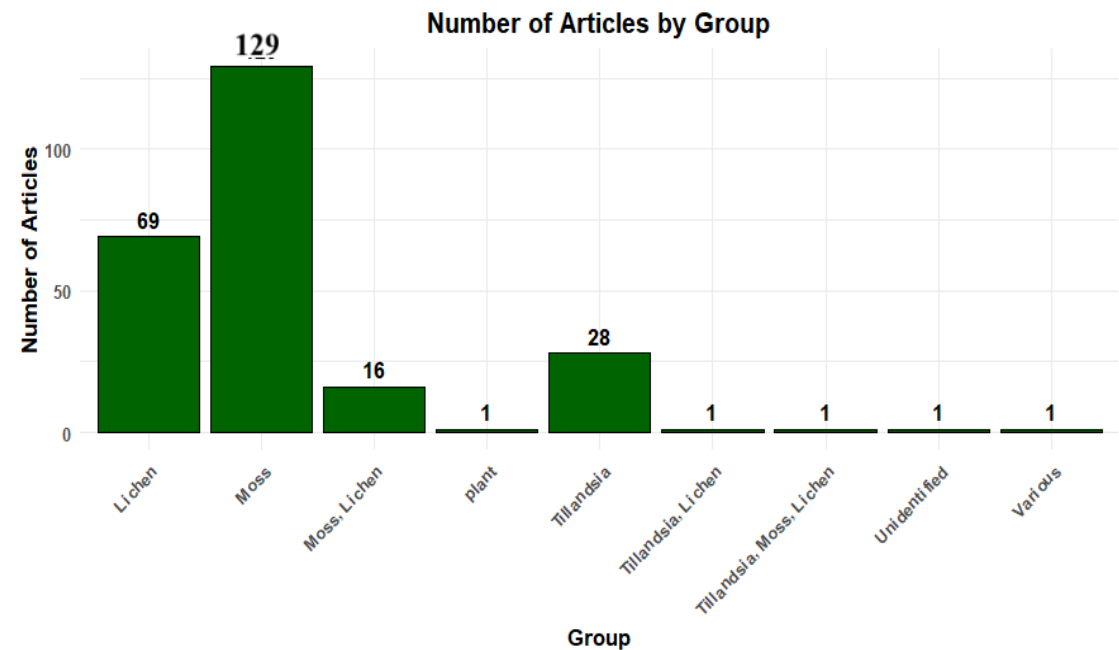
Moss was the principal group, since it is native to Asia and Europe. These countries usually adopt passive biomonitoring; however, biomonitors (*Tillandsia*, moss, and lichens) still remain underutilized as a tool for air quality monitoring, particularly in less affluent regions, despite their low cost and suitability for remote areas without the need for specialized technology. The highest costs in this type of monitoring are related to the characterization techniques used to quantify elemental pollutants, and it can be considered an example of a Solution based on Nature (Dunlop et al., 2024) that aims at achieving sustainable goals. Figure 3 presents the number of publications per country, showing that Asia and Europe present the highest number of publications, while in America and Africa, this technique is underutilized.

Figure 1: The word cloud.



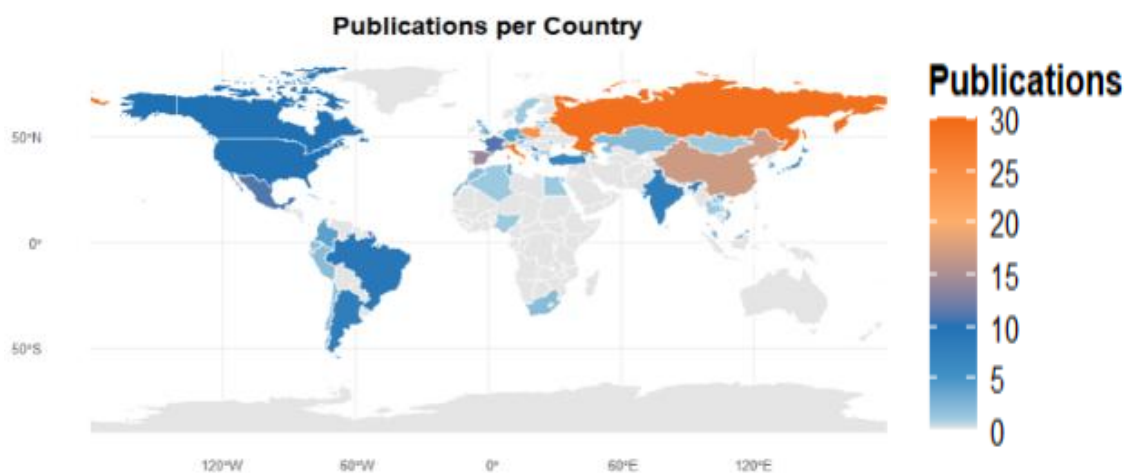
Source: The authors (2025).

Figure 2: Number of papers per group.



Source: The authors (2025).

Figure 3: Number of publications per country.



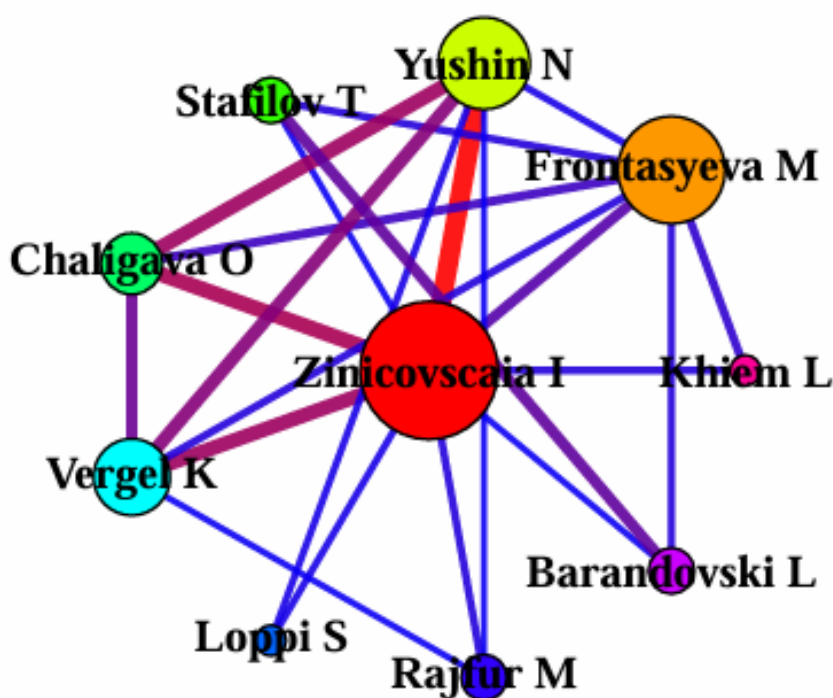
Source: The authors (2025).

Authors and University Network, Characterization techniques, and Pollutants

According to this research, the number of scientific publications per year was 35 in 2020, 54 in 2021 (presenting a significant increase), 42 in 2022, 39 in 2023, 55 in 2024, and 24 in 2025. The reduction in the number of publications in 2022 and 2023 can

probably be attributed to COVID-19, which necessitated social distancing and thus stagnated research that was dependent on social convivence. It can also be noted that the number of publications in 2025 refers only to the first 6 months of the year, since the investigation of this work was completed by June 2025. Concerning this scenario, Figure 4 presents the 10 most productive authors and the network; the thickness and the color of lines connecting the edges are proportional to the number of publications (dark blue with one or two papers, purple with three or five papers, and red with more than five papers). The 10 most productive authors are: Zinicoscaia I (31), Yushin N (21), Rajfur M (18), Stafilov T (18), Chaligova O, Fronstayeva M, and Vergel K (16 each), Swislawski P (14), Loppi S (13), and Sajn N (11). Concerning the number of their interactions, Zinicoscaia I and Yushi N have the highest number of published papers in collaboration (21), being followed by Zinicoscaia I and Chaligova O., with 14 collaborations, and Zinicoscaia I and Vergel K. with 13 collaborations.

Figure 4: Co-authorship network – top 10 authors.



Source: The authors (2025).

Using the affiliation name tag (*AU_UN*) created by the *Bibliometrix* package, the top 10 most collaborative universities were identified (Figure 5). In this network, the thickness of connection lines is proportional to the number of interactions. The most

collaborative institutions are the Joint Institute for Nuclear Research – Russia (JINR-R) and the Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering (HHNIPNE, Romania), with 20 joint publications. All other institutions have fewer than five collaborations. It can be seen that Russia and Romania have the highest number of interactions. Despite the government action plans all over the world having increased over the years, there is still much to be done (WHO, 2025), as most countries have not reached the desirable proposed conditions, yet there is a lack of projects in America similar to the United Nations Economic Commission for Europe International Cooperative Program on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops (UNECE ICP Vegetation site), and after, being followed by other countries such as Ukraine, Romania, Bulgaria, Poland, Belarus, and Russia, in the project of ICP vegetation “Mosses as Biomonitors of Air Pollution” since 2020/2022 (Fronstayeva et al., 2020).

Considering the toxicology of elements, one can associate metals as typical sources of pollutants, considering the following sources: a) mining, smelting of cinnabar ore, deposits of metal ores of Pb and Zn, manufacturing of sodium hydroxide and chlorine by electrolysis of brine, paper and pulp industries; b) industrial emissions; c) traffic; d) brakes, tire wear, motor oil, brake wear, gasoline additives; e) oil combustion; f) lubricating oil; g) fireworks; h) e-cigarettes; i) coal combustion; j) soil resuspension; k) pesticides, insecticides, and fertilizers and l) refineries, as shown in Table 2.

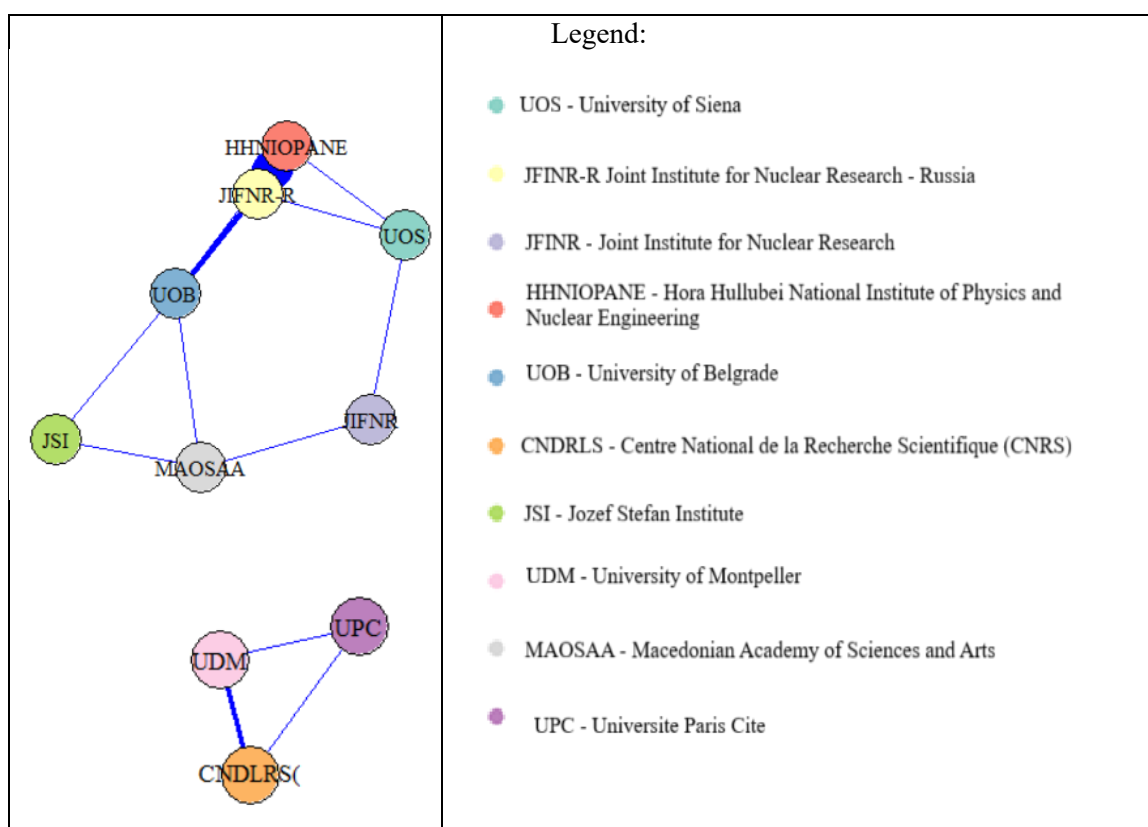
Meanwhile, the most frequently used techniques to evaluate elemental pollutants are ICP techniques, INAA, and AAS, as can be seen in Figure 6. Each method has a different detection limit, L_c ; most of the time, this limit is also dependent on the trace element, but also the sample matrix and mass. These techniques present some limitations for performance; ICP and AAS, for instance, present difficulties in the digestion of samples (sometimes it is not completely digested), which increases the error in the measurements. In INAA, peak overlapping must be avoided, and sample mass limitations can decrease accuracy. In XRF, peak overlapping should also be avoided, and matrix interference should be addressed. Djingova and Kuleff (2000), in their book chapter, present a list of suitable techniques as a function of chemical elements and different matrices, including plants, and Frontasyeva, Harmens, and Uzhinskiy (2020) present a summary of chemical elements, analytical techniques, and countries in the period 2015/2016 at their project report.

According to the analysis of the selected papers, the majority of the studies is related to passive biomonitoring (130), being followed by the active type (89), both types

(2), and unidentified (32), it can be highlighted the predominance of the passive method, probably due to the fact this method requires less work in laboratory, besides being cheaper and faster than the active one. The type of environments and the respective percentage are shown in Figure 6. In this figure, it can be seen that urban and industrial environments are the dominant ones, with 38.4% and 35%, since they are the ones that require more concerns about air pollution. The unidentified ones refer to review papers or book chapters and, therefore, are generic.

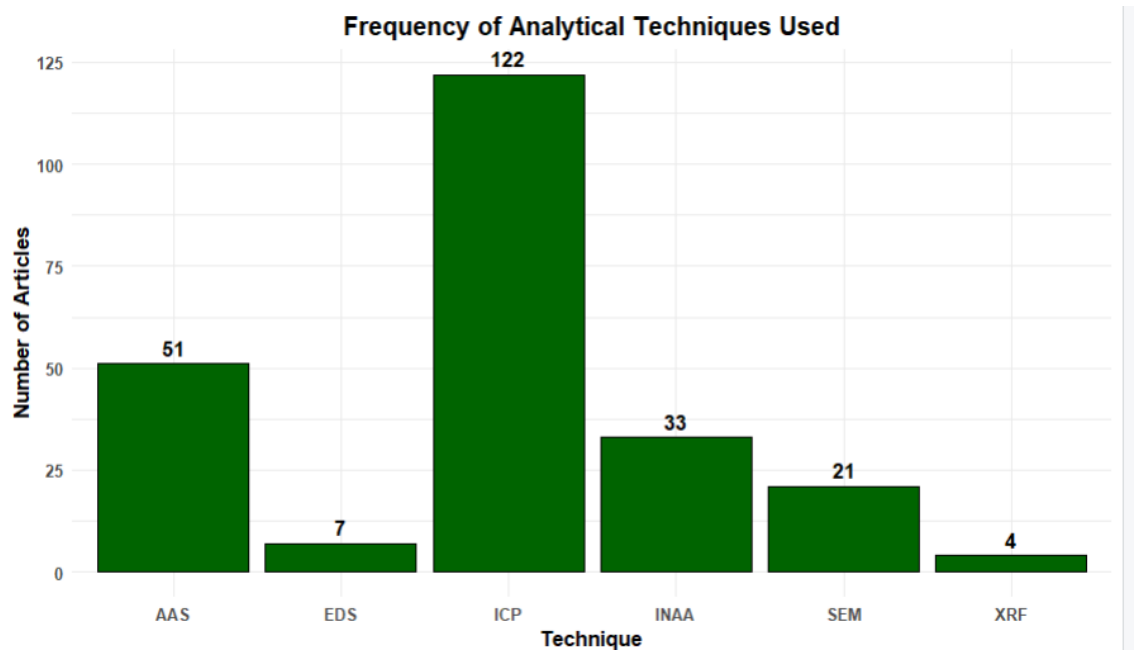
Considering the toxicity of the environment, it can be concluded that the four types of classification (industrial, urban, rural, and natural) have more than one factor listed in Table 2. For instance, the classification of urban environment includes traffic, oil combustion, lubricating oil, sometimes e-cigarettes, and others.

Figure 5: Top 10 most collaborative universities.



Source: The authors (2025).

Figure 6: Most frequent analytical techniques.



Source: The authors (2025).

Table 2: Toxicological trace elements and typical sources.

Icon	Category	Typical Sources	Trace Elements	Reference
	Mining & Smelting	Mining, smelting of cinnabar ore, deposits of Pb and Zn, manufacturing of sodium hydroxide and chlorine by electrolysis of brine, Paper & pulp industries	Hg	Chen, Maciejczyk, Thurston, 2022
	Industrial Emissions	Iron/steel production, cement production	As, Ca, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, S, Se, V, Zn	Chen, Maciejczyk, Thurston, 2022 Zheng et al., 2024
	Traffic & Vehicle Wear	Traffic, brakes, tire wear, motor oil, gasoline additives	Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn, Cd, Pb	Chen, Maciejczyk, Thurston, 2022
	Oil & Coal Combustion	Oil combustion, lubricating oil, coal combustion	V, Ni, Ca, Zn, Al, Fe, Mg, Na, Si, Ti	Chen, Maciejczyk, Thurston, 2022
	Fireworks	Fireworks displays	Cu, Pb, Sr, Ti	Chen, Maciejczyk, Thurston, 2022

	Tobacco Products	e-cigarettes Conventional cigarettes, e-cigarettes, and heated tobacco products	Cr, Mn, Ni, Pb, Cu, Zn, Cd Conventional – Cu, Zn, and Pb e-cigarettes – Ni, Cu, Zn, and Pb Heated tobacco – Cu, Zn, Cd, and Pb	Chen, Maciejczyk, Thurston, 2022 Świsłowski et al., 2022 Świsłowski et al., 2022 Świsłowski et al., 2022
	Pesticides & Fertilizers	Pesticides, insecticides, fertilizers	Cd, Ni, Pb	Morakinyo, Mukhola, Mokgobu, 2021
	Coal Mines	Coal mines	Ag, Ge, Ni, Se, U, V, Zr	Petryshen, 2023
	Landfill	Landfill	Ni, Pb, Zn	Stafilev et al., 2023

Source: The authors (2025).

Conclusion

This work discussed the use of biomonitoring, focusing on the toxicity of trace elements. The scientometric analysis was based on two databases, Scopus and Web of Science, from 2020 to 2025. Our analysis reveals that biomonitoring using *Tillandsia*, moss, or lichen remains underutilized, despite being a low-cost and Nature-based Solution, making it a viable option for low-income countries. Passive monitoring is the most used method (about 52% of publications), while active monitoring occupies about 36%, probably due to the practicality of monitoring large areas and the lower time spent in laboratories. Once chosen biomonitoring to keep under control the trace pollutants of an area, some factors have to be considered (the requirements of the active monitoring or the directions of collecting material in case of passive monitoring; the species that are going to be used, keeping in mind different species can adsorb elements differently; and the interference of meteorological conditions in particle capture by plants). In conclusion,

biomonitoring is a powerful Nature-based Solution for large areas and low-income regions.

References

ARES, A. et al. Moss bag biomonitoring: a methodological review. *Science of the Total Environment*, v. 432, p. 143–158, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.087>.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

BADAMASI, H. Biomonitoring of air pollution using plants. *Mayfeb Journal of Environmental Science*, v. 2, p. 27–39, 2017.

BOONPENG, C. et al. Influence of washing thalli on element concentrations of the epiphytic and epilithic lichen *Parmotrema tinctorum* in the tropics. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 9723, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11459-8>

CALAS, A. et al. *Tillandsia usneoides* for atmosphere composition biomonitoring: a cross-validation study. *ACT EST Air*, v. 2, p. 522–529, 2025. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00252>

CHEN, L.; MACIEJCZYK, P.; THURSTON, G. D. Chapter 6 - Metals and air pollution, in: NORDBERT, G. F.; COSTA, M. *Handbook on the Toxicology of Metals* (Fifth Edition), Academic Press, 2022, Pages 137-182, ISBN 9780128232927, Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00004-8>.

DE OLIVEIRA, R. S. et al. Leaf structure of *Tillandsia* species (Tillandsioideae: Bromeliaceae) by light microscopy and scanning electron microscopy. *Microscopy Research and Technique*, v. 85, n. 1, p. 253–269, 2022. DOI: 10.1002/jemt.23901. Available at: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jemt.23901>

DJINGOVA, R. and KULEFF, I. Chapter 5 Instrumental techniques for trace analysis. In: *Trace metals in the environment*. v. 4. Elsevier, 2000. p. 137–185. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0927-5215\(00\)80008-9](https://doi.org/10.1016/S0927-5215(00)80008-9)

DUNLOP, T., KHOJASTEH, D., COHEN-SHACHAM, E. et al. The evolution and future of research on Nature-based Solutions to address societal challenges. *Communications Earth & Environment*. v. 5, p. 132, 2024. Available at <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01308-8>

FRONTASYEVA, M.; HARMENS, H.; UZHINSKIY, A. Mosses as Biomonitorers of Air Pollution: 2015/2016 Survey on Heavy Metals, Nitrogen and POPs in Europe and Beyond; LRTAP: Châtelaine, Switzerland, 2020; ISBN 9785953005081. Available at: <https://mnhn.hal.science/mnhn-04251751/document>. Accessed on 2025 June 30th.

ICP VEGETATION – Moss manual - “Heavy Metals, Nitrogen and POPs in European Mosses: 2020 Survey”, 2020. Available online:
<https://icpvegetation.ceh.ac.uk/sites/default/files/Moss%20protocol%20manual.pdf>.
 Accessed on October 20th, 2025.

ISHIMARU, G.; SANTOS, E. C.; SAIKI, M. Evaluation of the spatial variability of the elements in tree barks used as biomonitors of atmospheric pollution. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 9, n. 1A, 2021. DOI: 10.15392/BJRS.V9I1A.1386. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/355339602_Evaluation_of_the_spatial_variability_of_the_elements_in_tree_barks_used_as_biomonitoring_of_atmospheric_pollution

MORAKINYO, O. M.; MUKHOLA, M. S.; MOKGOBU, M. I.; Health risk analysis of elemental components of an industrially emitted respirable particulate matter in an urban area, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 18, p. 3653, 2021. DOI: doi: 10.3390/ijerph18073653. Available at:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33915712/>

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71. Available at:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33782057/>

PETRYSHEN, W. Spatial distribution of selenium and other potentially toxic elements surrounding mountaintop coal mines in the Elk Valley, British Columbia, Canada, *Heliyon*, v. 9, n. 7, e17242, ISSN 2405-8440, 2023. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17242>

ROBLIN, B.; AHERNE, J. Moss as a biomonitor for the atmospheric deposition of anthropogenic microfibres. *Science of the Total Environment*, v. 715, p. 136973, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136973. Available at:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32018105/>

SCHRECK, E. et al. An interdisciplinary approach for air quality assessment: biomonitoring using *Tillandsia bergeri* and risk perceptions in the environmentally sacrificed province of Chacabuco, Chile. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 47, p. 99, 2025. DOI: 10.1007/s10653-024-02348-x. Available at:
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40035923/>

STAFILOV, T.; ŠAJN, R.; PUTESKA, A.; DIMOVSKA, B. Moss biomonitoring of air pollution with potentially toxic elements in the Pelagonia Region, North Macedonia. *Chemistry and Ecology*, v. 39, n. 3, p. 302, 2023. Available at:
<https://doi.org/10.1080/02757540.2023.2178650>

STEM, N.; BRIET, R. N. Tendências globais sobre o uso de tecnologias digitais no ensino superior de física básica: uma análise cinciométrica. *Revista Tecnologia Educacional*, n. 244, 2025. ISSN 0102-5503. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/390244438_TENDENCIAS_GLOBAIS SOBRE_O_USO_DE_TECNOLOGIAS_DIGITAIS_NO_ENSINO_SUPERIOR_DE_FISICA_BASICA_UMA_ANALISE_CIENCIOMETRICA

ŚWISŁOWSKI, P. et al. Mosses as a biomonitor to identify elements released into the air as a result of car workshop activities. *Ecological Indicators*, v. 138, p. 108849, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108849>

ŚWISŁOWSKI, P., ŚMIECHOWICZ, B. & RAJFUR, M. Effects of tobacco smoke on indoor air quality: the use of mosses in biomonitoring. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, v. 20, p. 485, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00794-2>.

THEOPHILO, C.Y.S., RIBEIRO, A.P., MOREIRA, E.G. et l. Biomonitoring as a Nature-Based Solution to assess atmospheric pollution and impacts on public health. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. v. 107, p. 29–36 (2021). Available at: <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03205-8>

UNECE ICP Vegetation - International Cooperative Program on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops. Available at: <https://unece.org/environmental-policy/air/vegetation>. Accessed in: 2025 October 10th.

UNITED NATIONS – Sustainable Development Goals / the 2030 Agenda for Sustainable Development. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-goals>. Accessed in: October 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO): 10 chemicals of public health concern. Geneva: WHO, 2020. Available at: [10 chemicals of public health concern](#). Accessed in August 2025

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (WHO) guidelines 2025 – WHO unveils updated global database of air quality standards, 2025. Available at: [\[WHO unveils updated global database of air quality standards\]](#). Accessed in: June 2025.

ZEB, B. et al. On the morphology and composition of particulate matter in an urban environment. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 18, n. 6, p. 1431–1447, 2018. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30344547/>

ZHENG, L.; WU, D.; CHEN, X.; LI, Y.; CHENG, A. Chemical profiles of particulate matter emitted from anthropogenic sources in selected regions of China. *Scientific Data*, v. 11, p. 1206, 2024. DOI: 10.1038/s41597-024-040558-6. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39516470/>

CAPÍTULO 2

O ESTUÁRIO DO RIO CLARO E OS DESAFIOS DIANTE DAS NOVAS POLÍTICAS BRASILEIRAS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL

THE CLARO RIVER ESTUARY AND THE CHALLENGES FACING THE NEW BRAZILIAN ENVIRONMENTAL LICENSING POLICIES

DOI: <https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.02>

Submetido em: 04/12/2025

Revisado em: 13/12/2025

Publicado em: 15/12/2025

Bruna Luzia Barbosa da Costa

Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, São Luís-MA

<https://orcid.org/0009-0009-8257-1416>

Kepler Ribeiro Sousa

Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, São Luís-MA

<https://orcid.org/0009-0004-5735-048X>

Thamiris Luana Costa da Rocha

Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, São Luís-MA

<https://orcid.org/0009-0006-9802-962X>

Luís Henrique de Oliveira Reis Silva

Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, São Luís-MA

<https://orcid.org/0009-0009-1650-4717>

Andréa Patrícia Castro Leite

Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento
e Meio Ambiente, São Luís-MA

<https://orcid.org/0000-0002-0710-0480>

Flávia Rebelo Mochel

Profa. Dra. da Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente, Depto. de Oceanografia e Limnologia

<https://orcid.org/0000-0001-5911-3171>

Resumo

Os ecossistemas costeiros estão entre os sistemas mais produtivos e biologicamente diversos do planeta. Entretanto, esses ambientes vêm sendo cada vez mais ameaçados por uma infinidade de alterações antrópicas. Neste contexto, esta pesquisa tem por objetivo analisar os impactos ambientais (negativos) no estuário do Rio Claro, considerando a sua dinâmica de transformação, frente aos desafios impostos pelas novas políticas brasileiras de licenciamento ambiental. Para tanto, procede-se à metodologia que se baseou numa pesquisa de campo exploratória, descritiva, de natureza aplicada, de abordagem qualitativa, de levantamento bibliográfico e análise documental. Em seguida, foram utilizadas as metodologias *Problem – Based Learning* (PBL) e Avaliação Ecológica Rápida (AER) para diagnóstico do objeto de estudo (estuário do Rio Claro). Ademais, foram feitas observações *in loco* e entrevistas, onde os dados obtidos foram coletados e analisados por meio da técnica de análise de conteúdo categorial, permitindo identificar e compreender as particularidades do ambiente em estudo. Como principais resultados observou-se que no estuário do Rio Claro, mesmo com impactos antrópicos, apresenta espécies importantes para a cadeia alimentar e dispersão de sementes. Demonstrou-se a importância da atuação na proposição de soluções para problemas socioambientais observados, fornecendo dados para boas práticas e tomadas de decisões em políticas públicas. Como proposta de ação, defende-se a criação de uma Unidade Conservação, visando mitigar impactos antrópicos e restaurar áreas degradadas e assegurar a sustentabilidade ecológica no estuário do Rio Claro.

Palavras-Chave: licenciamento ambiental, unidade de conservação, ecossistemas costeiros, impactos antrópicos, Rio Claro

Abstract

Coastal ecosystems are among the most productive and biologically diverse systems on the planet. However, these environments are increasingly threatened by a multitude of anthropogenic alterations. In this context, this research aims to analyze the (negative) environmental impacts on the Rio Claro estuary, considering its transformation dynamics, in the face of the challenges imposed by new Brazilian environmental licensing policies. To this end, the methodology employed was based on exploratory, descriptive, applied field research with a qualitative approach, bibliographic research, and document analysis. Subsequently, Problem-Based Learning (PBL) and Rapid Ecological Assessment (REA) methodologies were used to diagnose the object of study (Rio Claro estuary). Furthermore, in situ observations and interviews were conducted, and the data obtained were collected and analyzed using categorical content analysis, allowing for the identification and understanding of the particularities of the environment under study. The main findings showed that the Rio Claro estuary, even with anthropogenic impacts, presents species important for the food chain and seed dispersal. The importance of proposing solutions to observed socio-environmental problems was demonstrated, providing data for good practices and decision-making in public policies. As a proposed action, the creation of a Conservation Unit is advocated, aiming to mitigate anthropogenic impacts, restore degraded areas, and ensure ecological sustainability in the Rio Claro estuary.

Keywords: environmental licensing, conservation unit, coastal ecosystems, anthropogenic impacts, Rio Claro

Introdução

O processo de urbanização tem se tornado um fenômeno de grande proporção e uma das temáticas mais discutidas no âmbito ambiental. Esse processo, no entanto, gera diversas reflexões sobre o paradigma do crescimento urbano versus a manutenção da qualidade do meio ambiente.

Diante dos desafios impostos pela expansão urbana, tornam-se essenciais mecanismos legais que assegurem a preservação dos ecossistemas e dos recursos naturais. Nesse contexto, a Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, conceitua a Área de Preservação Permanente (APP) como uma área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, facilitar o fluxo gênico da fauna e da flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.

Entre os ambientes que mais demandam essa proteção, destacam-se os ecossistemas costeiros. Caracterizados por sua interface entre os ambientes terrestre e marinho, esses ecossistemas são os sistemas mais produtivos e biologicamente diversos do planeta. Eles abrangem uma variedade de habitats, incluindo manguezais, estuários, restingas, brejos e recifes de corais (Dias, 2024).

Dada a complexidade e a biodiversidade dos ecossistemas costeiros, a presença de serviços ecossistêmicos é essencial tanto para o bem-estar humano quanto para a sustentabilidade das zonas litorâneas. O conceito de Serviços Ecossistêmicos (SE) representa a possibilidade de quantificar o valor da natureza, referindo-se às condições favoráveis que ela oferece para sustentar a vida humana, uma vez que as populações se beneficiam direta ou indiretamente das funções dos ecossistemas (Ribeiro *et al.*, 2024).

A Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA), criada em 2005, classifica os SE (Quadro 1) em serviços de provisão, regulação, suporte e culturais, ressaltando sua importância para o bem-estar humano. A falta de reconhecimento da relação entre esse bem-estar e a conservação dos ecossistemas contribui para a degradação contínua desses sistemas e para a perda de biodiversidade (Ribeiro *et al.*, 2024).

Quadro 1: Categorias de serviços ecossistêmicos definidas pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio, com alguns exemplos.

Serviços de Provisão Fornecimento de alimento Recursos naturais Medicamentos Produtos não madeireiros	Serviços de Regulação Regulação do clima Controle de doenças e pragas Qualidade do ar e da água Prevenção de enchentes e erosão
Serviços de Suporte Formação e manutenção do solo Ciclagem dos nutrientes Polinização de culturas Fotossíntese e produção de oxigênio	Serviços Culturais Benefícios estéticos e paisagísticos Ecoturismo e recreação Valores espirituais e culturais Educação e pesquisa científica

Fonte: Adaptado de Lima e Silva (2025).

Nesse contexto, torna-se fundamental analisar áreas específicas que exemplifiquem essa interdependência entre sociedade e natureza. A bacia hidrográfica do Rio Claro – uma microbacia litorânea localizada na parte norte da cidade de São Luís, no Estado do Maranhão, Brasil – abriga ecossistemas sensíveis e uma biodiversidade singular. Ao longo dos anos, essa bacia tem sido impactada negativamente pela crescente urbanização em seu entorno. As diversas pressões antrópicas têm descaracterizado as formações naturais da bacia do Rio Claro, colocando em risco todo um complexo sistema de suporte à vida (Fabri *et al.*, 2024).

A bacia hidrográfica do Rio Claro é dividida em Alto Curso (Nascente), Médio Curso (Trecho urbano) e Baixo Curso (Estuário). O objeto de estudo desta pesquisa concentra-se no Baixo Curso, especificamente na porção estuarina da bacia, devido à presença de manguezais e por se tratar de uma área de transição ecologicamente sensível e ambientalmente vulnerável à pressão antrópica.

Os estuários propiciam uma grande quantidade de serviços ecossistêmicos, como fornecimento de peixes e frutos do mar, controle de enchentes e de sedimentos, manutenção da biodiversidade, elevada produtividade primária, além de abrigarem uma multiplicidade de comunidades tradicionais em seu entorno (Mochel *et al.*, 2024). Apesar dessa relevância ecológica e socioeconômica, a flexibilização das políticas ambientais brasileiras tem sido alvo de debates, principalmente diante dos impactos negativos sobre os ecossistemas estuarinos.

Tendo esse cenário como motivador, justifica-se a importância do desenvolvimento de estudos que abordem o aumento da fragilidade do estuário do Rio Claro. Tal fragilização, decorrente da flexibilização das políticas brasileiras de licenciamento ambiental, pode abrir espaço para a intensificação de ações antrópicas, como desmatamento e ocupações irregulares, agravando os desafios da preservação ambiental e do equilíbrio de ecossistemas sensíveis.

O objetivo que motivou o presente estudo foi analisar os impactos ambientais negativos no estuário do Rio Claro, considerando sua dinâmica de transformação frente aos desafios impostos pelas novas políticas brasileiras de licenciamento ambiental.

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, buscou-se atingir os seguintes objetivos específicos: i) realizar o diagnóstico dos principais impactos ambientais negativos que afetam o estuário do Rio Claro, utilizando as metodologias *Problem-Based Learning* e Avaliação Ecológica Rápida; ii) compreender as dinâmicas de transformação ambiental; e, por fim, iii) identificar áreas prioritárias para ações de preservação, conservação e restauração ecológica.

Metodologia

• Delimitação e caracterização da área de estudo

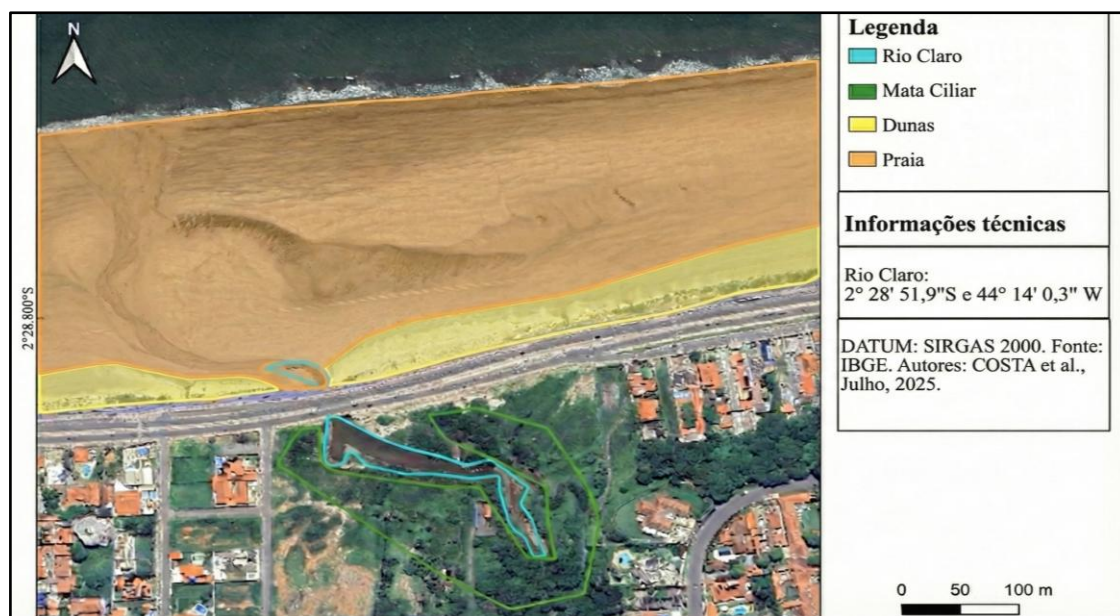
O estuário do Rio Claro (Figura 1) está localizado na porção norte da Ilha do Maranhão, no município de São Luís, e possui uma área de aproximadamente 2,31 km² (LIMA *et al.*, 2023). As coordenadas geográficas aproximadas de sua área central são 2° 28' 51,9''S e 44° 14' 0,3''W.

Durante a pesquisa de campo, foram identificadas feições geomorfológicas típicas de sistemas costeiros, como dunas frontais, trechos de areia compactada e bancos de maré, além de uma zona de transição bem definida entre águas doces e marinhas. Esses elementos confirmam que a foz do Rio Claro constitui um estuário tropical cuja dinâmica natural tem sido progressivamente alterada pela intensificação da ocupação urbana em seu entorno.

A partir dos dados já gerados por autores como Silva (2012), Costa *et al.* (2019), Santana *et al.* (2019) e França (2020), sobre o crescimento urbano de São Luís, associados a sobrevoos com drone realizados em 2022, constatou-se que, nos últimos 42 anos (1980–2022), ocorreu uma expansão da mancha urbana para áreas morfologicamente frágeis, como praias, planícies fluviais e de maré. No entanto, os impactos negativos gerados por

esse crescimento comprometeram significativamente os sistemas naturais, como é o caso dos recursos hídricos (Lima *et al.*, 2024). Dessa forma, mesmo com arcabouço legal, essa área tem sofrido danos ambientais significativos.

Figura 1: Mapa/Carta de localização da área de estudo no estuário do Rio Claro, Ilha São Luís, Maranhão, Brasil, América do Sul.



Fonte: Os autores (2025).

A área encontra-se inserida em uma zona legalmente reconhecida como de proteção, sujeita à aplicação da Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que institui as Áreas de Preservação Permanente (APPs) com foco na proteção de nascentes, cursos d'água, lagos e lagoas (Brasil, 2012).

As dunas frontais identificadas na foz do Rio Claro são legalmente reconhecidas como Área de Preservação Permanente pela Lei Federal nº 12.651:2012. No entanto, a efetividade dessa proteção normativa é frequentemente comprometida pela pressão urbana – um fenômeno amplamente documentado em outras praias de São Luís, como atestam os estudos que evidenciam a ocupação e a degradação das dunas no Calhau (Silva; Costa, 2020). Confirma-se, portanto, que a intensificação da ocupação no entorno do estuário do Rio Claro representa uma ameaça concreta à integridade desse sistema costeiro. É importante lembrar que essa situação viola a Resolução já revogada do CONAMA nº 303:2002, a qual, no entanto, ainda é citada em decisões judiciais que discutem o princípio do *in dubio pro natura* (Soares, 2024).

Complementarmente, a Lei Municipal nº 3.253, de 29 de dezembro de 1992, determina uma zona de proteção de 50 metros a partir das margens de áreas inundáveis,

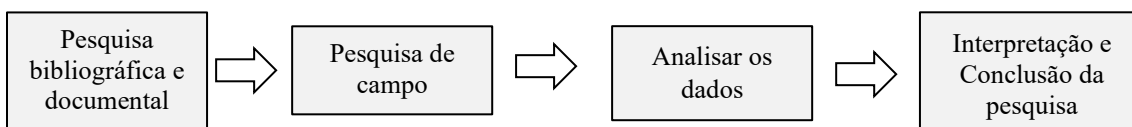
manguezais, igarapés e outros corpos hídricos (São Luís, 1992). A região abriga ecossistemas altamente sensíveis, como manguezais, dunas, restingas e áreas de recarga de aquíferos, os quais desempenham funções ecológicas fundamentais, como a manutenção da biodiversidade, a proteção contra eventos climáticos extremos e a regulação do ciclo hidrológico (Conceição, 2022).

A delimitação preliminar da área de estudo foi realizada utilizando-se imagens de satélite obtidas por meio do *software Google Earth Pro*, com apoio de cartas-imagem atualizadas e mapas temáticos disponíveis nos bancos de dados da Prefeitura Municipal de São Luís e da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA-MA). Foram utilizados pontos de referência geográficos e elementos visuais (como o traçado do rio e áreas vegetadas) para identificar o leito principal do rio, suas margens e a extensão das APPs adjacentes.

- **Procedimentos metodológicos**

A pesquisa adotou uma metodologia exploratória e descritiva, de natureza aplicada, com análises bibliográficas, documentais e de campo (Figura 2), com o intuito de identificar e compreender os impactos ambientais negativos que incidem sobre o estuário do Rio Claro, considerando suas dinâmicas ecológicas e antrópicas.

Figura 2: Etapas da realização da pesquisa sobre o estuário do Rio Claro.



Fonte: Os autores (2025).

Os dados coletados foram interpretados e analisados utilizando-se fluxogramas, quadros e registros fotográficos. As observações *in loco* forneceram informações relacionadas às características dos ecossistemas, aos aspectos geoambientais e aos impactos ambientais sobre o objeto de estudo.

A abordagem da pesquisa é qualitativa, tendo em vista que foram especificadas e detalhadas as informações provenientes das observações *in loco*, com o objetivo de compreender as nuances da problemática relacionada aos impactos ambientais sobre o estuário do Rio Claro.

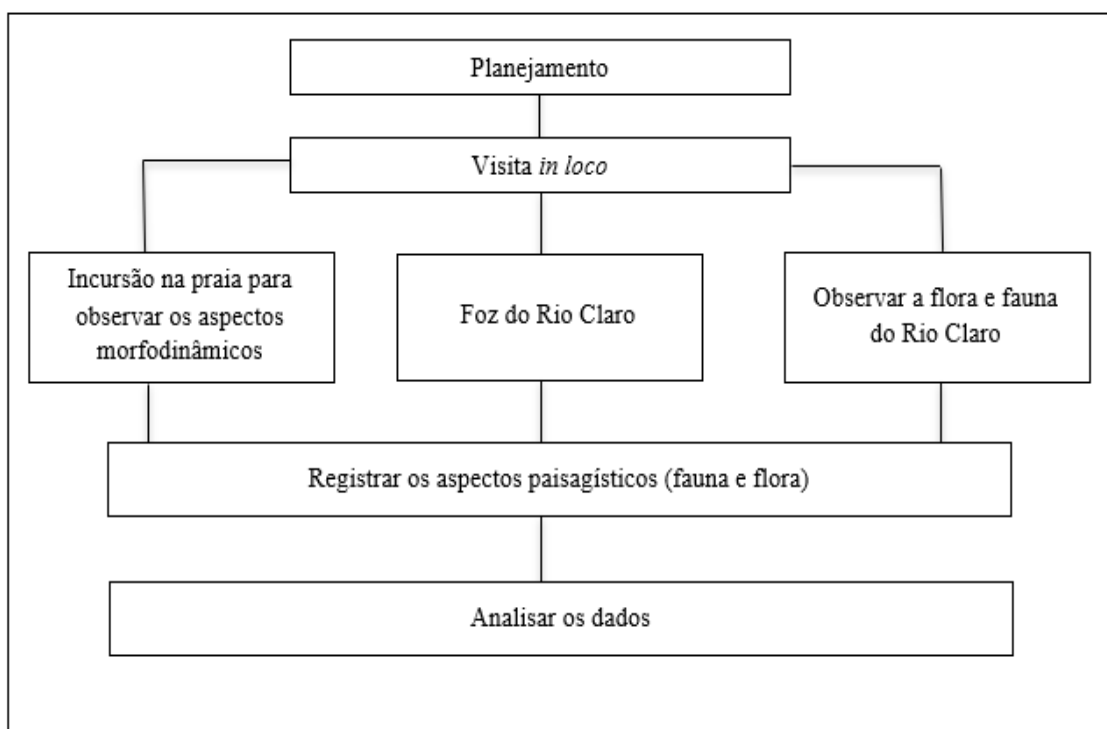
Foram analisadas as políticas brasileiras que flexibilizam o licenciamento ambiental: o Projeto de Lei 3.334 (em tramitação no Senado Federal), de 3 de julho de 2023, que afetará o Código Florestal (Lei Federal nº 12.651:2012), e o Projeto de Lei

2.159 (que aguarda sanção presidencial), de 18 de maio de 2021, que impactará a legislação sobre Licenciamento Ambiental.

Foram consultados relatórios técnicos de órgãos ambientais, com o intuito de embasar a análise crítica e integrar os dados obtidos em campo. Os órgãos cujos documentos foram analisados foram: o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA), o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (SEMA-MA) e a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMAM).

Na pesquisa de campo (Figura 3), realizou-se o diagnóstico do estuário do Rio Claro por meio da aplicação das metodologias de Avaliação Ecológica Rápida (AER) e de Aprendizagem Baseada em Problemas (*Problem-Based Learning* – PBL).

Figura 3: Fluxograma das etapas da realização da pesquisa de campo.



Fonte: Os autores (2025).

A aplicação da metodologia de Avaliação Ecológica Rápida (AER) tem como objetivo realizar diagnósticos ambientais, permitindo identificar com agilidade a integridade ecológica de ecossistemas e apoiar a tomada de decisões para conservação. Já a Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL), fundamentada nos princípios da Escola Ativa, integra conteúdos e estudos teóricos e práticos em diferentes áreas temáticas (Córdoba; Baade; Santos, 2020).

Resultados e Discussão

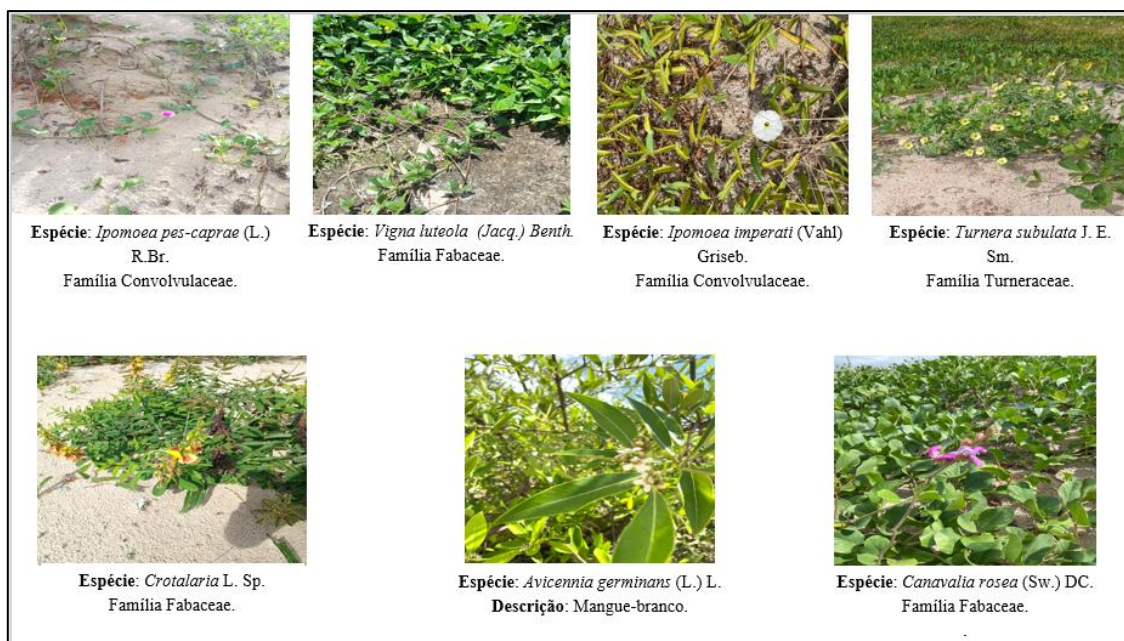
O estuário do Rio Claro, situado entre os bairros Calhau e Olho d'Água, integra um setor particularmente sensível do litoral da Ilha do Maranhão, onde se sobrepõem elementos florísticos típicos de restingas, dunas e manguezais. Mesmo sem a realização de coletas diretas neste estudo, a literatura disponível para ecossistemas semelhantes da Ilha de São Luís — especialmente as praias de São Marcos, Panaquatira, Ponta d'Areia, Guia e Curupu — permite inferir, com solidez científica, a composição esperada de espécies nesse estuário. Trabalhos florísticos consolidados para São Luís (Freire, 1993; Silva; Araújo; Almeida, 2016; Lima; Almeida, 2018; Guterres *et al.*, 2020) mostram que esses ambientes mantêm conjuntos recorrentes de plantas adaptadas à salinidade, aos ventos, à instabilidade sedimentar e às variações de maré, condições igualmente encontradas ao longo do estuário do Rio Claro.

Do ponto de vista da vegetação, estudos realizados nas restingas da Ilha de São Luís indicam a presença abundante de espécies herbáceas e trepadeiras com papel fundamental na fixação das dunas e na estabilização do solo, como *Ipomoea pes-caprae*, *Blutaparon portulacoides*, *Sporobolus virginicus* e *Canavalia obtusifolia* (Freire, 1993; Guterres *et al.*, 2020). Essas espécies, já registradas em outras praias da ilha, são esperadas também nas margens expostas do estuário do Rio Claro, onde o substrato arenoso e o impacto das ondas favorecem formas de crescimento rasas e altamente resilientes. Além disso, fragmentos arbustivos e arbóreos de restinga — como *Chrysobalanus icaco*, *Byrsonima crassifolia*, *Eugenia biflora* e *Hibiscus tiliaceus* — tendem a ocorrer em faixas mais internas, sobretudo em áreas menos diretamente impactadas pelo uso urbano, conforme descrito para ambientes próximos (Lima; Almeida, 2018; Amorim *et al.*, 2023).

Nas zonas mais abrigadas e sujeitas à influência estuarina, destaca-se a transição para o manguezal, ecossistema cuja composição e estrutura na Ilha de São Luís já foram amplamente descritas. Estudos como os de Fonsêca e Mochel (2016) apontam a predominância das espécies clássicas de mangue — *Rhizophora mangle*, *Avicennia schaueriana* e *Laguncularia racemosa* — que desempenham papel essencial na ciclagem de nutrientes, na retenção de sedimentos e no suporte trófico para a fauna associada. A proximidade entre o estuário do Rio Claro e os manguezais do Rio dos Cachorros e da Baía de São Marcos sugere interação ecológica intensa, compartilhamento de espécies e fluxo constante de matéria orgânica.

A identificação taxonômica das espécies vegetais características de zonas costeiras e estuarinas foi realizada com base na morfologia dos espécimes encontrados e em comparação com descrições disponíveis na plataforma *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) (Figura 4).

Figura 4: Flora identificada no estuário do Rio Claro, São Luís, Maranhão.



Fonte: Os autores (2025).

A partir desses resultados, constatou-se que a composição da flora registrada é semelhante à de outros ambientes costeiros estudados no Estado do Maranhão (Amorim *et al.*, 2023; Lima; Almeida, 2018; Guterres *et al.*, 2020; Silva; Araújo; Almeida, 2016; Fonsêca; Mochel, 2016).

A fauna, por sua vez, reflete o mosaico de habitats presentes no estuário. Em ambientes de manguezais e zonas entre-marés adjacentes, são amplamente registradas espécies de caranguejos como *Ucides cordatus*, *Goniopsis cruentata* e representantes do gênero *Minuca*, importantes engenheiros de ecossistema responsáveis pela bioturbação, oxigenação do sedimento e remoção de serapilheira (Schories *et al.*, 2003; Kristensen, 2008). Para a Ilha de São Luís especificamente, Cutrim (2018) e Pinheiro *et al.* (2024) detalham a ocorrência e distribuição da macrofauna bêntica e de caranguejos minucídeos, indicando que tais organismos são sensíveis a impactos urbanos e à alteração da qualidade da água — fatores já relatados na bacia do Rio Claro (Lima *et al.*, 2023; Santana *et al.*, 2024).

A avifauna costeira também representa um grupo relevante para o Rio Claro. Trabalhos realizados em áreas próximas, como o Canal da Raposa e as praias da Ponta da

Areia e Panaquatira, registram grande diversidade de aves limícolas, marinhas e nectarívoras (Silva *et al.*, 2007; Rocha *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2010). Entre as espécies mais frequentes estão maçaricos, batuíras, trinta-réis e *Pitangus sulphuratus* (bem-te-vi), além de beija-flores associados à vegetação de restinga (Zanata, 2018; Mendes, 2011). Sua presença está diretamente ligada à disponibilidade de alimento proporcionada pela macrofauna bêntica e pela vegetação nativa que permanece nas franjas do estuário.

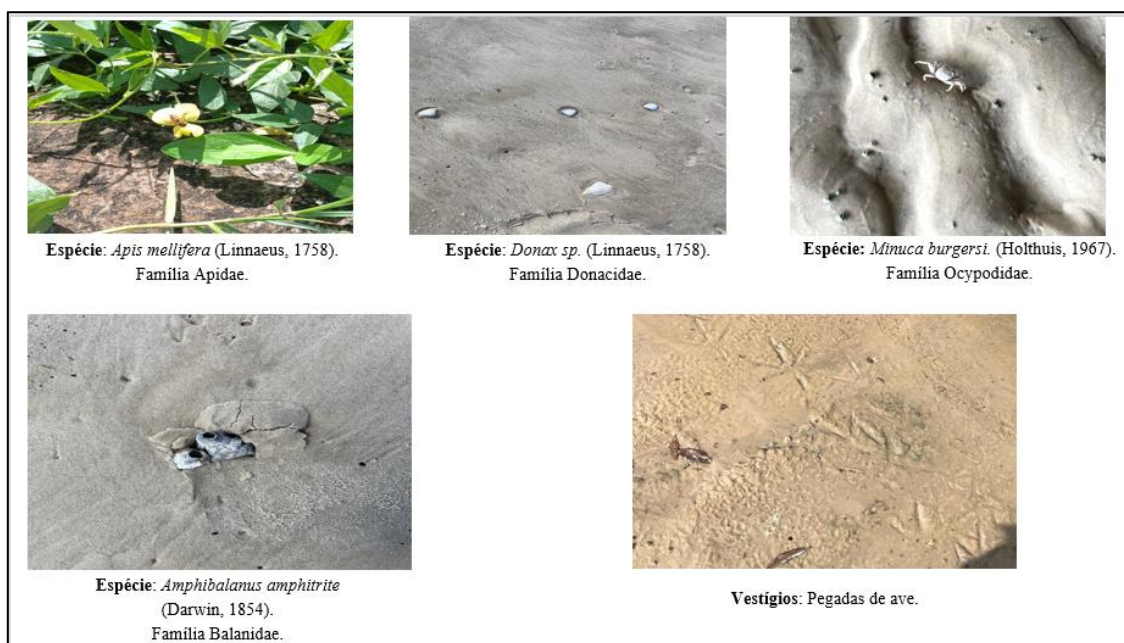
A composição faunística e florística esperada para o Rio Claro segue, portanto, um padrão consistente com outros ambientes costeiros da Ilha de São Luís, apesar das pressões antrópicas crescentes. A expansão urbana, a impermeabilização do solo, o lançamento de efluentes e o avanço de obras como o prolongamento da Avenida Litorânea já foram apontados como agentes de degradação e fragmentação de habitats naturais nessa região (Costa *et al.*, 2014). Esses impactos tendem a reduzir a cobertura vegetal nativa e comprometer a permanência de espécies sensíveis, afetando processos-chave como a retenção de sedimentos, a ciclagem de nutrientes e a disponibilidade de áreas de alimentação para aves migratórias.

Assim, mesmo sem coletas diretas, o conjunto de dados publicados para ambientes costeiros adjacentes permite afirmar que o trecho estudado (estuário) do Rio Claro mantém elementos representativos das floras litorânea e estuarina do Maranhão, com espécies vegetais e faunísticas já bem documentadas na literatura regional. A integração desses dados reforça a importância da conservação dos remanescentes vegetais e da recuperação de áreas degradadas, sobretudo diante do papel ecológico crucial que o estuário desempenha na conectividade entre dunas, restingas e manguezais da Ilha de São Luís.

A fauna também se faz presente na área de estudo, com registros de caranguejos e vestígios de aves. Segundo Nunes e Mendonça (2013), a fauna do litoral de São Luís é caracterizada por uma biodiversidade rica e diversificada. O estuário funciona como um berçário natural, uma vez que envolve o manguezal — ecossistema que proporciona condições favoráveis para espécies endêmicas e migratórias — e apresenta uma variedade de espécies (Santos, 2022).

Em campo, na área de estudo, foi possível obter registros de diversos animais, tais como caranguejos e aves (Figura 5). Na faixa de areia que se estende do litoral ao mar foram encontradas cracas e bivalves; em uma porção jusante do estuário do Rio Claro, encontrou-se um espécime de caranguejo; próximo à nascente do rio, foram observadas pegadas de aves; e, na restinga, um inseto polinizador.

Figura 5: Fauna identificada no estuário do Rio Claro, São Luís, Maranhão.



Fonte: Os autores (2025).

Mesmo com sinais de degradação, o estuário do Rio Claro ainda oferece abrigo e alimento para a vida silvestre. Essa coexistência entre urbanização e natureza — cada vez mais rara em grandes centros urbanos — torna essa APP uma das últimas fronteiras de resistência frente à expansão urbana desordenada e ao colapso dos serviços ecossistêmicos essenciais.

A identificação taxonômica das espécies animais foi realizada com base na morfologia dos espécimes encontrados, na observação de vestígios e na comparação com descrições disponíveis na plataforma GBIF, em artigos científicos e em relatórios técnicos (Rêgo; Albuquerque, 2012; Cutrim, 2017; Mendes, 2019). Com base nesses resultados, constatou-se que a composição faunística das espécies registradas é semelhante à de outros ambientes costeiros estudados no Estado do Maranhão (Rocha *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2010; Santos; Feres; Lopes, 2007; Campelo *et al.*, 2017; Silva, 2023; Silva, 2007). Espécies como *Astriclypeus mannii* Verrill (1867) e *Physalia physalis* (Linnaeus, 1758), que também são comuns nesses ambientes, não foram encontradas. Para Junior (2025), a perda de biodiversidade é consequência da poluição e da degradação, uma vez que a deterioração ambiental afeta a fauna e a flora.

O estuário do Rio Claro está inserido em uma área urbana, sofrendo com a pressão antrópica, que gera ocupação irregular, poluição e descarte inadequado de resíduos. Entretanto, o local possui importantes bens e serviços socioambientais (Quadro 2),

essenciais para a manutenção da biodiversidade local, do equilíbrio climático e da qualidade de vida da população.

Quadro 2: Bens e serviços socioambientais no estuário do Rio Claro, São Luís, Maranhão.

Elementos bióticos	Aspectos paisagísticos	Serviços ecossistêmicos	Aspectos sociais e culturais
Ecosistema 1	Rio Claro	Regulação climática, suporte à biodiversidade, recarga do lençol freático.	Fonte de pesca artesanal, lazer local.
Ecosistema 2	Mata ciliar	Proteção das margens, filtragem de poluentes, conservação da biodiversidade.	Área de trilhas ecológicas, educação ambiental.
Ecosistema 3	Dunas	Proteção contra avanço do mar, estoque de areia, habitat de espécies endêmicas.	Paisagem de identidade local, uso em caminhadas e turismo ecológico.
Ecosistema 4	Praia	Lazer, turismo, proteção costeira.	Forte uso turístico, práticas esportivas e culturais como pesca e festas populares.

Fonte: Os autores (2025).

No entanto, em termos de impactos ambientais negativos, os sinais de degradação são visíveis e preocupantes: as margens do rio estão repletas de resíduos sólidos e entulhos, principalmente em locais de maior fluxo humano. Além disso, em alguns pontos, existe a formação de bancos de areia que indicam a presença de assoreamento.

Foram observadas, durante a pesquisa de campo, construções informais avançando sobre áreas de proteção permanente. Soma-se a isso a ausência de

infraestrutura básica voltada à conservação ambiental: não há cercas, placas informativas, trilhas ecológicas ou programas de educação ambiental visíveis no local.

A falta de planejamento urbano e a ausência de uma integração entre políticas ambientais e sociais têm levado, no estuário do Rio Claro, à destruição acelerada dos ecossistemas (Quadro 3 e Figura 6). A degradação da vegetação ripária reduz a capacidade natural da APP de prestar serviços como o controle da temperatura, a purificação da água e o abrigo para a fauna, além de expor a população vizinha a riscos crescentes, como enchentes e contaminação hídrica.

Quadro 3: As condições atuais do estuário do Rio Claro.

Ecossistemas	Processos predominantes	Modificações antrópicas	Visibilidade da paisagem
Rio Claro	Fluxo de água doce, erosão das margens, deposição de sedimentos, recarga hídrica.	Proximidade com a avenida, presença de lixo flutuante.	Curso d'água visível com margens sinuosas; paisagem baixa integrada ao relevo local.
Mata ciliar	Ciclagem de nutrientes, conservação da umidade.	Cortes na vegetação para trilhas, possível retirada de espécies nativas.	Vegetação densa e contínua ao longo do rio; contraste visual com áreas urbanas próximas.
Dunas	Transporte eólica de areia, compactação, colonização vegetal em estágios iniciais.	Trânsito de pessoas, possíveis intervenções na vegetação.	Relevo ondulado elevado; paisagem marcante e aberta, com textura arenosa visível.
Praia	Ação das marés, deposição de sedimentos, salinização, dinâmica costeira contínua.	Construções costeiras, turismo, resíduos sólidos, caminhos de acesso.	Faixa arenosa plana e larga; alta visibilidade com horizonte marítimo e zona de arrebentação.

Fonte: Os autores (2025).

Figura 6: Impactos ambientais de origem antrópica no estuário do Rio Claro.



Legenda: (a), (b), (c) representam a tubulação direcionada à praia;
(d), (e), (f) indicam a presença de resíduos sólidos na praia.

Fonte: Os autores (2025).

O estuário do Rio Claro evidencia a fragilidade ambiental, devido à ausência de medidas básicas de proteção e à falta de políticas públicas integradas entre as esferas municipal, estadual e federal. O objeto de estudo demonstra uma fragilidade na gestão ambiental urbana. A situação torna-se ainda mais delicada quando se considera o contexto político-econômico atual. As novas políticas de flexibilização do licenciamento ambiental prorrogaram a desoneração da folha de pagamento de diversos setores produtivos, entre eles a construção civil e o turismo, que têm forte presença em São Luís. Embora a intenção dessas leis seja a preservação de empregos e o estímulo econômico, seus efeitos indiretos sobre a política ambiental são preocupantes.

Com a queda na arrecadação previdenciária, o Estado pode ter menos recursos para investir em fiscalização, monitoramento e recuperação de áreas degradadas, como as APPs urbanas. Além disso, a expansão dos setores beneficiados — especialmente em áreas costeiras e ambientalmente frágeis — pode acelerar o avanço sobre zonas protegidas. Outro ponto crítico é que a lei não impõe contrapartidas ambientais aos setores favorecidos, o que impede a criação de um elo entre incentivo fiscal e preservação ambiental.

O enfraquecimento dos instrumentos de controle favorece intervenções que podem desconsiderar a importância ecológica de áreas bastante sensíveis, como a do

estuário do Rio Claro. É evidente que, sem uma efetiva articulação entre as esferas de poder e as comunidades locais, será impossível conter a degradação dos ecossistemas ainda funcionais na região urbana de São Luís.

Considerações Finais

A aplicação conjunta das metodologias de Aprendizagem Baseada em Problemas (*Problem-Based Learning* – PBL) e Avaliação Ecológica Rápida (AER) no estuário do Rio Claro gerou reflexões profundas sobre os problemas ambientais existentes, em especial naqueles que afetam as regiões costeiras.

Tendo esse cenário como pano de fundo, a pesquisa analisou os impactos ambientais no estuário do Rio Claro, considerando sua dinâmica de transformação frente aos desafios impostos pelas novas políticas brasileiras de licenciamento ambiental.

Ficou evidente, durante a coleta de dados, a abundância de espécies da flora no estuário, bem como a presença de uma fauna diversificada e de seus vestígios. Ademais, foi possível constatar a fragilidade do habitat dessa fauna, uma vez que ela sofre diretamente os impactos decorrentes das pressões humanas.

A articulação entre o conhecimento acadêmico e a realidade empírica evidenciou a importância da formação de profissionais capacitados a atuar de maneira crítica perante os desafios ambientais contemporâneos. A vivência direta no território permitiu não apenas o reconhecimento dos impactos ambientais visíveis, mas também o desenvolvimento de uma postura investigativa e sensível ao contexto sociopolítico que envolve a gestão de áreas costeiras. A análise do caso do estuário do Rio Claro, ao fundamentar-se em aspectos legais, ecológicos e territoriais, demonstrou como a educação ambiental em nível de pós-graduação pode atuar como um vetor de transformação social e política.

Destaca-se que o fortalecimento de ações educativas aliadas à pesquisa aplicada constitui um caminho promissor para o enfrentamento das ameaças aos ecossistemas costeiros. Como medida concreta, propõe-se a criação de uma Unidade de Conservação na área, visando mitigar os impactos antrópicos, restaurar as áreas degradadas e assegurar a sustentabilidade ecológica do objeto de estudo.

Por fim, esta pesquisa teve como propósito demonstrar a importância da atuação acadêmica na proposição de soluções para problemas sociais, fornecendo dados para estudos de caso, para a orientação de boas práticas e para a tomada de decisões em

políticas públicas, especialmente frente ao cenário atual de flexibilização do licenciamento ambiental no Brasil.

Em termos de pesquisas futuras, recomenda-se a elaboração de um planejamento estratégico voltado para áreas fortemente impactadas, uma vez que ainda há potencial para a regeneração ambiental — desde que existam investimentos contínuos em ciência, planejamento urbano integrado e no efetivo engajamento da sociedade.

Referências

- AMORIM, I. F. F.; SILVA, A. F. C.; AMORIM, G. S.; GUTERRES, A. V. F.; ALMEIDA, E. B. Descrição fitossociológica da comunidade herbácea das dunas de Curupu, Raposa, Maranhão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1387–1396, 2023.
- BRASIL. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Brasília: Diário Oficial da União, 2012.
- CAMPELO, C. M. A. *et al.* Bioprospecção de macroinvertebrados bênticos para ensaios ecotoxicológicos de sedimentos marinhos e estuarinos. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, v. 27, p. 33-42, 2017.
- CONCEIÇÃO, J. J. C. **Avaliação da urbanização na orla de São Luís: Estudo de caso na praia do Olho d'água, São Luís, Maranhão, Brasil**. 2022. Monografia (Curso de Graduação em Oceanografia) – Departamento de Oceanografia e Limnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.
- CÓRDOVA, P. R.; BAADE, J. H.; SANTOS, A. M. Problem-based learning (PBL) e interdisciplinaridade no ensino-aprendizagem de engenharia de software. **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação**, v. 15, n. 4, p. 2078-2093, out./dez, 2020.
- COSTA, C. M. C. *et al.* Impactos ambientais configurados no prolongamento da Avenida Litorânea, São Luís–MA. **Observatório Geográfico América Latina**, v.14, n.1, 2014.
- CUTRIM, A. S. T. **Composição e distribuição da macrofauna bêntica da região entremarés da Raposa, Maranhão, Brasil**. 2017. Tese (Doutorado) – Programa de Pós – Graduação em Recursos Aquáticos e Pesca. Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2017.
- CUTRIM, M. de L. N. **Composição e distribuição da macrofauna bêntica da região entremarés da Raposa, Maranhão, Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas. Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.
- DIAS, R. Impactos climáticos em ecossistemas costeiros: vulnerabilidade, consequências e caminhos para a sustentabilidade. **Revista Sociedade Científica**, v.7, n. 1, p. 426-454, 2024.

FABRI, A. N.; FREIRE, A. T. G.; GRAÇA, J. C. P.; MARTINS, J. C. S.; SANTOS, K. S.; MORAES, L. A. T.; AZEVEDO, J. W. J.; MOCHER, F. R. Impactos ambientais em ecossistemas costeiros adjacentes ao estuário do Rio Claro: relato de experiência interdisciplinar com subsídios para a criação de uma unidade de conservação. *In*: PANIAGUA, C. E. S. (Org). **Sustentabilidade e meio ambiente – Inovação e responsabilidade**. Ponta Grossa: Atena, 2024.

FREIRE, M. C. C. **Estudos florísticos na região litorânea da Ilha de São Luís (MA)**. 1993. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1993.

FONSÊCA, I. L. A.; MOCHER, F. R. Fitomassa aérea de um manguezal no estuário do rio dos Cachorros, São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, v. 26, n. 1, p. 17-25.

GUTERRES, A. V. F.; AMORIM, I. F. F.; SILVA, A. F. C.; ALMEIDA, E. B. Levantamento florístico e fisionômico da restinga da praia da Guia, São Luís, Maranhão. **Revista Biodiversidade**, v.19, n.4, p. 57–72, 2020.

JUNIOR, J. O. F. A. A degradação do meio ambiente e a biodiversidade brasileira: uma revisão bibliográfica sobre a conservação ambiental. **International Integralize Scientific**, v. 5, n. 45, 2025.

KRISTENSEN, E. Mangrove crabs as ecosystem engineers: with emphasis on sediment processes. **Journal of Sea Research**, v. 59, p. 30-43, 2008.

LIMA, C. G.; FRANÇA, D. V. B.; SILVA, Q. D.; SANTANA, R. G. Impactos ambientais e uso da terra na bacia hidrográfica do Rio Claro, Ilha do Maranhão–MA. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v.4, n.3, 2023.

LIMA, C. G.; FRANÇA, D. V. B.; SILVA, Q. D.; SANTANA, R. G.; MACIEL, D.S.; AVELAR, C. Sustentabilidade Urbana e as alterações fluviais: uma análise da Bacia Hidrográfica do Rio Claro, São Luís - MA. **Sustentabilidade do futuro: livro de memórias do Sustentare & WIPIS**. Digital: Even3, 2024.

LIMA, G. P.; ALMEIDA, E. B. de. Diversidade e similaridade florística de uma restinga ecotonal no Maranhão, Nordeste do Brasil. **Interciência**, v. 43, n. 4, p. 275–282, 2018.

LIMA, M. V. S. A.; SILVA, J. M. Comparação dos planos municipais de arborização e sua capacidade de viabilizar serviços ecossistêmicos em cinco capitais brasileiras. **Interações**, v. 26, jan./dez. 2025. Art. e26054707.

MENDES, D. C. S. **Sanidade do ambiente e da ostra *Crassostrea gasar* cultivada no município de Primeira Cruz, Maranhão, Brasil: aspectos microbiológicos, parasitológicos e de fauna associada**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Aquáticos e Pesca. Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

MENDES, M. M. **Helintos e ácaros nasais parasitos de *Pitangus sulphuratus* no Rio Grande do Sul**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Parasitologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

MOCHEL, F. R.; RIBEIRO, S. P.; LIMA, A. M. S.; TORRES, C. T. M.; MENDES, J. C. Serviços ecossistêmicos de provisão de manguezais em um estuário modificado por barragem. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 12, p. 01-21, 2024.

NUNES, J. L. S.; MENDONÇA, M. A. **Biodiversidade Marinha da Ilha do Maranhão**. São Luís: Edufma, 2013.

OLIVEIRA, F. S.; MEDONÇA, M. W. A.; VIDIGAL, M. C. S.; RÊGO, M. M. C.; ALBUQUERQUE, P. M. C. Comunidade de abelhas (Hymenoptera, Apoidea) em ecossistema de dunas na praia de Panaquatira, São José de Ribamar, Maranhão. **Revista Brasileira de Entomologia**, v.54, n. 1, p. 82–90, 2010.

PINHEIRO, M. S.; NETO, J. D.; SANTANA, W.; MANTELATTO, F. L. **Minuca burgersi (Holthuis, 1967): avaliação do risco de extinção**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2024.

RÊGO, M. M. C.; ALBUQUERQUE, P. M. C. **Biodiversidade de abelhas em zonas de transição no Maranhão**. III Semana dos Polinizadores: palestras e resumos, p. 36-57, 2012.

RIBEIRO, S. P.; MOCHEL, F. R.; BEZERRA, D. S.; ESCHRIQUE, S. A.; AZEVEDO, J. W. J. Serviços Ecossistêmicos de Manguezais em áreas portuárias no período 2006 a 2023: Uma Revisão Sistemática de Literatura. **Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 11, n. 6, dez. 2024. Art. 19368.

ROCHA, T. M. S.; CHAGAS, L. L. P.; COELHO, T. S.; MELO, M. G. T.; SOUSA, A. E. L. M. R.; EUGÊNIO, W. S. Diversidade de meiofauna em fragmento da praia da Ponta da Areia, São Luís, Maranhão, Brasil. *In*: Congresso de Ecologia, 13., 2017, Viçosa. **Anais [...]** Viçosa: Congresso de Ecologia, 2017.

ROCHA, T. M. S. *et al.* **Diversidade de meiofauna em fragmento da Praia da Ponta da Areia, São Luís, Maranhão, Brasil**. Brazilian Journal of Ecology, v. 2, n. 18, p. 114-123, 2018.

SANTANA, R. *et al.* **Impactos ambientais e cobertura da terra na bacia do Rio Claro**. 2024.

SANTOS, L. F. M. **Manguezal: educação ambiental como prática de desenvolvimento sustentável no parque natural municipal barão de Mauá - Magé/RJ**. 2022. 89 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Práticas em Desenvolvimento Sustentável) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2022.

SANTOS, L. A.; FERES, SJC; LOPES, A. T. L. Fauna de bivalves da praia de Panaquatira, Ilha de São Luís-MA. *In*: Congresso de Ecologia do Brasil, 8., 2007, Caxambu. **Anais [...]**. Caxambu: Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil, 2007.

SÃO LUÍS. **Lei nº 3.253, de 29 de dezembro de 1992**. Dispõe sobre o zoneamento, parcelamento, uso e ocupação do solo urbano dá outras providências. São Luís: Diário Oficial do Município de São Luís, 1992.

SCHORIES, D.; BERGAN, A. B.; BARLETTA, M.; KRUMME, U. The keystone role of leaf-removing crabs in mangrove forests of North Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, v.11, n. 4, p. 243–255, 2003.

SILVA, A. N. F.; ARAÚJO, A. C. M.; ALMEIDA JR., E. B. Flora fanerogâmica das dunas da praia de São Marcos, São Luís, Maranhão. In: ALMEIDA JR., E. B.; SANTOS-FILHO, F. S. (org.). **Biodiversidade do Meio Norte do Brasil**. Curitiba: CRV, 2016. p. 29–39.

SILVA, L. M. R. **Uso de habitats e sazonalidade de aves limícolas no Canal da Raposa, Ilha de São Luís**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação. Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2007.

SILVA, W. B. T. **Colonização de organismos incrustantes em diferentes tipos de substratos artificiais na Baía de São Marcos, São Luís – MA**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós – Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade. Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2023.

SOARES, L. A. **Sustentabilidade da orla do município de São Luís, Estado do Maranhão: subsídios para o planejamento e gestão costeira**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós – Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

ZANATA, T. B. **Beija-flores e suas fontes de néctar: interações raras e vulnerabilidade à extinção**. 2018. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA COBERTURA VEGETAL EM ÁREAS DE INFLUÊNCIA DA MINERAÇÃO NO SEMIÁRIDO ALAGOANO

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF VEGETATION COVER IN AREAS OF MINING INFLUENCE IN THE SEMIARID REGION OF ALAGOAS

DOI: <https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.03>

Submetido em: 08/02/2026

Revisado em: 15/02/2026

Publicado em: 20/02/2026

Keilane Alves de Souza

Graduada em engenharia Florestal. Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

<https://orcid.org/0009-0005-1883-3603>

<http://lattes.cnpq.br/2535369791028002>

Maria José de Holanda Leite

Doutora em Ciências Florestais. Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) – Campus Pau dos Ferros.

<https://orcid.org/0000-0003-4154-3901>

<http://lattes.cnpq.br/9553311470144119>

Alisson Henrique Silva dos Santos

Graduado em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

<https://orcid.org/0009-0002-5110-614X>

<https://lattes.cnpq.br/6024781754284107>

Ariane Leticia Arruda dos Santos

Graduanda em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

<https://orcid.org/0009-0004-6683-7409>

<http://lattes.cnpq.br/4488832901476897>

Jhonathan Gomes dos Santos

Docente da Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

<https://orcid.org/0000-0001-5463-8876>

<http://lattes.cnpq.br/6753485458193530>

Resumo

A mineração constitui uma importante base econômica do estado de Alagoas, contribuindo para o desenvolvimento regional, porém sua expansão tem provocado impactos ambientais significativos, especialmente no bioma Caatinga. A supressão da cobertura vegetal, a degradação das matas ciliares e as alterações nas calhas fluviais configuram pressões diretas sobre a estabilidade da paisagem e os processos ecológicos. Diante desse contexto, esta pesquisa teve como objetivo analisar as transformações ambientais ocorridas nas calhas fluviais do estado de Alagoas nos anos de 2001, 2011 e 2023, considerando os efeitos da mineração sobre a cobertura vegetal. A metodologia baseou-se no uso integrado de sensoriamento remoto e geoprocessamento, com imagens multitemporais de satélite e delimitação de zonas de influência de 2 km ao redor das áreas mineradas. Os resultados indicaram redução expressiva da vegetação nativa, fragmentação da mata ciliar e aumento de áreas expostas, embora tenham sido identificados processos pontuais de regeneração natural, evidenciando a resiliência parcial da Caatinga.

Palavras-chave: Geotecnologias; Caatinga; Monitoramento Ambiental.

Abstract

Mining represents an important economic base in the state of Alagoas, contributing to regional development; however, its expansion has caused significant environmental impacts, especially within the Caatinga biome. The suppression of vegetation cover, degradation of riparian forests, and alterations to river channels constitute direct pressures on landscape stability and ecological processes. In this context, this study aimed to analyze the environmental transformations occurring in river channels in the state of Alagoas in the years 2001, 2011, and 2023, considering the effects of mining on vegetation cover. The methodology was based on the integrated use of remote sensing and geoprocessing techniques, employing multitemporal satellite imagery and the delimitation of 2 km buffer zones around mined areas. The results indicated a significant reduction in native vegetation, fragmentation of riparian forests, and an increase in exposed surfaces, although localized processes of natural regeneration were identified, highlighting the partial resilience of the Caatinga biome.

Keywords: Geotechnologies; Caatinga; Environmental Monitoring.

Introdução

A mineração constitui uma das principais atividades econômicas do estado de Alagoas, contribuindo para o desenvolvimento regional, a geração de empregos e o fortalecimento da economia local (Cardozo; Pimenta; Ribeiro, 2016; IBGE, 2020). Entretanto, sua expansão tem provocado impactos ambientais expressivos, especialmente nas bacias hidrográficas inseridas no bioma Caatinga (Leal; Tabarelli; Silva, 2003). Esse ecossistema semiárido apresenta elevada singularidade ecológica, sendo caracterizado por vegetação xeromórfica, presença de formações savânicas e solos rasos, fatores que o tornam altamente vulnerável à degradação (Leal et al., 2005; Costa et al., 2009; Melo et al., 2023).

A supressão da vegetação nativa, a degradação das matas ciliares e as alterações nas calhas fluviais geram impactos cumulativos sobre os processos hidrológicos, a

biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas locais (Cerqueira et al., 2021), configurando um desafio relevante para o manejo ambiental e a sustentabilidade regional (Erthal; Erthal; Muller, 2021). Apesar da importância social, econômica e ecológica do tema, ainda persistem lacunas no entendimento das interações entre mineração, cobertura vegetal e dinâmica fluvial na Caatinga alagoana (Maia et al., 2017).

Grande parte dos estudos existentes carece de uma abordagem integrada que articule análise espaço-temporal, sensoriamento remoto e ecologia da paisagem, o que limita a avaliação da magnitude e da extensão dos impactos ambientais (Coelho et al., 2021). Nesse contexto, a presente pesquisa busca preencher essa lacuna ao empregar geotecnologias para monitorar as mudanças na cobertura vegetal e no uso e ocupação do solo, identificando padrões de degradação, regeneração e resiliência em função de variáveis ambientais e da proximidade das áreas mineradas (Cardozo; Pimenta; Ribeiro, 2016).

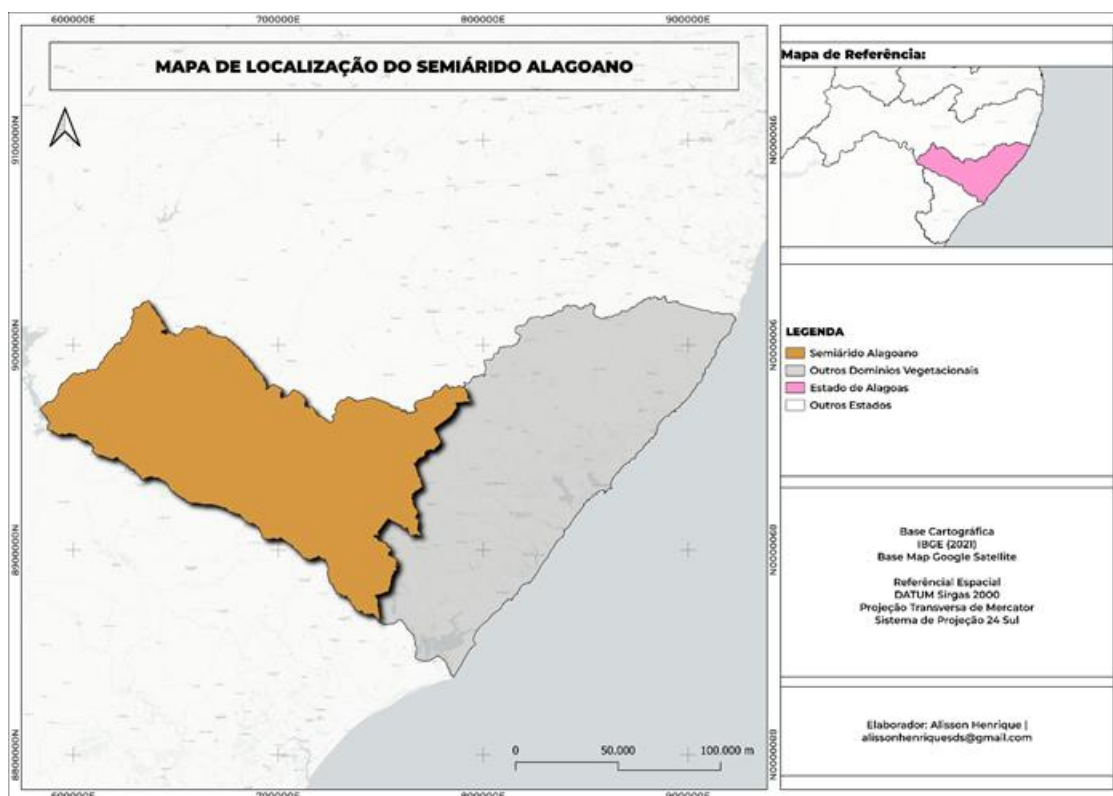
Com base na série temporal de 2019 a 2023 da Coleção 2 beta do MapBiomass, derivada de imagens Sentinel-2 com resolução espacial de 10 m, este estudo tem como objetivo avaliar a dinâmica florestal e os impactos da atividade minerária no Semiárido alagoano. Para isso, buscou-se mapear e quantificar a expansão ou retração das áreas de mineração e da vegetação nativa adjacente, analisar as taxas de perda de cobertura vegetal e identificar processos de regeneração natural ou recuperação ativa, correlacionando a dinâmica espacial observada aos condicionantes geoambientais e antrópicos da região.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido no Semiárido alagoano, região inserida no Nordeste brasileiro, caracterizada por clima do tipo BSh, segundo a classificação de Köppen (Júnior et al., 2022), e por condições de escassez hídrica que influenciam diretamente a dinâmica da cobertura vegetal. A área de estudo é apresentada na Figura 1.

As atividades foram realizadas entre agosto de 2024 e setembro de 2025, período que possibilitou a observação de variações ambientais associadas à transição entre a estação seca e o início do período chuvoso. A precipitação anual média da região é de aproximadamente 520 mm, concentrada entre os meses de novembro e abril, enquanto a temperatura média anual situa-se em torno de 25,8 °C, condições que afetam os processos de perda e regeneração da vegetação.

Figura 1 - Mapa de Localização do Semiárido Alagoano.



Fonte: Autores (2025).

O relevo é predominantemente ondulado, favorecendo a ocorrência de cursos d'água intermitentes, e os solos apresentam baixa profundidade e limitada capacidade de retenção hídrica (Silva et al., 2021), aspectos relevantes para a interpretação espacial dos impactos da atividade minerária. A área integra o bioma Caatinga, cuja vegetação apresenta adaptações à escassez hídrica, consideradas na análise da dinâmica da cobertura vegetal ao longo do período estudado.

A coleta de dados foi realizada no Semiárido Alagoano com o objetivo de avaliar os impactos da atividade minerária sobre a cobertura vegetal lenhosa, com ênfase na vegetação savânica do bioma Caatinga. A delimitação espacial dos empreendimentos minerários baseou-se na base de pontos de mineração do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A partir do conjunto original de 22 registros para o estado de Alagoas, foi aplicado um recorte espacial correspondente aos limites do Semiárido, resultando na seleção de quatro pontos ativos para análise detalhada. Esses empreendimentos foram escolhidos por representarem diferentes tipos de minério explorado (cobre e ouro), apresentarem proximidade com áreas de vegetação remanescente e possuírem disponibilidade de dados históricos.

A análise da cobertura vegetal utilizou dados do satélite Sentinel-2, processados pela Coleção de Uso e Cobertura da Terra do MapBiomas (versão beta), com resolução espacial de 10 m. Para a avaliação da dinâmica da cobertura vegetal, considerou-se o período de quatro anos. A identificação do início das operações minerárias foi realizada por meio de composições coloridas (RGB) de imagens Sentinel-2 entre 2017 e 2024, possibilitando a determinação do início das atividades em cada empreendimento.

As imagens raster foram padronizadas em uma projeção cartográfica compatível e recortadas aos limites da área de estudo. Em seguida, foram extraídas as classes de interesse — vegetação savânica (classe 4) e mineração (classe 30) — a partir das quais foram geradas máscaras binárias, atribuindo-se valores 0 (ausência) e 1 (presença). Esse procedimento permitiu a análise de sobreposição e de transições espaciais entre as classes. O pré-processamento incluiu ainda a verificação da qualidade das imagens, a remoção de pixels afetados por nuvens ou sombras e o alinhamento temporal dos dados.

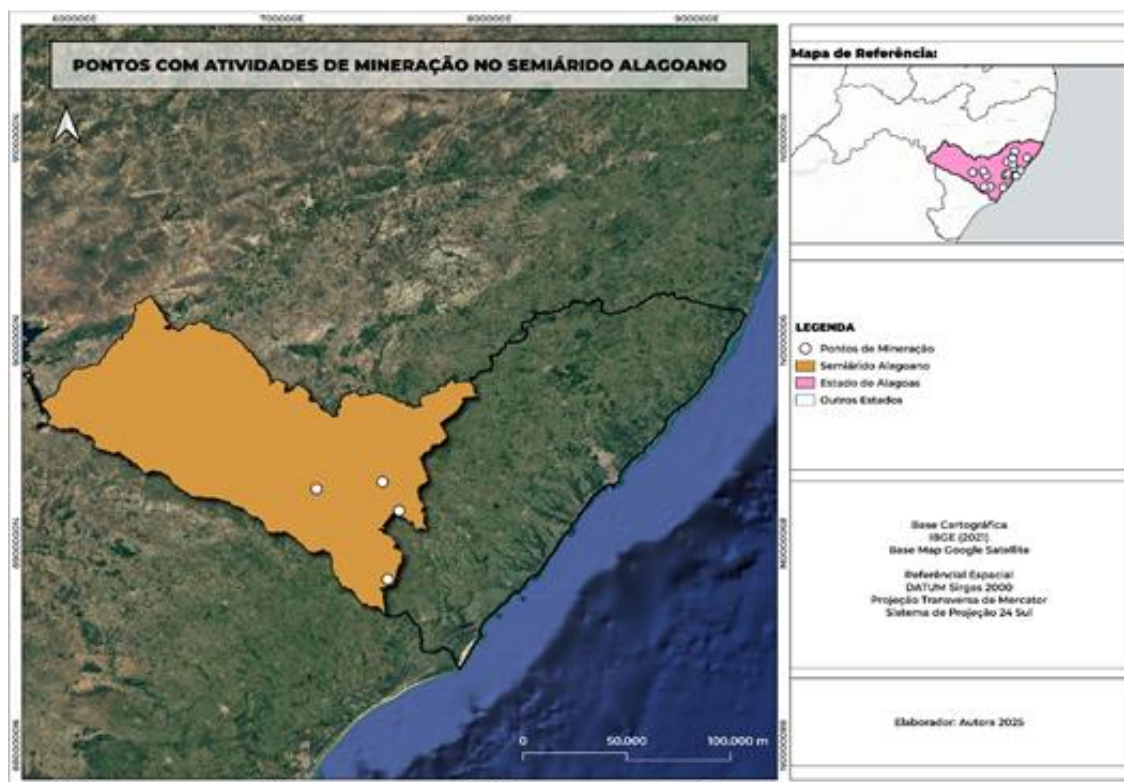
A análise espacial foi conduzida por meio de operações de álgebra de mapas, possibilitando a identificação de áreas que apresentaram transição de vegetação savânica para uso minerário. Os pixels resultantes foram vetorizados e convertidos em polígonos, permitindo a quantificação precisa da área degradada em hectares. Adicionalmente, foram elaborados mapas temáticos para representar a distribuição espacial da cobertura vegetal e das áreas mineradas, evidenciando padrões de degradação associados à proximidade dos empreendimentos.

A análise temporal permitiu avaliar a evolução da cobertura vegetal e da expansão da mineração ao longo do período analisado, relacionando o início das atividades minerárias à intensidade da perda de vegetação e à ocorrência de processos pontuais de regeneração natural. Por fim, os dados espaciais foram integrados a informações de relevo, hidrologia, solos e uso do solo, possibilitando uma interpretação mais abrangente dos impactos ambientais e fornecendo subsídios para o planejamento ambiental e o manejo sustentável em áreas impactadas pela mineração.

Resultados e Discussão

A partir da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), identificaram-se 22 pontos vetoriais referentes a atividades minerárias em operação no estado de Alagoas. Após a aplicação do recorte espacial correspondente à delimitação do Semiárido Alagoano, constatou-se que apenas quatro desses empreendimentos se situam dentro da área de estudo (Figura 2).

Figura 2 – Atividades de Mineração no Semiárido alagoano.



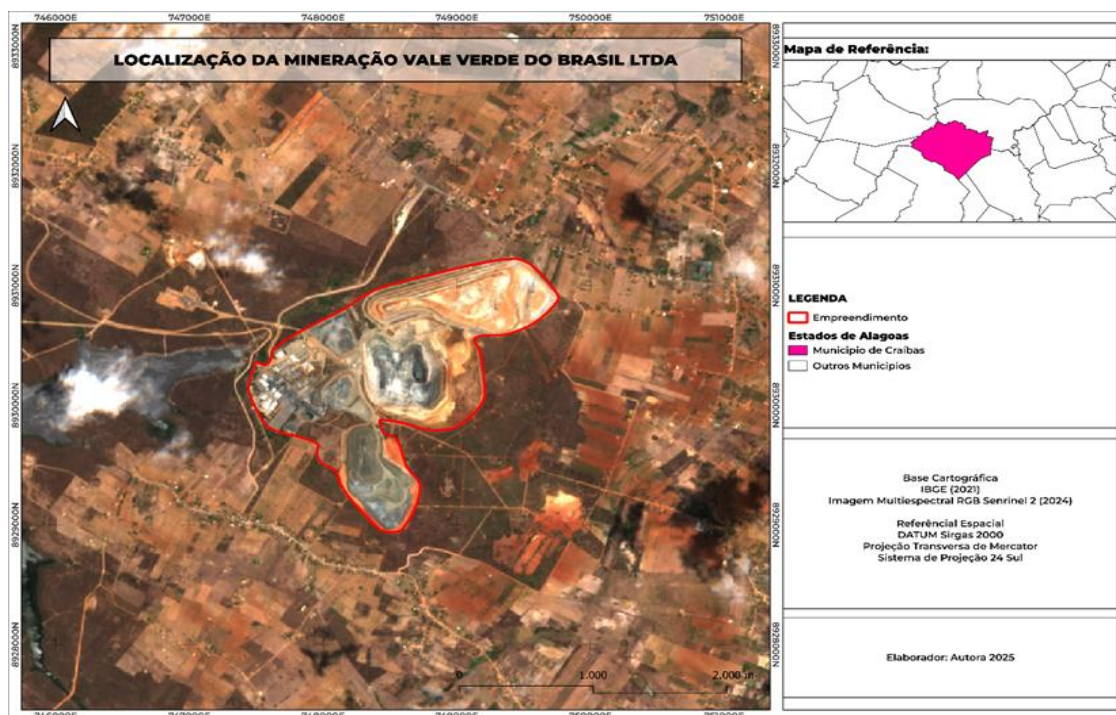
Fonte: Autores (2025).

Uma possível explicação para a distribuição observada na Figura 2, é que a maior parte das atividades minerárias do estado de Alagoas concentra-se fora do Semiárido Alagoano, provavelmente em áreas com maior ocorrência de depósitos minerais economicamente exploráveis, acesso a infraestrutura e condições geológicas favoráveis, o que pode refletir uma heterogeneidade na exploração mineral e indicar que o impacto da mineração no Semiárido Alagoano é relativamente restrito em termos de número de pontos, mas ainda relevante para avaliação ambiental local, especialmente considerando os possíveis efeitos sobre a cobertura vegetal, a hidrologia e os ecossistemas associados à Caatinga.

A distribuição espacial da mineração em Alagoas, conforme ilustrado na Figura 2, não é homogênea, com uma nítida concentração de empreendimentos fora dos limites do Semiárido. Essa concentração pode ser atribuída a fatores logísticos, econômicos e geológicos. Um caso emblemático é o Projeto Caboclo, analisado por Santos Filho (2021), um projeto de mineração de cobre de grande porte situado no Agreste alagoano, região com características distintas do Sertão semiárido. A análise do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) revela uma lista extensa de impactos potenciais, incluindo supressão de vegetação nativa, alteração na dinâmica hídrica e riscos de contaminação do solo e da água. Este caso demonstra que, embora o número de pontos de mineração no Semiárido possa ser menor, a atividade, onde presente – seja no Semiárido ou em regiões de transição como o Agreste –, gera impactos ambientais profundos que demandam uma rigorosa avaliação e fiscalização, particularmente em ecossistemas sensíveis como a Caatinga e suas áreas de transição.

Dentre esses quatro pontos, a análise temporal de 2020 a 2023 por meio das classificações do MapBiomass e a inspeção visual das imagens Sentinel-2 permitiu identificar que apenas um apresentou uma assinatura espacial clara e progressiva de impacto da atividade minerária sobre a cobertura de vegetação savânica. O empreendimento identificado foi operado pela empresa Mineração Vale Verde do Brasil Ltda., localizada no município de Craíbas em Alagoas (Figura 3).

Figura 3 – Localização da Mineração Vale Verde do Brasil Ltda.



Fonte: Autores (2025).

Os outros três pontos minerários, referentes à Cerâmica Arapiraca Ltda., Mineração Barreto S.A. e Taicoca Mineração Transporte Ltda., não manifestaram, no período analisado, uma substituição de cobertura vegetal pela classe de mineração (classe 30) que pudesse ser detectada pela metodologia empregada (Figura 4).

Este resultado indica uma discrepância entre o registro cadastral e a manifestação fisionômico-espacial da atividade. O que pode ser explicado pelo fato de que, embora existam quatro empreendimentos minerários na área de estudo, apenas um deles apresenta evidências claras de alteração da cobertura vegetal savânica entre 2020 e 2023. Isso pode estar relacionado à intensidade e à extensão da atividade minerária, já que os outros três empreendimentos podem operar em menor escala, causando impactos localizados que não são facilmente detectáveis pelas imagens de satélite ou pelas classificações do MapBiomass.

Estudos de caso em áreas de mineração demonstram que mesmo intervenções de restauração podem resultar em uma cobertura vegetal com baixa similaridade fisionômica e florística em relação ao ecossistema original (Gonzalo *et al.*, 2015). Assim, áreas em que pode ser registrada como "vegetação" por sensores remotos, acabam mascarando o impacto subjacente. Logo, a presença de espécies pioneiras e exóticas, comum nesses cenários, forma uma cobertura verde que, embora detectável, difere significativamente da vegetação savânica nativa.

Outra explicação possível é o tempo de operação dos empreendimentos. É provável que alguns deles tenham iniciado suas atividades recentemente ou estejam em fase de planejamento, sem provocar alterações significativas na vegetação até o momento da análise. Além disso, as características da vegetação savânica podem contribuir para a menor detecção de impactos. Essa vegetação apresenta certa resiliência e capacidade de regeneração rápida, o que pode mascarar alterações temporárias em algumas áreas.

Por fim, limitações do sensoriamento remoto também podem influenciar os resultados, tendo em vista que pequenas alterações ou atividades subterrâneas podem não ser captadas pelas imagens de satélite, de modo que apenas impactos mais evidentes e extensos, como os observados no empreendimento da Mineração Vale Verde, sejam detectáveis. A ausência de sinais claros de atividade minerária nos demais empreendimentos do Semiárido Alagoano pode ser explicada por diferentes fatores.

Primeiramente, a escala e a intensidade das operações podem ser insuficientes para produzir alterações detectáveis por sensoriamento remoto. Além disso, a natureza da atividade mineral em alguns pontos pode não implicar na remoção significativa da

cobertura do solo, como ocorre em minerações a céu aberto, ou ainda os empreendimentos podem ter se encontrado em fase de planejamento ou licenciamento, sem início efetivo da extração durante o período analisado.

Essa observação é consistente com estudos anteriores, que indicam que pequenas operações ou atividades subterrâneas em regiões de cerrado e savana frequentemente passam despercebidas em séries temporais de imagens de satélite (Silva *et al.*, 2019).

Figura 4 – Detecção da atividade de mineração de 2020 a 2021.

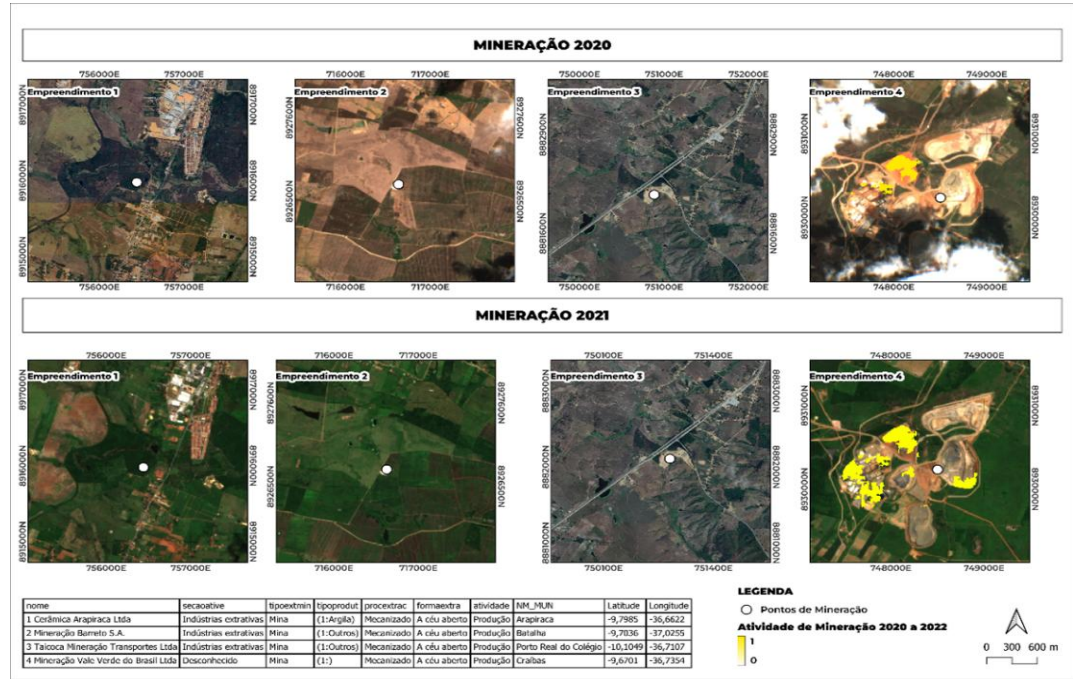
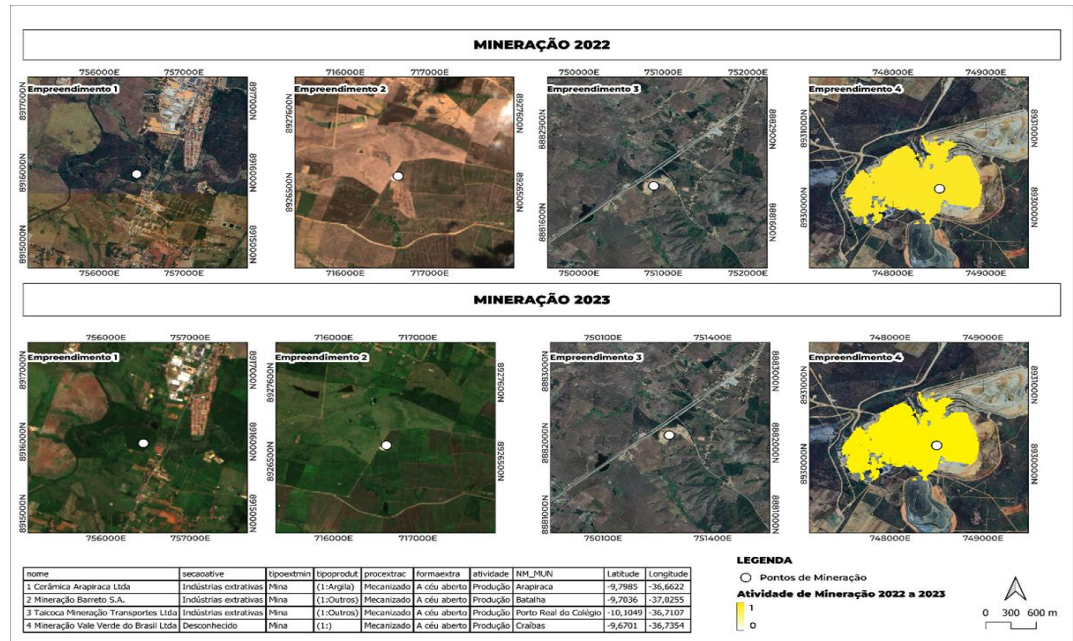


Figura 5 - Detecção da atividade de mineração de 2022 a 2023.



A ausência de sinais claros de atividade minerária nos demais empreendimento do Semiárido Alagoano pode ser explicada por diferentes fatores.

Primeiramente, a escala e a intensidade das operações podem ser insuficientes para produzir alterações detectáveis por sensoriamento remoto. Além disso, a natureza da atividade mineral em alguns pontos pode não implicar na remoção significativa da cobertura do solo, como ocorre em minerações a céu aberto, ou ainda os empreendimentos podem ter se encontrado em fase de planejamento ou licenciamento, sem início efetivo da extração durante o período analisado.

Essa observação é consistente com estudos anteriores, que indicam que pequenas operações ou atividades subterrâneas em regiões de cerrado e savana frequentemente passam despercebidas em séries temporais de imagens de satélite (Silva *et al.*, 2019).

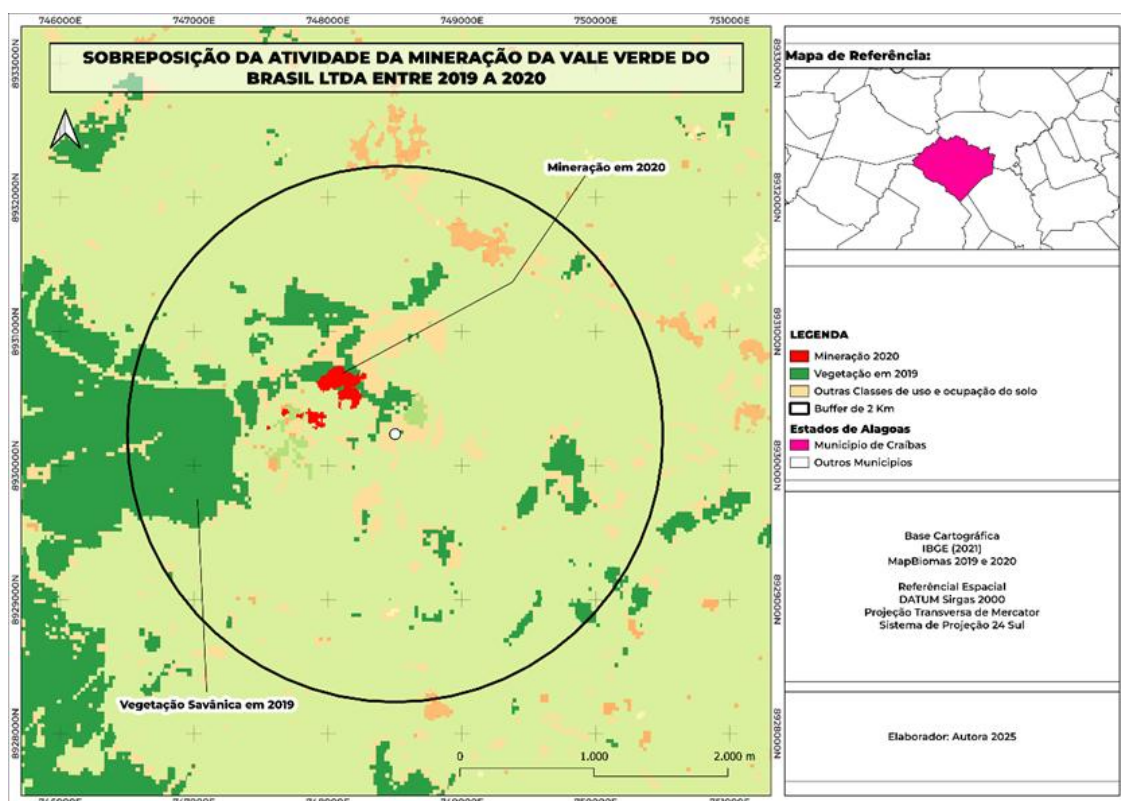
A análise da dinâmica do uso do solo no entorno do empreendimento minerário, entre 2019 e 2020, revela um cenário inicial de impacto seletivo. O ano de 2019 serve como linha de base, com a ausência de mineração detectada e uma cobertura de vegetação savânica de 154,21 hectares no raio de influência de 2 km. Em 2020, com o início das operações, a classe de mineração foi identificada em 7,68 hectares.

Paralelamente, a área de savana foi reduzida para 137,94 ha, indicando uma perda de 16,27 hectares no período. Embora se trate de um impacto inicial e quantitativamente distinto de grandes desastres, é crucial monitorar tais alterações, uma vez que atividades extrativistas, mesmo em estágio embrionário, podem evoluir para cenários de alto impacto socioambiental, a exemplo do deslocamento forçado de milhares de pessoas verificado em Maceió-AL devido à mineração de sal-gema (Teles, 2023).

A comparação direta entre o crescimento da área minerada e o declínio da savana sugere, contudo, uma sobreposição espacial limitada. Isto implica que a implantação da mina, em seu primeiro ano, ocupou predominantemente áreas já antropizadas ou de outras classes de uso do solo, resultando em um impacto relativo menor sobre a vegetação nativa savânica em comparação com outros vetores de desmatamento atuantes na região. Esta análise ressalta a importância de se investigar os demais agentes de mudança no território para uma compreensão abrangente da perda de cobertura vegetal (Figura 6).

A figura mostra claramente através do ponto central e um raio com um buffer de 2km a interação entre as classes de uso e ocupação do solo. É possível observar que a classe de mineração possui um impacto menos relevante em comparação com as outras classes.

Figura 6 - Sobreposição espacial menos impactante em comparação com outras classes de uso do solo.



Fonte: Autores (2025).

Vale ressaltar que, o empreendimento da Mineração Vale Verde do Brasil Ltda., localizado em Craíbas, destacou-se como o único caso com evidência clara de conversão direta de vegetação savânica em área minerada durante o período de 2020 a 2023. O que evidencia que, mesmo em regiões com baixa densidade de empreendimentos minerários, o sensoriamento remoto aliado à análise temporal é capaz de identificar impactos ambientais significativos, permitindo monitorar a perda de vegetação nativa e subsidiar estratégias de conservação e gestão sustentável. O caso da Mineração Vale Verde serve, portanto, como referência para compreender a dinâmica de degradação em ecossistemas savânicos do Semiárido Alagoano, destacando a importância de abordagens quantitativas e contínuas na avaliação de impactos minerários.

Esta afirmação fundamenta-se na diferença observada na classe de vegetação savânica entre 2019 (154,21 ha) e 2020 (137,94 ha), que registrou uma perda total de 16,27 hectares. Deste total, a atividade de mineração foi responsável por uma perda de 4,95 hectares de vegetação savânica.

Os resultados indicam que a implantação inicial da atividade minerária em 2020 não representou o principal vetor de supressão da cobertura vegetal no período, sendo responsável por aproximadamente 30% da perda total de vegetação savânica. A supressão vegetal para instalação da mina ocorreu predominantemente em áreas já convertidas para outras classes de uso do solo, e a análise para o período de 2019 a 2020 registrou uma perda líquida de 16,27 hectares de vegetação savânica. Deste total, a mineração foi identificada como o agente direto em 4,95 hectares, enquanto os 11,32 hectares remanescentes foram atribuídos a outras pressões antrópicas, como a expansão agropecuária.

Entretanto, a interpretação desses dados deve considerar a limitação da escala temporal investigada. A perda aparentemente pontual e de magnitude relativamente baixa, quando observada em uma janela de apenas um ano, pode mascarar a dinâmica de degradação em escalas decadais. A implantação de um empreendimento de mineração gera impactos indiretos e prolongados que transcendem os limites do seu platô operacional.

A abertura de estradas, o aumento do fluxo de pessoas e veículos, e as alterações no lençol freático e na paisagem funcionam como catalisadores para a degradação do entorno. Desta forma, é plausível hipotetizar que, em um período de 10, 20 ou 40 anos, o cenário de perda de vegetação nativa seria drasticamente diferente e amplificado, com a mineração exercendo um papel central, ainda que indireto, na aceleração do processo de desertificação característico do Semiárido. Portanto, os 4,95 hectares de supressão direta representam apenas a fração inicial e mais visível de um impacto socioambiental de longo alcance.

Discute-se que as transições mais prováveis para outras classes de uso e ocupação do solo, como pastagem (classe 15) ou área não vegetada (classe 25), constituem os fatores preponderantes para esta dinâmica de desmatamento. Este achado ressalta a importância de considerar o contexto multifatorial da paisagem, onde pressões indiretas de diversos vetores de degradação, e não apenas a mineração, atuam sinergicamente na redução da cobertura vegetal do bioma Caatinga.

A análise da cobertura savânica entre 2019 e 2023 revela uma dinâmica complexa: partindo de 154,21 ha (2019), houve uma contração para 137,94 ha (2020), seguida por uma expressiva expansão nos anos posteriores, alcançando 187,76 ha (2021) e 258,57 ha (2023). Apesar da nítida trajetória de crescimento quantitativo, é prematuro atribuí-la exclusivamente à resiliência ecossistêmica. A janela temporal analisada é curta para

descartar a influência de variáveis climáticas interanuais, característica marcante do Semiárido.

A época de captura das imagens de satélite é um fator crítico: se a imagem de 2020 foi obtida em um período de estiagem e as de 2021 e 2023 em estações chuvosas, o aumento observado pode refletir, em parte, uma resposta fenológica passageira da vegetação à disponibilidade hídrica, e não necessariamente um incremento permanente na biomassa ou na complexidade estrutural do ecossistema. Portanto, os dados apontam para uma recuperação da área de cobertura savânica, mas a confirmação de que se trata de uma resiliência consolidada e não de uma flutuação sazonal depende da ampliação do período de monitoramento e da validação em campo.

Paralelamente, a mineração expandiu-se aceleradamente a partir de 2020, ocupando 7,68 hectares inicialmente e alcançando 95,6 hectares em 2023. O crescimento mais expressivo ocorreu entre 2021-2022, com expansão de 74,04 hectares.

A análise integrada demonstra expansão simultânea de ambos os usos do solo a partir de 2021. A vegetação savânica cresceu 120,63 hectares enquanto a mineração ocupou 87,92 hectares no período. Esta dinâmica indica processos complexos de regeneração natural e substituição espacial na paisagem (Tabela 1).

Tabela 1 - Expansão simultânea de ambos os usos do solo a partir de 2021.

Ano	Vegetação Savânica (ha)	Mineração (ha)	Taxa Crescimento Vegetação (%)
2019	154,21	0,00	-
2020	137,94	7,68	-10,5
2021	187,76	21,36	+36,1
2022	236,97	95,40	+26,2
2023	258,57	95,60	+9,1

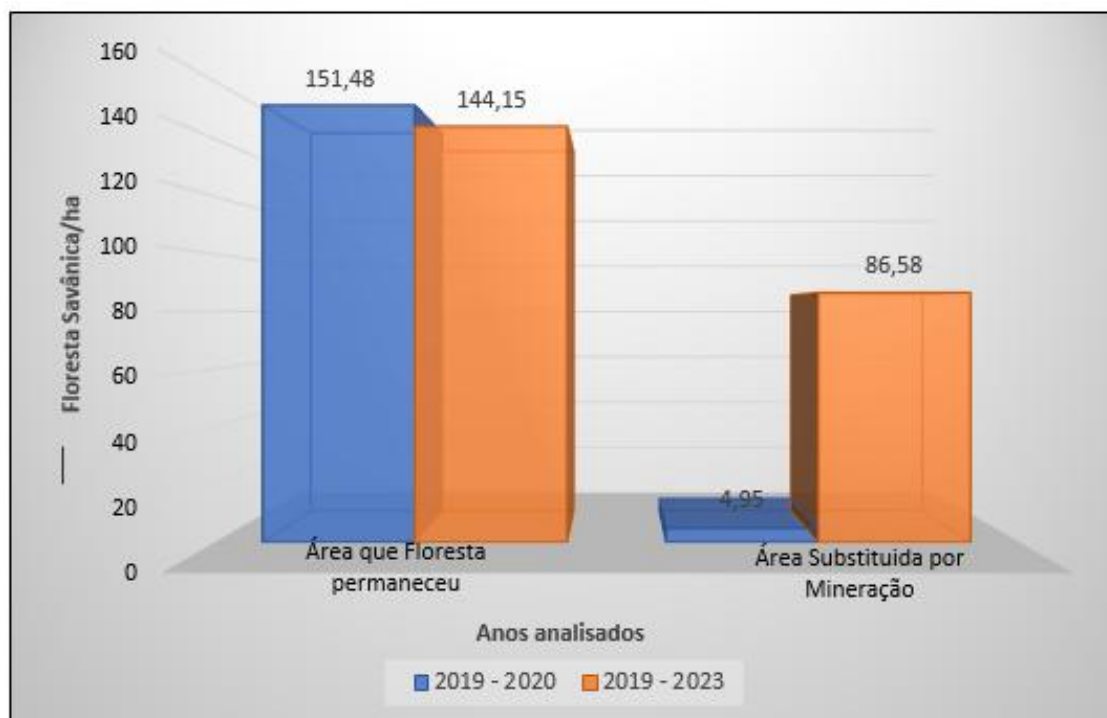
Fonte: Autores (2025).

A área de floresta mantida estável entre 2019-2020 totalizou 151,48 hectares, com redução para 144,15 hectares no período 2019-2023. Esta diminuição de 7,33 hectares evidencia processo substitutivo progressivo da cobertura vegetal nativa, enquanto a mineração apresentou padrão expansionista contínuo durante o quadriênio analisado.

A transição direta para mineração registrou 4,95 hectares no período inicial (2019-2020), elevando-se para 86,58 hectares em 2019-2023. Os resultados demonstram que 56,2% da cobertura vegetal original foi convertida diretamente para mineração em quatro anos (Figura 7). A persistência de 144,15 hectares de floresta estabilizada indica resiliência ecossistêmica nas áreas não impactadas, consolidando a atividade mineral

como um vetor de transformação antrópica da paisagem uma vez que na área de estudo outras classes de uso solo também se mostraram relevante para a perda de floresta nativa.

Figura 7 – Redução de Floresta no período 2019-2023.



Fonte: Autores (2025).

Conclusão

A análise da dinâmica florestal em áreas de mineração no Semiárido Alagoano, com foco no empreendimento da Mineração Vale Verde do Brasil Ltda., permitiu concluir que a atividade minerária atua como um vetor significativo de transformação da paisagem, embora não seja o único agente responsável pela supressão da cobertura vegetal nativa.

Os resultados demonstraram que, no período de 2019 a 2023, a mineração foi responsável pela conversão direta de 86,58 hectares de vegetação savânica, representando 56,2% da cobertura original na área de influência do empreendimento. Contudo, a análise interanual revelou que, no início das operações (2019-2020), a mineração respondeu por apenas 30% da perda total de vegetação, indicando a atuação de outros fatores antrópicos, como a conversão para pastagem e áreas não vegetadas.

Paradoxalmente, observou-se uma notável resiliência da vegetação savânica, que apresentou recuperação expressiva a partir de 2021, atingindo 258,57 hectares em 2023 – um aumento de 87% em relação a 2020. Esse fenômeno sugere a ocorrência de

processos de regeneração natural em áreas adjacentes não diretamente impactadas pela mineração, ainda que em um contexto de expansão simultânea da fronteira mineral.

A metodologia empregada – baseada em sensoriamento remoto, classificação do MapBiomas e álgebra de mapas – mostrou-se eficaz para quantificar e espacializar as transições de uso do solo, permitindo identificar com precisão as áreas de perda florestal e a expansão da mineração. No entanto, a ausência de sinais claros de supressão vegetal em outros três pontos minerários cadastrados pelo IBGE evidencia a necessidade de aprimorar os métodos de detecção e validação em campo, considerando a variabilidade de escalas e tipos de exploração mineral.

Conclui-se, portanto, que a mineração no Semiárido Alagoano, representada pelo caso da Vale Verde, exerce pressão substantiva sobre a cobertura da Caatinga, mas atua em conjunto com outras dinâmicas de uso da terra. A recuperação vegetal observada em parte da área sinaliza a potencialidade de resiliência do bioma, desde que sejam implementadas políticas de gestão territorial integradas e ações de recuperação de áreas degradadas, visando à conciliação entre o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental no semiárido.

Referências

- ALBUQUERQUE, U. P. de et al. Caatinga revisited: ecology and conservation of an important seasonal dry forest. *The Scientific World Journal*, v. 21, n. 5, p. 1–18, 2012.
- ALVES, M.; SOL, N. A. A.; MODENA, C. M. Territory and deterritorialization: the social suffering by environmental disaster resulting from the breaking of mining dams. *Saúde em Debate*, v. 44, n. esp. 2, p. 262–271, 2020.
- ALVES, P. H. C. S.; LIMA, E. S.; VELOSO, G. A. Dinâmica do desmatamento na terra indígena Apyterewa mediante a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 80, n. 1, p. 114–128, 2022.
- CARDOSO, D. P. et al. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 6, p. 632–638, 2012.
- CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; RIBEIRO, R. D. R. Sensoriamento remoto aplicado na detecção de áreas degradadas pela mineração no sul do Brasil entre 1985–2011. *Tecno-Lógica*, v. 20, n. 2, p. 97, 2016.
- CAVINATO, N. R.; CAPITANI, D. H. Eficiência social das cooperativas de crédito rural no Brasil: uma análise sob a ótica regional. *Economia e Sociedade*, v. 32, n. 2, p. 429–455, 2023.

CERQUEIRA, M. A. et al. Análise temporal por sensoriamento remoto da supressão de vegetação nativa em vales na cidade de Maceió, Brasil. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2021.

COELHO, M. S. et al. Sensoriamento remoto aplicado em área de Caatinga como subsídio para conservação da biodiversidade. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 5, p. 159–166, 2021.

CORRÊA, R. S. et al. Vegetation cover development resulting from different restoration approaches of exploited mines. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n. 4, p. 1–9, 2018.

COSTA, T. C. C. da et al. Análise da degradação da Caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, supl., p. 961–974, 2009.

EMBRAPA. *Mimosa caesalpiniiifolia: sabiá*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1103458/mimosa-caesalpiniiifolia-sabia>. Acesso em: 15 out. 2025.

ERTHAL, E. S.; ERTHAL, G. M. S.; MULLER, G. A. Avaliação da supressão da vegetação nativa no município de Condor, Rio Grande do Sul. *Tecno-Lógica*, v. 25, n. 2, p. 201–208, 2021.

EUCLYDES, F. M. et al. Capacidades estatais e mineração: uma análise da agência nacional de regulação. *Revista de Administração Pública*, v. 56, n. 1, p. 163–175, 2022.

GONÇALVES, T. S. Caracterização dos estágios de sucessão ecológica em fragmentos de floresta estacional decidual na região do Parque Nacional da Serra do Cipó. *Multi-Science Research*, v. 5, n. 1, p. 76–84, 2022.

GONZALO, J. R.; PEREIRA, E. Avaliação de área recuperada sobre cava de areia em São Paulo, SP, Brasil. *Hoehnea*, v. 42, n. 4, p. 695–701, 2015.

GOODCHILD, M. F. Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 1, n. 1, p. 1037–1043, 2009.

HAMADA, E. Sistema de informações geográficas. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica>. Acesso em: 2 set. 2025.

IBGE. *Anuário estatístico do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 set. 2025.

IEA. *The role of critical minerals in clean energy transitions*. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 6 out. 2025.

JACOBI, P. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. *Cadernos de Pesquisa*, n. 118, p. 189–206, 2003.

LEAL, I. R. et al. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. *Mega Diversidade*, v. 1, p. 140–146, 2005.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. da. *Ecologia e conservação da Caatinga*. Recife: UFPE, 2023.

CAPÍTULO 4

MARCOS LEGAIS E A DINÂMICA DA COLETA SELETIVA NA GESTÃO DE RESÍDUOS NO BRASIL

LEGAL FRAMEWORKS AND THE DYNAMICS OF SELECTIVE WASTE COLLECTION IN BRAZILIAN WASTE MANAGEMENT

DOI: <https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.04>

Submetido em: 03/02/2026

Revisado em: 12/02/2026

Publicado em: 20/02/2026

Graziela Pinto de Freitas

Doutora. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

<https://orcid.org/0000-0002-9447-3743>

<http://lattes.cnpq.br/3719940766066129>

Maria José de Holanda Leite

Doutora em Ciências Florestais. Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) – Campus Pau dos Ferros.

<https://orcid.org/0000-0003-4154-3901>

<http://lattes.cnpq.br/9553311470144119>

Ana Cecília Novaes de Sá

Doutora. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

<https://orcid.org/0000-0002-4939-8844>

<http://lattes.cnpq.br/4565532080624116>

Gracielle Ferreira de Souza

Mestra. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

<https://orcid.org/0000-0001-6634-5018>

<http://lattes.cnpq.br/0414869464759003>

Ana Soraya Santos

Mestranda em Saúde Pública na Universidade Federal do Ceará/ UFC

Professora Universitária, Supervisora Escolar da Prefeitura Municipal de Fortaleza

<https://orcid.org/0009-0009-7631-7577>

<http://lattes.cnpq.br/3478729727541310>

Denise Maria Santos

Doutora em Geociências. Instituto Dom José de Educação e Cultura, vinculado a

Universidade Estadual Vale do Acaraú IDJ/UVA.

<https://orcid.org/0000-0001-8886-6439>

<http://lattes.cnpq.br/5971649947403143>

Natanael Batista Pereira Alves

Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFPE)

<https://orcid.org/0000-0002-9345-5535>

<http://lattes.cnpq.br/7161934382023076>

Resumo

O gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil, com foco nos marcos regulatórios e no potencial da economia circular. A discussão central baseia-se na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), que estabelecem diretrizes para a responsabilidade compartilhada e a erradicação de lixões. Vale destacar que, os resíduos sólidos orgânicos (RSO) representam mais de 40% do volume coletado no país. A destinação inadequada desses materiais em aterros é apontada como um problema ambiental crítico devido à emissão de gás metano. Como alternativa sustentável, propõe-se o aproveitamento energético da biomassa por meio da digestão anaeróbia em biodigestores, processo que converte matéria orgânica em biogás e biofertilizantes, diversificando a matriz energética. Quanto à operacionalização, o estudo examinou a dinâmica da coleta seletiva, identificando modelos como o porta a porta, os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) e a atuação de catadores. Conclui-se que, apesar do robusto arcabouço legal, a efetivação dessas práticas ainda enfrenta barreiras estruturais, exigindo maior integração entre tecnologia de tratamento e logística de recolha para alcançar as metas de sustentabilidade urbana.

Palavras-chave: Economia Circular. Biogás. Meio Ambiente.

Abstract

Solid waste management in Brazil, focusing on regulatory frameworks and the potential of the circular economy. The central discussion is based on the National Solid Waste Policy (Law No. 12,305/2010) and the National Solid Waste Plan (PLANARES), which establish guidelines for shared responsibility and the eradication of open dumps. Notably, organic solid waste (OSW) represents more than 40% of the volume collected in the country. The inadequate disposal of these materials in landfills is identified as a critical environmental issue due to methane gas emissions. As a sustainable alternative, the study proposes the energetic use of biomass through anaerobic digestion in biodigesters, a process that converts organic matter into biogas and biofertilizers, diversifying the energy matrix. Regarding operationalization, the study examined the dynamics of selective collection, identifying models such as door-to-door, Voluntary Delivery Points (PEVs), and the work of waste pickers. It concludes that, despite the robust legal framework, the effectiveness of these practices still faces structural barriers, requiring greater integration between treatment technology and collection logistics to achieve urban sustainability goals.

Keywords: Circular Economy. Biogas. Environment.

Introdução

O gerenciamento dos resíduos sólidos (RS) consolidou-se como um dos maiores desafios das sociedades contemporâneas, sendo um pilar fundamental para a promoção do desenvolvimento sustentável e da transição para uma economia circular. Este cenário exige uma gestão que não seja apenas operacional, mas estratégica, fundamentada nos preceitos do *triple bottom line*, onde o equilíbrio entre a viabilidade econômica, a equidade social e a preservação ambiental é a premissa básica para qualquer política pública (Costa; Melo; Beltrame, 2016).

No contexto brasileiro, a problemática do descarte inadequado e da pressão sobre os recursos naturais ganhou robustez jurídica com a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei nº 12.305/2010). Este marco legal introduziu conceitos modernos como a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa. Posteriormente, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) veio reforçar este compromisso, estabelecendo metas ambiciosas para a eliminação definitiva de lixões e o incentivo à recuperação de materiais recicláveis, alinhando o país às metas globais de sustentabilidade (Brasil, 2010; Planares, 2023). A eficácia dessas normas, contudo, depende diretamente da estruturação da coleta seletiva e da compreensão da periculosidade dos resíduos gerados no cotidiano urbano.

Assim, o presente trabalho buscou apresentar o potencial energético da biomassa oriunda de resíduos orgânicos e descrever os principais modelos de biodigestores (Indiano, Chinês e Canadense) como ferramentas de inovação tecnológica

Metodologia e Desenvolvimento

A metodologia deste estudo consistiu em um levantamento bibliográfico e documental, com caráter exploratório e descritivo. Foram consultadas legislações nacionais (PNRS), planos governamentais (PLANARES) e normas técnicas (ABNT), além de literatura acadêmica especializada, permitindo uma análise qualitativa sobre os processos de gestão.

- **Resíduos sólidos**

Resíduos sólidos (RS) caracterizam-se como sendo subprodutos provenientes das atividades humanas, que possuem qualquer processo tecnológico de aproveitamento economicamente viável, permitindo a sua utilização na fabricação de novos produtos e até mesmo na produção de energia. No entanto, quando destinados a locais inadequados, são considerados um dos principais problemas ambientais da atualidade (Santos *et al.* 2020).

No Brasil, o principal marco regulatório sobre os RS, foi a aprovação da Lei nº 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que representa um grande avanço na área, determinando a responsabilidade compartilhada da sociedade civil, iniciativa privada e poder público em relação às possíveis soluções referentes aos impactos negativos provenientes da geração de RS. A referida Lei está regulamentada pelo Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.

No artigo 3º inciso XVI da PNRS (2010), pode-se observar o conceito de RS como sendo:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (Brasil, 2010)

Os RS também podem ser classificados, segundo as suas propriedades, podendo esta ser relevante no momento da escolha da estratégia de gerenciamento que mais se adeque a determinado cenário. A norma NBR 10.004 (2004), define a classificação de RS quanto a sua periculosidade, em decorrência de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podendo apresentar situação adversa na saúde pública e ao meio ambiente. Segundo NBR 10.004 de 2004 os RS podem ser enquadrados nas seguintes classes:

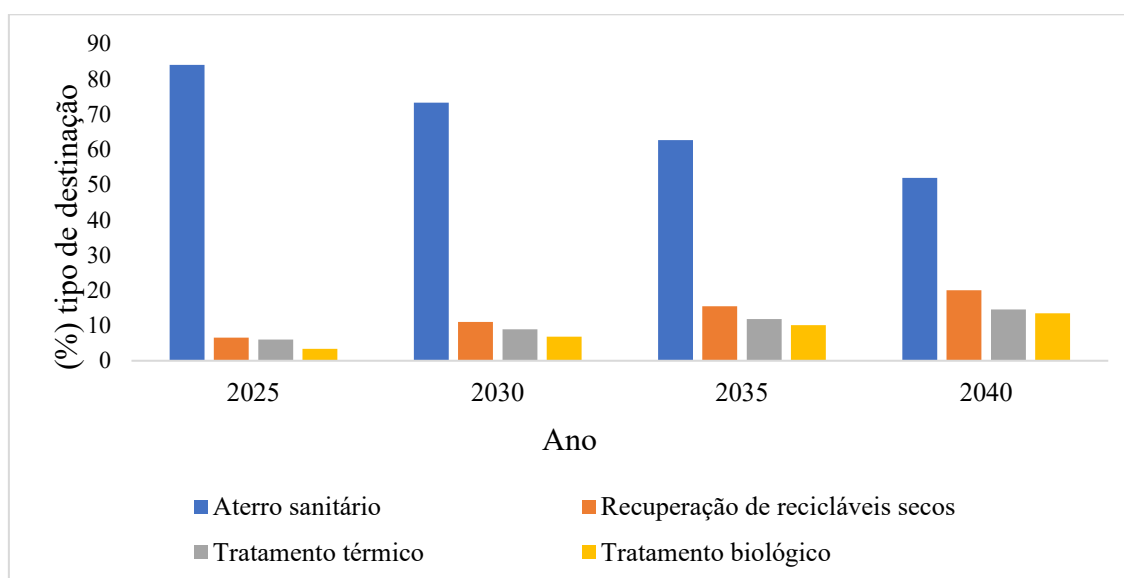
- **CLASSE I:** são os resíduos considerados perigosos, os RS que em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, podem ocasionar risco à saúde pública, incidência de doenças, e impactos negativos ao meio ambiente.

- CLASSE II A: também conhecidos como não inertes, e apresentam propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Estes resíduos podem acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente.
- CLASSE II B: são os RS, não oferecem riscos à saúde ou ao meio ambiente, pois apresentam características que quando em contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Com relação a geração de RS o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES (2023), afirma que durante o ano de 2022, gerou-se aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos no Brasil, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. O Plano mencionado aponta que as razões podem estar relacionadas às novas dinâmicas sociais, com a retomada da produção de resíduos no local onde foram gerados, com a menor utilização de *delivery* em decorrência do isolamento social ocorrido entre os anos de 2020 e 2021.

O PLANARES, instituído pelo Decreto Federal nº 11.043/2022, traz as diretrizes, metas, estratégias e ações voltadas para melhorias no processo de gestão de RS no Brasil de forma a colocar em prática as destinações adequadas dos resíduos (Figura 1).

Figura 1. Metas do Planares por tipo de destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos.



Fonte: PLANARES (2023).

Os RS quando não gerenciados e destinados a locais inadequados, ou seja, em desacordo com as normas ambientais, podem ser apontados como um dos principais causadores dos impactos negativos enfrentados pela sociedade, no entanto, quando tratados, apresentam vantagens econômicas com reflexo na questão sanitária, e na produção de energia com o aproveitamento do biogás (Silva *et al.* 2020).

Essa prática diminui o volume de resíduos que são encaminhados para os aterros sanitários e, conseqüentemente, aumentam a vida útil destes, assim como reduz custo para o serviço público de limpeza urbana. Reaproveitamento de resíduos segue preceitos do *triple bottom line* do desenvolvimento sustentável, que é a busca por desempenho ambiental, social e econômico e que atuam como premissas fundamentais na instituição de políticas públicas (Costa; Melo; Beltrame, 2016).

Silva *et al.* (2020) explicam que uma das formas de minimizar impactos negativos decorrentes da produção elevada de RS é através do aproveitamento energético, proveniente do tratamento da fração orgânica dos RS. A substituição de combustíveis fósseis por RS na produção de energia, surgiu como uma alternativa de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e aumentar o uso de fontes de energias renováveis, prática que já vem sendo utilizada em vários países.

Vale destacar que o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE 2030) mostra o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos (RSO) como uma solução viável do ponto de vista ambiental e econômico, contribuindo com a expansão da oferta energética de energia alternativa até 2030 (Brasil, 2010).

- **Resíduos sólidos orgânicos**

Os resíduos sólidos orgânicos (RSO) são constituídos por restos de alimentos, podas e outros putrescíveis e representam mais de 40% da fração de RS urbanos coletados (Fernando; Lima, 2012; Brasil, 2020). Mesmo em cidades com maior grau de industrialização, o índice de geração de RSO pode atingir percentuais superiores à 57% (Zago; Barros, 2019).

O custo do sistema de coleta e destinação destes resíduos, em sua maioria, não é recuperado. Além disso, nos aterros, o RSO emite gás metano para a atmosfera, contribuindo para a emissão dos GEE. Caso estes resíduos orgânicos sejam tratados e valorizados por meio da digestão anaeróbia (DA) ou compostagem, tais emissões poderiam ser reduzidas. Vale ressaltar, que os RO podem gerar biogás e biofertilizantes,

especialmente, se produzidos com material de fontes selecionadas (Abarca; Maas; Hogland, 2013; Zambon, 2018).

Devido à elevada quantidade de RSO gerados, a União Europeia definiu, algumas ações voltadas à redução da geração destes resíduos, dentre estas, disseminar as melhores práticas de gestão e tratamento dos resíduos alimentares (European Commission, 2015).

No Brasil, a PNRS, através da Lei nº 12.305/2010 previu, no art. 36, inciso V, a necessidade de implantação, pelos titulares dos serviços, “de sistemas de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articulação com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido” (Brasil, p.14, 2010). Desta forma, entende-se que aproveitamento da fração orgânica dos resíduos, assim como a implantação da coleta seletiva e da disposição final ambientalmente adequada dos resíduos, faz parte das obrigações dos municípios instituída pela referida Lei. Esta Lei também responsabiliza os cidadãos e governantes sobre a prevenção e a redução na geração de RSO, manuseio, tratamento e disposição adequada.

Em se tratando do tratamento dos RSO, atualmente já se tem desenvolvido várias tecnologias voltadas a utilização de resíduos sólidos orgânicos para fontes alternativas de energia. Uma delas é a digestão anaeróbia, visto que as características do RO é quem vai informar a escolha do melhor método.

Os resíduos apresentam características variadas, a exemplo do pH, podendo este variar de 3,68 a 6,50, proporção de sólidos voláteis e sólidos totais de 0,79 a 0,97, entre outras características consideradas distintas (Zambon, 2018) a depender do tipo de RO. Porém, a maioria dos resíduos apresentam fácil biodegradabilidade, disponibilidade de nutrientes e elevado teor de umidade, o que contribui positivamente para uma eficiente Digestão Anaeróbia - DA.

- **Biomassa proveniente de Resíduos Sólidos Orgânicos**

A biomassa representa uma das mais antigas fontes de energia proveniente de RS, logo após a energia solar. Além disso, é reconhecida como uma fonte de energia renovável devido à sua capacidade inesgotável de produzir recursos. Diversos exemplos de biomassa, como madeira, algas marinhas e resíduos animais, constituem-se de matéria orgânica que armazena energia por meio do processo de fotossíntese (Singh *et al.* 2014).

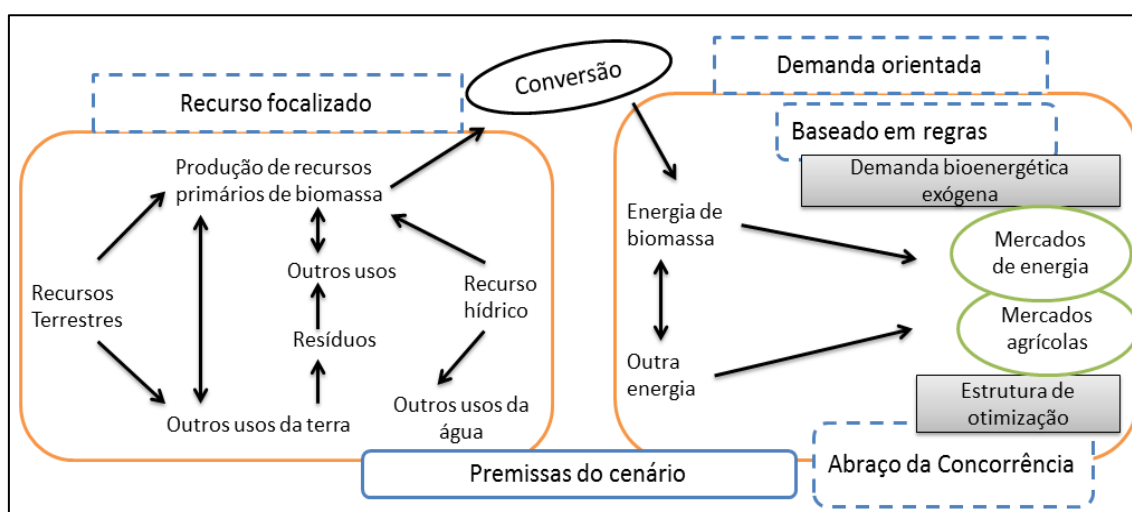
De acordo com a EPE (2018), no contexto energético, a biomassa abrange todo recurso renovável derivado de matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal. Essa fonte de energia pode ser empregada na geração de calor para a indústria, na produção de

eletricidade e pode ser convertida em diferentes formas de energia, como combustíveis sólidos, exemplificados pelo carvão vegetal e briquetes, líquidos como etanol e biodiesel, bem como na forma gasosa, exemplificada pelo biogás proveniente da decomposição de RS (Seabra Jr, 2017).

A biomassa apresenta uma classificação em três categorias bem definidas: (1) biomassa primária, que abrange recursos diretamente resultantes do processo fotossintético e colhidos da natureza, como resíduos florestais e agrícolas; (2) biomassa secundária, composta por resíduos obtidos a partir do processamento físico, químico ou biológico dos recursos de biomassa primária; e (3) biomassa terciária, que engloba resíduos biodegradáveis originados de atividades humanas e de animais, como óleos vegetais e resíduos de embalagens degradáveis, entre outros (Singh *et al.* 2014).

De acordo com Batidzirai *et al.* (2012), a classificação da biomassa pode ser efetuada com base nas necessidades ou no tipo de recurso, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Perspectivas da biomassa com base nos recursos e nas necessidades.



Fonte: Batidzirai *et al.* (2012).

No contexto das fontes de energia, de acordo com Wefle (2017), a energia derivada da biomassa desempenha um papel significativo, representando aproximadamente 10% do suprimento energético global. Desses recursos bioenergéticos, cerca de dois terços são gerados em nações em desenvolvimento, enquanto o terço restante provém de economias industrializadas. Long *et al.* (2013) relatam que a bioenergia, construída sobre os recursos da biomassa, emerge como uma alternativa fundamental aos combustíveis fósseis, capturando interesse generalizado ao contribuir

com uma faixa estimada entre 9% e 13% do panorama global de abastecimento energético.

No Brasil, a presença da biomassa na matriz energética ainda é limitada, como indicado pela ANEEL (2022). Os empreendimentos em operação no país, responsáveis pela geração e fornecimento de energia elétrica, totalizam uma capacidade outorgada de cerca de 185,5 GW. Dentre esses, apenas 9,02% estão associados à energia gerada a partir do aproveitamento da biomassa, correspondendo a aproximadamente 16,7 GW (ANEEL, 2022).

Ainda que as grandes usinas hidrelétricas ocupem a posição central na produção de eletricidade brasileira, elas acarretam significativos impactos ambientais e sociais. Isso destaca a urgência da expansão de fontes de energia de menor impacto ambiental. A energia proveniente da biomassa é uma alternativa nesse sentido. Dependendo da tecnologia de tratamento empregada, a energia de biomassa pode apresentar custos operacionais e de construção substancialmente menores em comparação com as hidrelétricas (WWF, 2012).

Dentre as várias fontes de biomassa que, por meio de tecnologias de processamento, têm o potencial de serem aproveitadas para geração de energia, destacam-se os resíduos orgânicos. Esses resíduos possuem características distintas e, em geral, são classificados como lignocelulósicos. Eles constituem fontes abundantes de biomassa e são frequentemente gerados em grandes volumes por atividades agrícolas, florestais, municipais e agroindustriais (Santos, 2019; Paudel *et al.* 2017).

- **Coleta seletiva no Brasil**

De acordo com a Lei nº 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, a coleta seletiva é caracterizada pela separação prévia de resíduos sólidos de acordo com sua constituição ou composição (BRASIL, 2010). A implantação da coleta seletiva, bem como o estabelecimento de metas para redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, a fim de diminuir a quantidade de resíduos destinados à disposição final, é de responsabilidade dos municípios, conforme previsto nos Planos Municipais de Gestão Integrada de RS.

A coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos, entendida como a separação e recolhimento específico de materiais nas fontes geradoras, com o objetivo de facilitar sua reutilização e garantir sua qualidade, é uma prática conhecida e realizada desde o início

do século XX. As primeiras experiências organizadas desse tipo de coleta foram implementadas na Europa e nos Estados Unidos (Eigenheer; Ferreira, 2015).

Logo, segundo dados do PLANARES (2022), a coleta seletiva ainda não é realidade em grande parte dos municípios e quando colocada em prática, não atinge todos os domicílios. Outro fator que não cumpre a premissa da coleta seletiva é a falta de segregação nos sistemas de entrega de resíduos recicláveis (secos e orgânicos), onde os resíduos ainda são recebidos misturados, diminuindo seu percentual de recuperação e aumentando o volume da disposição final (PLANARES, 2022).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), aponta que a coleta seletiva e a reciclagem são pontos primordiais no planejamento do tratamento e destinação final dos RS. Para que a gestão de RS seja eficiente, vale ressaltar que a mesma vai além do simples recolhimento diferenciado da massa de resíduo e da separação dos materiais, pois Conke e Nascimento (2018), explicam que envolve também o acondicionamento adequado e a destinação final apropriada. No contexto dos municípios brasileiros, a coleta seletiva é predominantemente realizada de forma informal ou organizada por associações e cooperativas de catadores (Klein; Dias; Jayo, 2018).

A região sul do Brasil, possui o maior número de cidades com alguma iniciativa de coleta seletiva, abrangendo cerca de 91% dos municípios. Por outro lado, a região centro-oeste apresenta a menor participação desses municípios nesse tipo de iniciativa. Outro fator de importante na coleta seletiva, é que essa atividade é desempenhada por catadores que enfrentam condições financeiras precárias, com baixa remuneração pelo trabalho realizado (Nascimento, 2021).

Existem diferentes modelos de coleta seletiva que podem variar de acordo com as características de gestão de cada município. Os três modelos mais comuns são: coleta seletiva porta a porta, coleta em pontos de entrega voluntária (PEV) e coleta informal realizada por trabalhadores autônomos. No modelo de coleta seletiva Porta a Porta, os resíduos são coletados diretamente na fonte geradora. A separação dos materiais é feita pelo próprio gerador, e os resíduos são recolhidos por veículos e equipes treinadas para essa finalidade.

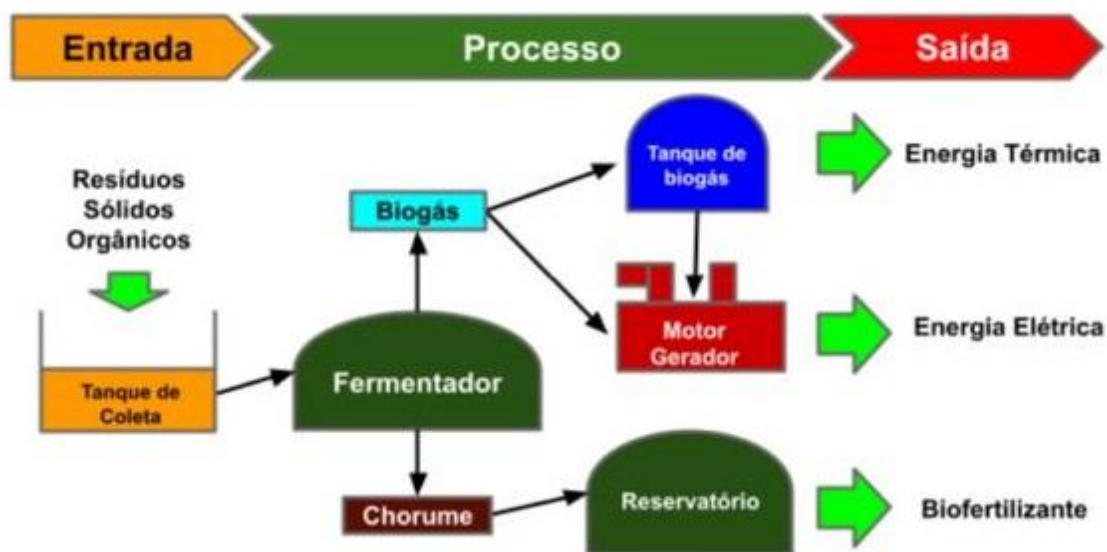
Os postos de entrega voluntária (PEVs) são áreas designadas, previamente, para receber os resíduos. Nesse modelo, é responsabilidade do gerador encaminhar os materiais recicláveis para esses pontos específicos. Já, a coleta informal é realizada por catadores autônomos (que não fazem parte de cooperativas ou associações) que coletam diretamente os materiais recicláveis porta a porta. Esses trabalhadores atuam de forma

autônoma, percorrendo locais como ruas, contêineres ou lixões em busca dos materiais que possam ser reciclados. Cada modelo de coleta seletiva possui suas características e desafios específicos, e a escolha do modelo a ser adotado dependerá das particularidades e recursos disponíveis em cada localidade (Machado, 2022). Vale salientar, que o modelo dos catadores informais não deve ser adotado pelos gestores municipais, tendo em vista que esses profissionais trabalham em condições precárias.

- **Biodigestores**

Biodigestores, também caracterizados como digestores, são equipamentos utilizados desde muitos anos, tendo como principal função a digestão de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizante (Oliver, 2008). O biodigestor é um equipamento fechado e impermeável onde ocorre a decomposição da matéria orgânica através da digestão anaeróbica (Sganzerla, 1983). A Figura 3 mostra o princípio de funcionamento de uma usina de biogás.

Figura 3. Fluxograma das etapas de geração de biogás.



Fonte: Portal Biogás (2021).

Os biodigestores funcionam de forma anaeróbia e são constituídos por câmeras herméticas, na ausência de oxigênio, estes são abastecidos com material orgânico, onde ocorre a bioestabilização através de bactérias anaeróbicas. Durante a transformação dos compostos orgânicos complexos em compostos simples, ocorre a liberação do biogás e produção de insumos orgânicos na forma de biofertilizantes (PORTAL BIOGÁS, 2021).

Nos últimos anos a busca por esses equipamentos vem crescendo bastante, visto seu baixo custo de construção, fácil operação e produção de energia de qualidade, contribuindo de forma positiva com o desenvolvimento sustentável e Economia Circular - EC. Lauer e Thrän (2017) ressaltam que em relação ao custo-benefício, as plantas de biodigestores, geram reduções de custo a longo prazo, dadas as vantagens em processos de redes de armazenamento e unidades de combinação e energia elétrica e térmica, visto que o intervalo entre a produção do gás e a sua utilização pode gerar desperdício do produto.

Em países europeus o número de biodigestores cresceu a partir do ano de 2016 nas áreas urbanas, com destaque para a Alemanha que se apresenta como o país europeu com maior capacidade de produção de biogás (Scarlat; Dallemand; Fahl, 2018). Um estudo realizado por Hansen, Mathiesen e Skov (2019) acerca da transformação na matriz energética alemã, mostra que o país será 100% renovável até o ano de 2050. Os autores sugerem que a produção de energia a partir da biomassa é viável para os setores de eletricidade, transporte e aquecimento, destacando o resíduo orgânico como elemento chave dessa cadeia.

No Brasil, os biodigestores estão concentrados em sua maioria nas áreas rurais considerando a grande atividade agrícola nacional, pois esta gera quantidades elevadas de resíduos orgânicos que servem como substrato para a produção do biogás (Santos *et al.* 2018). O país tem uma das matrizes energéticas com mais opções de energias renováveis aplicadas no mundo, destacando-se principalmente pelo uso da hidroeletricidade, conforme explicam Silva, Neto e Seifert (2016).

Silva, Neto e Seifert (2016), afirmam que a maior parte do consumo energético da biomassa está voltado para a produção do etanol, levando o país a ocupar uma posição relevante no que tange a cadeia produtiva de combustíveis ambientalmente limpos, mas que por outro lado não aproveita outros tipos de resíduos orgânicos para outras formas de conversão em energia.

De acordo com Schmidell e Facciotti (2001), o biodigestor, pode ser categorizado com base no seu método de operação, sendo: biodigestores de fluxo contínuo, fluxo não contínuo, e biodigestores de batelada.

No sistema contínuo, a alimentação ocorre de forma constante, mantendo um fluxo estável e um volume de reação constante. Segundo Quadros (2010), é possível estabelecer um fluxo contínuo de líquidos no biodigestor, ou até mesmo utilizar múltiplos biodigestores em série. O líquido fermentado pode passar por um processo de separação

de microrganismos, como sedimentação, centrifugação ou separação por membranas, garantindo a flexibilidade operacional.

Em se tratando do sistema semicontínuo, este é utilizado quando a disponibilidade de matéria orgânica – MO - é sazonal. Este sistema se diferencia do sistema descontínuo alimentado pelo fato de uma fração do líquido fermentado ser retirada, enquanto o reator é preenchido quase instantaneamente com uma vazão elevada. O líquido fermentado não retirado serve como inóculo para o meio de fermentação adicionado. Alguns autores questionam a existência do sistema semicontínuo, uma vez que em biodigestores muito grandes, a possibilidade de preenchimento instantâneo é muito baixa, resultando em um sistema descontínuo alimentado (Sagula, 2017).

O biodigestor de batelada, é menos utilizado devido à sua baixa produtividade. No entanto, é indicado para RSO que se decompõem lentamente e têm um longo período de produção. Nesse sistema, prepara-se um meio de cultura adequado para nutrição e desenvolvimento dos microrganismos, que é colocado no biodigestor juntamente com os microrganismos responsáveis pelo processo biológico. Após o tempo estimado de fermentação, o material restante no biodigestor é removido e são realizadas as operações necessárias para a recuperação do produto (Sagula, 2017).

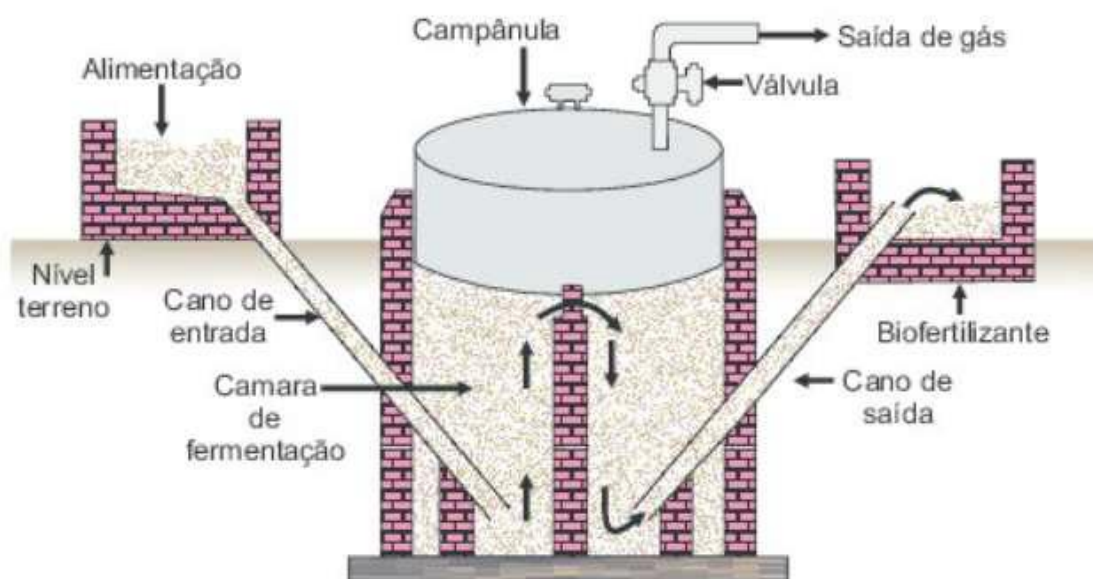
No sistema descontínuo, o inóculo a ser tratado no biodigestor, corresponde a uma fração de 10 a 20% do volume total, o restante é preenchido com um meio de cultura, levando-se em consideração uma vazão adequada, sem retirar o líquido fermentado, até que o volume útil do biodigestor seja preenchido. Não é obrigatório alimentar o reator com uma vazão constante, e as características dos microrganismos devem permanecer ativas no sistema. Caso contrário, o processo deve ser interrompido para reiniciar com um novo inóculo.

Os biodigestores também são classificados conforme o modelo, pois segundo Castanho e Arruda (2008), os principais modelos de biodigestores utilizados mundialmente são: indiano, chinês e o canadense.

O biodigestor indiano segue um formato semelhante ao de um cilindro vertical (Figura 4), construído com tijolos e revestido internamente com cimento impermeabilizante. Possui uma divisão interna formada por uma parede longitudinal, resultando em duas câmaras distintas. Em uma dessas câmaras, há um tubo que conecta o biodigestor à caixa de entrada do material orgânico, enquanto na outra câmara é conectado um tubo de saída para o biofertilizante. Uma característica importante desse

tipo de biodigestor é a presença de uma campânula flutuante, feita de aço, que desempenha a função de um gasômetro.

Figura 3. Biodigestor indiano.

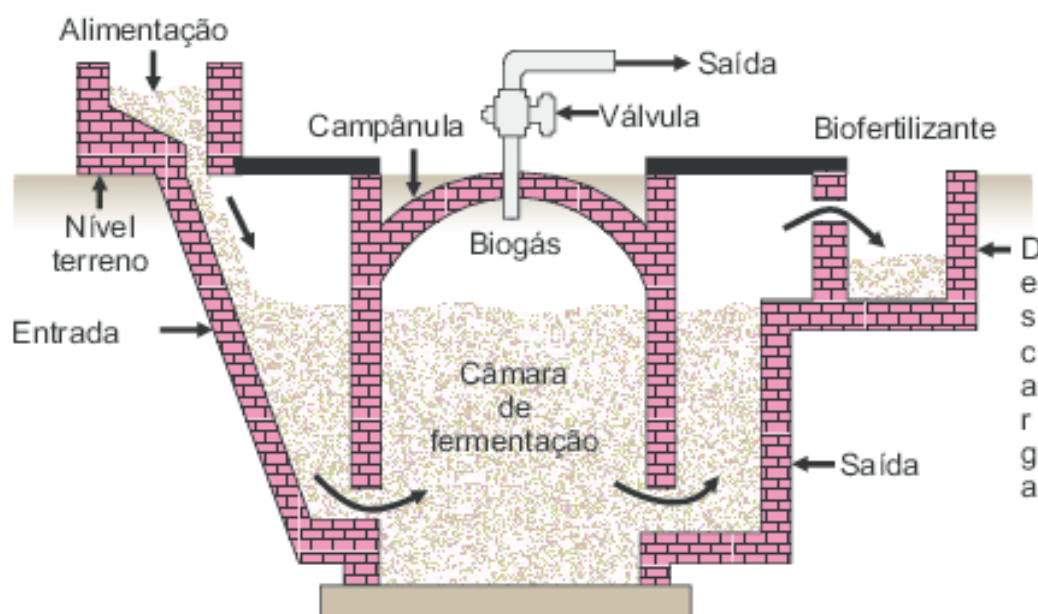


Fonte: Fonseca et al. (2009).

Uma das vantagens do modelo de biodigestor mencionado é a presença da campânula flutuante, que permite manter uma pressão constante na saída do biogás. Isso elimina a necessidade de ajustes constantes nos dispositivos que utilizam metano. No entanto, a desvantagem desse modelo é o custo associado à construção da campânula, que normalmente é feita de ferro. Para tornar esse modelo mais acessível no Brasil, a campânula de ferro foi substituída por uma versão de fibra de vidro. Essa substituição resulta em um preço de construção mais econômico, permitindo a disseminação mais ampla desse tipo de biodigestor no país (Sganzerla, 1983).

O biodigestor modelo chinês possui semelhanças com o indiano, porém a diferença está no fato de não possuir um gasômetro. De acordo com o Sganzerla (1983), o biodigestor chinês (Figura 5) é construído abaixo do solo, utilizando alvenaria, e seu teto tem formato de abóbada. Esse modelo apresenta um custo de construção inferior ao indiano, pois não requer a instalação de um gasômetro e utiliza materiais de menor custo (Nishimura, 2009).

Figura 4. Biodigestor chinês.



Fonte: Deganutti et al. (2002).

Como vantagem o modelo de biodigestor chinês, geralmente construído em alvenaria, apresenta menor custo de construção, uma vez que não requer um gasômetro de chapa de aço. No entanto, é importante observar que pode ocorrer vazamento se o biodigestor não for devidamente vedado e impermeabilizado. Além disso, esses biodigestores não são indicados para construções de grande porte, uma vez que uma parcela do gás pode ser liberada para a atmosfera.

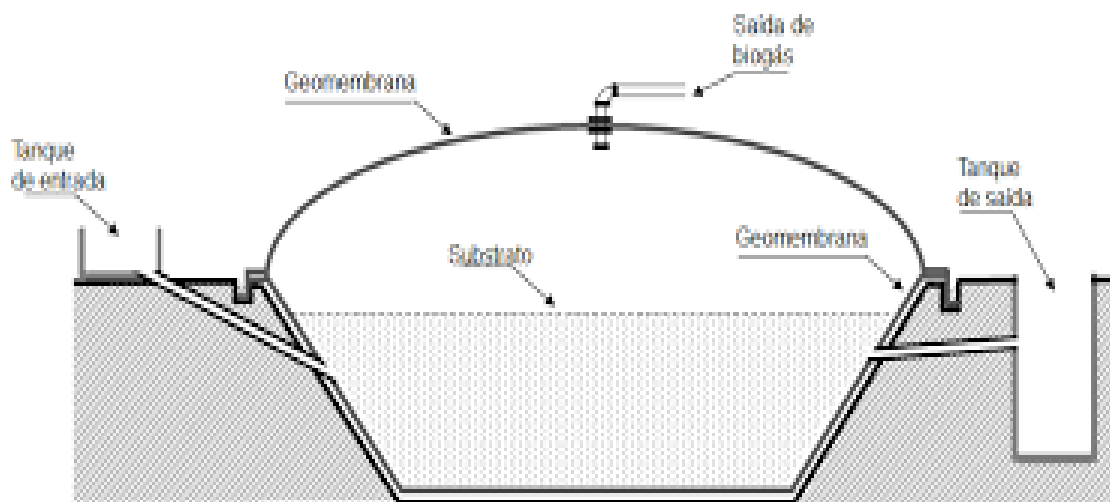
O funcionamento desse tipo de biodigestor ocorre sob elevada pressão, que pode variar de acordo com a produção e o consumo do biogás. Portanto, é necessário incluir uma câmara de regulação que permita trabalhar com baixa pressão. A impermeabilização das paredes internas e externas é destacada como uma medida importante para evitar a infiltração de água pluvial ou do lençol freático.

A profundidade do biodigestor é proporcional ao seu diâmetro, ou seja, quanto menor for a profundidade, maior deve ser o diâmetro do biodigestor. Essa relação deve ser considerada durante o processo de dimensionamento e construção do biodigestor.

A Figura 6 mostra o biodigestor modelo canadense, descrito por Granzotto et al. (2021), possui uma base retangular construída em alvenaria. Uma característica importante desse modelo é a presença de um gasômetro feito de manta flexível de policloreto de vinila (PVC), que é fixado sobre uma valeta de água que circunda a base do biodigestor. A cobertura do biodigestor é feita com uma geomembrana sintética de

polietileno de alta densidade (PEAD), que é ancorada ao redor de todo o perímetro. Essa configuração permite a coleta do biogás gerado durante o processo de digestão anaeróbica.

Figura 5. Biodigestor canadense.



Fonte: Granzotto *et al.* (2021).

Esse modelo de biodigestor pode ser utilizado tanto em pequenas quanto em grandes propriedades. Embora o biogás gerado apresente pouca pressão, por questões de segurança, é recomendado instalá-lo a uma distância mínima de 10 metros de outras edificações (Calza *et al.* 2015).

Durante o processo de produção do biogás, que pode durar de 40 a 60 dias, dependendo do tamanho do biodigestor, a cúpula do biodigestor infla devido à acumulação do biogás. Por esse motivo, é necessário que o material utilizado para a cúpula seja flexível, permitindo sua expansão conforme o acúmulo de biogás. É importante ressaltar que a largura do biodigestor deve ser maior do que a profundidade da vala em que está localizado, para garantir a estabilidade e o adequado funcionamento do sistema (Karlsson *et al.* 2014). Com o avanço dos estudos sobre a digestão anaeróbica, foram desenvolvidos diversos tipos de biodigestores. Sant'Anna Junior (2013) apresentam uma variedade deles, incluindo:

1. Reator LA (Lagoa Anaeróbica): trata-se de uma lagoa onde ocorre o processo de digestão anaeróbica.
2. Reator FA (Filtro Anaeróbico): consiste em um filtro onde o material orgânico passa por camadas filtrantes anaeróbicas.

3. Reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket): também conhecido como RAFA (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente), é um reator de fluxo ascendente com biomassa suspensa.
4. Reatores híbridos: são combinações de diferentes tipos de reatores, como UASB + FA, que oferecem vantagens em termos de eficiência e tratamento.
5. Reator compartimentado: apresenta compartimentos separados para diferentes estágios do processo de digestão anaeróbica.
6. Reator EGSB (Expanded Granular Sludge Bed): também chamado de Reator Anaeróbico de Manta Granular Expandida, utiliza um leito granular para a digestão anaeróbica.
7. Reator RBS (Reator Batelada Sequencial): opera em modo de batelada sequencial, onde diferentes etapas do processo ocorrem sequencialmente.
8. Reator tipo LF (Leito Fluidizado): utiliza um leito de partículas fluidizadas para melhorar o contato entre o material orgânico e os microrganismos.
9. Reator Anaeróbico com Membrana (RAM): combina a digestão anaeróbica com a utilização de membranas para a separação do biogás e efluente.

Esses diferentes tipos de biodigestores oferecem opções adaptáveis para diferentes condições e necessidades de tratamento de resíduos orgânicos. A escolha adequada do modelo de biodigestor a ser implantado requer a consideração de vários aspectos importantes. É necessário levar em conta a finalidade do biodigestor, as condições climáticas da região onde será instalado, o espaço físico disponível e o tipo de substrato que será utilizado para abastecê-lo (Neves, 2010).

Para avaliar o local de instalação, é necessário considerar as características do solo, a facilidade de obtenção dos insumos necessários, o preparo e armazenamento da biomassa, a facilidade de remoção e utilização do biofertilizante, além da distância de utilização do biogás. Idealmente, os locais mais adequados são aqueles com clima quente e baixa incidência de chuvas, proporcionando melhores condições para o processo de biodigestão (Winrock, 2008; Cortez, 2022).

Para realizar uma escolha assertiva do modelo de biodigestor, é recomendado consultar diretrizes e recomendações de instituições especializadas, como o Conselho Internacional para Iniciativas Ambientais Locais (ICLEI) e o Winrock International, que fornecem orientações sobre a seleção e implantação de biodigestores de acordo com as características específicas de cada localidade (Neves, 2010).

- **Produção de biogás e biometano**

A tecnologia da digestão anaeróbia surge como uma perspectiva promissora na geração de energia renovável, sendo amplamente empregada no tratamento de uma variedade de resíduos, como resíduos agrícolas, industriais, orgânicos provenientes da coleta de resíduos sólidos urbanos, resíduos alimentares e esterco de animais. A Europa se destaca como uma líder na produção de biogás. Em 2015, o continente produziu 63,3 TWh de eletricidade a partir do biogás, equivalente ao consumo anual de energia de cerca de 14,6 milhões de famílias (Shrestha *et al.* 2016; Pereira *et al.* 2016). No ano de 2019, a Europa manteve sua liderança na geração de biogás, contribuindo com 72% da produção global. Em termos de energia gerada a partir de biomassa globalmente, o biogás representou 13% dos 655 TWh totais (WBA, 2021).

De acordo com a World Biogas Association - WBA (2019), estima-se que existam aproximadamente 132.000 digestores de diversos portes operando em todo o mundo. A China se destaca com um total de 110.448 sistemas de biogás em funcionamento, sendo que 6.972 deles são de grande escala. Na Europa, há 17.783 usinas com uma capacidade instalada combinada de 10,5 GW. A Alemanha lidera o mercado europeu com 10.971 instalações, seguida pela Itália (1.655), França (742), Suíça (632) e Reino Unido (613). Nos Estados Unidos, operam 2.200 digestores anaeróbios, com uma capacidade instalada total de 977 MW.

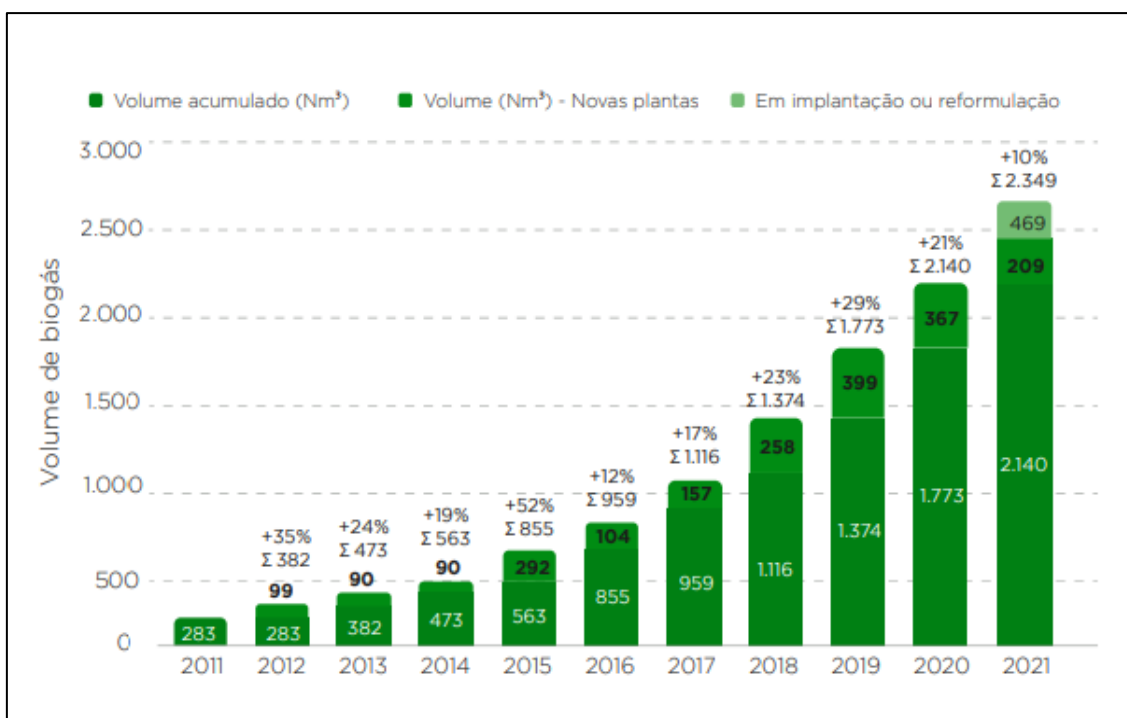
Apesar de ter uma significativa parcela de energia renovável em sua matriz energética, o Brasil ainda está distante dos números registrados por nações europeias. Em relação à produção de biogás, no ano de 2016, o país contava com 165 usinas em operação, gerando cerca de 2,2 milhões de metros cúbicos por dia (Nm³/dia), equivalente a aproximadamente 5.219 GWh anualmente. Notavelmente, a maioria do biogás era proveniente de aterros sanitários (IEA, 2017).

Segundo Mariani (2018), um estudo que diagnosticou a situação e propôs soluções para o biogás, no Brasil, identificou que a maior parte das plantas cadastradas até 2015 estava concentrada nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. As instalações de maior porte estavam particularmente presentes nos estados do Paraná e São Paulo.

Conforme informações do Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás (2022), o país conta com 811 plantas de biogás registradas, produzindo 2,82 bilhões de metros cúbicos por dia. Desse total, 755 usinas estão em operação, concentradas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

No que se refere ao volume de biogás usado para fins energéticos, houve um aumento de 10%, entre os anos de 2020 e 2021, conforme destacado na Figura 7, com um total de 2,3 bilhões de metros cúbicos em 2021.

Figura 6. Crescimento do volume de biogás para uso energético no Brasil entre os anos de 2011 e 2021.



Fonte: Biogás, (2022).

Devido às mudanças regulatórias, fica evidente que o aproveitamento do biogás no Brasil tem demonstrado novos indicadores. Destacam-se, entre esses, as diretrizes estabelecidas pela Resolução nº 685/2017 da Agência Nacional do Petróleo (ANP), bem como a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Além disso, merece atenção o compromisso assumido pelo Brasil no Acordo de Paris durante a COP21, que se refere à redução de até 43% das emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2030.

Considerações Finais

A análise realizada evidencia que o gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil, embora amparado por um arcabouço legal robusto como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e o PLANARES, ainda enfrenta desafios operacionais significativos, especialmente no que tange à universalização da coleta seletiva e à segregação na fonte. A predominância de resíduos orgânicos na massa total de resíduos urbanos (superior a

40%) destaca a urgência de estratégias que desviem esse material dos aterros sanitários, onde sua decomposição contribui negativamente para a emissão de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, as tecnologias de biodigestão anaeróbia apresentam-se como uma solução interdisciplinar de alto impacto, capaz de converter passivos ambientais em ativos energéticos (biogás) e agrícolas (biofertilizantes). A diversidade de modelos de biodigestores, indiano, chinês e canadense, permite a adaptação tecnológica a diferentes realidades socioeconômicas e escalas de produção, desde pequenas propriedades rurais até grandes plantas industriais. Conclui-se que a valorização da biomassa orgânica é um caminho viável para a diversificação da matriz energética brasileira e para o fortalecimento da economia circular, integrando inovação tecnológica, sanidade pública e sustentabilidade ambiental.

Referências

- ABARCA, L.; MAAS, G.; HOGLAND, W. Challenges in municipal solid waste management: A case study of Arba Minch City, Ethiopia. **Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, v. 5, p. 244-252, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Capacidade de Geração do Brasil**. Brasília, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- BATIDZIRAI, B. et al. Biomass energy in the global energy system. **Journal of Cleaner Production**, 2012.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a **Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, ago. 2010.
- BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES)**. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Brasília, DF, 2022/2023.
- CALZA, C. et al. Biodigestão anaeróbia: uma alternativa para o tratamento de resíduos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, 2015.
- CASTANHO, R.; ARRUDA, J. **Modelos de biodigestores**. São Paulo: Editora Rural, 2008.
- CONKE, L. S.; NASCIMENTO, E. P. Brazilian selective collection programs: alternatives and challenges. **Journal of Environmental Planning and Management**, 2018.
- COSTA, R.; MELO, M.; BELTRAME, R. Triple Bottom Line e a sustentabilidade organizacional. **Revista de Administração**, 2016.

- DEGANUTTI, R. et al. Biodigestores. **Energia na Agricultura**, Botucatu, 2002.
- EIGENHEER, E. M.; FERREIRA, J. A. A coleta seletiva no Brasil: uma reflexão. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2015.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2010.
- FERNANDO, P.; LIMA, R. Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. **Revista Ambiental**, 2012.
- FONSECA, P. et al. O biodigestor indiano. **Revista Brasileira de Agroecologia**, 2009.
- GRANZOTTO, F. et al. **Biodigestor modelo canadense**. Curitiba: Ed. UFPR, 2021.
- HANSEN, K.; MATHIESEN, B. V.; SKOV, I. R. Full renewable energy system in Germany by 2050. **Renewable Energy**, 2019.
- KLEIN, F. B.; DIAS, A.; JAYO, M. Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, 2018.
- LAUER, M.; THRÄN, D. Cost-benefit analysis of biogas plants. **Energy Policy**, 2017.
- MACHADO, L. **Modelos de coleta seletiva municipal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.
- NASCIMENTO, J. **Catadores e a coleta seletiva no Brasil**. Brasília: IPEA, 2021.
- NEVES, L. **Seleção e implantação de biodigestores**. Rio de Janeiro: Editora Ciência, 2010.
- OLIVER, P. **Manual de Biodigestores**. Rio de Janeiro: Winrock International, 2008.
- PAUDEL, B. R. et al. Lignocellulosic biomass for energy. **Renewable Energy Reviews**, 2017.
- PORTAL BIOGÁS. **Fluxograma das etapas de geração de biogás**. 2021.
- QUADROS, D. G. **Biodigestão de resíduos orgânicos**. Salvador: EDUFBA, 2010.
- SAGULA, A. **Sistemas de Biodigestão**. Minas Gerais: Editora UFMG, 2017.
- SANTOS, T. R. et al. Biodigestores em áreas rurais brasileiras. **Revista de Economia Rural**, v. 14, 2018.
- SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Tratamento de efluentes por processos anaeróbios**. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.
- SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; FAHL, F. Biogas: developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, 2018.
- SCHMIDELL, W.; FACCIOTTI, M. C. **Biotecnologia Industrial**. São Paulo: Blucher, 2001.

SEABRA JR, S. **Energia de Biomassa**. São Paulo: Atlas, 2017.

SGANZERLA, E. **Biodigestores: Uma Solução**. Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SILVA, J. L.; NETO, J. C.; SEIFERT, M. A matriz energética brasileira e o uso da biomassa. **Revista Brasileira de Energia**, v. 22, n. 1, 2016.

SILVA, A. et al. Resíduos Sólidos e Meio Ambiente. **Cadernos de Sustentabilidade**, v. 12, 2020.

SINGH, R. et al. **Biomass and Bioenergy: Applications and Prospects**. [S.l.]: Springer, 2014.

WBA – World Biogas Association. **Global Biogas Statistics**. London: WBA, 2019/2021.

ZAGO, V. C. P.; BARROS, R. T. V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2019.

ZAMBON, I. et al. Organic waste management and the circle of energy. **Journal of Environmental Management**, 2018.

CAPÍTULO 5

EDUCAÇÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE NA TERRA INDÍGENA DO POVO ANACÉ CAUCAIA/CE

ENVIRONMENTAL EDUCATION AND SUSTAINABILITY IN THE ANACÉ INDIGENOUS LAND, CAUCAIA/CE

DOI: <https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.05>

Submetido em: 14/02/2026

Revisado em: 18/02/2026

Publicado em: 20/02/2026

Denise Maria Santos

Doutora em Geociências. Instituto Dom José de Educação e Cultura, vinculado a Universidade Estadual Vale do Acaraú IDJ/UVA.

<https://orcid.org/0000-0001-8886-6439>

<http://lattes.cnpq.br/5971649947403143>

Larissa Warnavin

Doutora em Geografia. Escola Superior de Educação.

<https://orcid.org/0000-0001-8799-8923>

<http://lattes.cnpq.br/2116659446884763>

Maria José de Holanda Leite

Doutora em Ciências Florestais. Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) – Campus Pau dos Ferros.

<https://orcid.org/0000-0003-4154-3901>

<http://lattes.cnpq.br/9553311470144119>

Ana Soraya Santos

Mestranda em Saúde Pública na Universidade Federal do Ceará/ UFC
Professora Universitária, Supervisora Escolar da Prefeitura Municipal de Fortaleza

<https://orcid.org/0009-0009-7631-7577>

<http://lattes.cnpq.br/3478729727541310>

José Marinho do Nascimento Neto

Pós-graduado em Neuro psicopedagogia. Faculdade Plus

<https://orcid.org/0009-0001-1578-822X>

<http://lattes.cnpq.br/9765996619907898>

Resumo

O presente estudo analisou a relação entre o povo Anacé, situado nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante (CE), e as práticas educativas voltadas à preservação ambiental em seu território tradicional. A pesquisa, de natureza bibliográfica, fundamentou-se em referenciais teóricos que defendem uma educação crítica, contextualizada e dialógica, capaz de integrar saberes tradicionais e científicos. Discutiu-se como a expansão do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) intensificou conflitos territoriais, impactos socioambientais e processos de vulnerabilização, comprometendo recursos naturais, modos de vida e a identidade cultural do povo Anacé. Evidenciaram-se desafios estruturais para a implementação de ações educativas, como a ausência de demarcação definitiva do território, limitações institucionais e a necessidade de formação específica de educadores. Destacou-se, entretanto, o protagonismo comunitário nas estratégias de resistência e na valorização dos conhecimentos ancestrais, bem como iniciativas como o Projeto Caravana Ambiental, que promoveu atividades formativas, fortalecimento cultural e participação social. Concluiu-se que a integração entre práticas pedagógicas contextualizadas, políticas públicas efetivas e reconhecimento territorial foi essencial para assegurar a proteção dos bens naturais e culturais, contribuindo para a construção de um futuro mais justo e equilibrado para o povo Anacé.

Palavras-Chave: territorialidade indígena; etnodesenvolvimento; justiça socioambiental.

Abstract

This study analyzed the relationship between the Anacé people, located in the municipalities of Caucaia and São Gonçalo do Amarante (CE), and educational practices aimed at environmental preservation within their traditional territory. The research, bibliographical in nature, was grounded in theoretical frameworks that advocate for a critical, contextualized, and dialogical education capable of integrating traditional and scientific knowledge. It discussed how the expansion of the Pecém Industrial and Port Complex (CIPP) intensified territorial conflicts, socio-environmental impacts, and processes of vulnerability, compromising natural resources, ways of life, and the cultural identity of the Anacé people. Structural challenges for the implementation of educational actions were identified, such as the absence of definitive land demarcation, institutional limitations, and the need for specific training for educators. Nevertheless, community leadership in resistance strategies and in valuing ancestral knowledge was highlighted, as well as initiatives such as the Environmental Caravan Project, which promoted educational activities, cultural strengthening, and social participation. It was concluded that the integration of contextualized pedagogical practices, effective public policies, and territorial recognition was essential to ensure the protection of natural and cultural assets, contributing to the construction of a more just and balanced future for the Anacé people.

Keywords: Indigenous territoriality; ethnodevelopment; socio-environmental justice.

Introdução

A educação ambiental e a sustentabilidade são temas cruciais na atualidade, especialmente em contextos de comunidades indígenas, onde a relação com o meio ambiente é intrínseca à cultura e à sobrevivência física e de identidade dos povos.

No território do povo Anacé, localizado em Caucaia, Ceará, nos anos de 2024/2025 a implementação de práticas educativas voltadas para a preservação ambiental ainda enfrenta desafios significativos, devido à pressão de projetos de desenvolvimento industrial como o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). Esses projetos ameaçam não apenas os recursos naturais, mas também a identidade cultural e os modos de vida tradicionais dos Anacé, tornando urgente a necessidade de integrar a Educação Ambiental com as práticas sustentáveis que respeitem e valorizem os saberes locais.

Este artigo investiga a relação entre o povo Anacé e o meio ambiente no Ceará através da análise da importância da educação ambiental para a sustentabilidade no contexto indígena. Busca caracterizar a Educação Ambiental e sustentabilidade; identificar as principais ameaças ambientais enfrentadas pelo povo Anacé e suas estratégias de enfrentamento e ainda identificar iniciativas existentes de educação ambiental já implementadas na Terra Indígena Anacé.

Como fundamentação este artigo utilizou os seguintes autores e seus referenciais teóricos. Emmanuel Leff sugere que a Educação Ambiental deve promover uma consciência crítica sobre as relações entre sociedade e natureza, especialmente em contextos vulneráveis das comunidades indígenas (MACIEL, 2017). Boaventura Santos aborda que a educação deve ser um espaço de diálogo entre diferentes saberes, valorizando as práticas sustentáveis dos indígenas, que muitas vezes são marginalizadas em contextos acadêmicos e educacionais (MACIEL, 2017). E José Carlos Silva sugere que a Educação Ambiental deve ser contextualizada e crítica, promovendo o etnodesenvolvimento (SOUZA e SALVI, 2012). É necessária reflexão e respeito para perceber, nas lutas do povo indígena, seu processo de resgate da identidade cultural e patrimonial.

Metodologia

A metodologia utilizada foi Pesquisa Bibliográfica. Foi realizado uma coleta e análise de informações já publicadas sobre o tema para compreender o estado atual do conhecimento e fundamentar teoricamente a investigação. Foi realizada pesquisa em documentos físicos (livros, dissertações, periódicos etc) e virtuais. O Google Acadêmico e Scielo foram as plataformas de pesquisa. Não houve recorte temporal.

Discussões Teóricas e Resultados

Educação Ambiental e Sustentabilidade na Terra Indígena

A Educação Ambiental é um instrumento essencial para a proteção dos saberes tradicionais dos povos indígenas, incentivando o uso de conhecimentos históricos e antropológicos para a manutenção do meio ambiente e da diversidade cultural. Promove a multiculturalidade indígena, o ecodesenvolvimento, a transformação social, o sentimento de responsabilidade coletiva e a prática cidadã, buscando alternativas sustentáveis para reverter a crise ambiental e assegurar um meio ambiente ecologicamente equilibrado (RODRIGUES, 2017).

O Povo Anacé/CE

A comunidade indígena Anacé habita tradicionalmente um território situado em São Gonçalo do Amarante e Caucaia, municípios da Região Metropolitana de Fortaleza. Sua emergência étnica tem estreita ligação com a instalação, na mesma área, de uma série de empreendimentos que integram o Complexo Industrial e Portuário do Pecém/CIPP (BRISSAC e NÓBREGA, 2010).

Os Anacé aparecem na literatura desde o século XVII, quando o padre Antônio Vieira cita este povo em seu relato da missão na serra de Ibiapaba. O historiador Carlos Studart Filho, em sua obra “Notas históricas sobre indígenas cearenses”, documenta que os Anacé moravam junto à costa, eram guerreiros e estavam indispostos a submeter-se ao novo reordenamento imposto pela Coroa portuguesa. Em 1694, Fernão Carrilho sitiou parte dos Anacé a oito léguas ao Norte da Fortaleza de Nossa Senhora da Assunção, onde permanecem até hoje (MEIRELES, 2012).

Em 1863, o Governo Provincial decretou a inexistência de indígenas no Ceará, facilitando a usurpação de seus territórios. Como estratégia de sobrevivência, os Anacé ocultaram sua identidade, deixando de falar a língua nativa e adotando elementos do catolicismo popular.

Atualmente, os Anacé ocupam 25 aldeias e são estimados em mais de 3 mil famílias. Seu território ancestral abrange aproximadamente 9.054,72 hectares nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante (PAULINO, 2023). No entanto, apenas uma pequena parte desse território, a Reserva Indígena da Taba dos Anacé, é oficialmente reconhecida pela Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI) e pelo Governo do Estado do Ceará (BRISSAC, 2012).

A partir da década de 1990, a instalação do Complexo Industrial e Portuário do Pecém/CIPP, intensificou os conflitos e o despejo de terras dos Anacé. Em 2006, o povo Anacé integrou o movimento indígena no Ceará, participando da Assembleia dos Povos Indígenas e ocupando a sede da FUNAI em Fortaleza para exigir a demarcação de seus territórios (FIRPO, 2013)

Em julho de 2024, uma retomada de terra do povo Anacé foi atacada por homens armados e encapuzados, que destruíram barracos e depredaram o cemitério local. Apesar da violência, as famílias Anacé retornaram à área retomada, demonstrando sua determinação em proteger seu território e sua cultura (SANTANA, 2024).

A situação do povo Anacé em Caucaia é marcada por uma contínua luta pela terra, reconhecimento e respeito à sua identidade cultural, em face de pressões econômicas e políticas que ameaçam seu modo de vida tradicional.

Desafios para a Implementação da Educação Ambiental nas Terras Anacé

Os principais desafios na implementação da Educação Ambiental nas terras indígenas do povo Anacé refletem tanto questões sociais quanto políticas e ambientais.

Iniciamos esta exposição com a falta de reconhecimento oficial da Terra Indígena Anacé pelo Estado brasileiro. Apesar das mobilizações e reivindicações, a demarcação de suas terras permanece pendente, o que compromete a autonomia e os direitos dos Anacé sobre seu território. A insegurança territorial resulta em conflitos com interesses externos, como os promovidos pelo Complexo Industrial e Portuário do Pecém/CIPP, que impactam diretamente os recursos naturais e culturais da comunidade (MEIRELES, 2012)

A instalação do CIPP trouxe sérios impactos ambientais e sociais, como a poluição do ar e a degradação dos recursos hídricos, que afetam a saúde e o modo de vida dos Anacé (FIRPO, 2013). Esses fatores dificultam a implementação de práticas de educação ambiental, pois as condições de vida deterioradas limitam a capacidade da comunidade de participar ativamente em programas educacionais. Além disso, a exploração econômica da região gera um ambiente hostil para o desenvolvimento sustentável (NOBREGA, 2022).

A escassez de recursos financeiros e apoio institucional para promover programas de educação ambiental é um obstáculo significativo. As instituições responsáveis, como a Fundação Nacional do Índio (FUNAI), enfrentam limitações estruturais que

comprometem sua capacidade de atender às necessidades educacionais das comunidades indígenas. A falta de formação específica para educadores que atuam nas terras indígenas também é um fator limitante.

Outro desafio importante é a necessidade de integração entre saberes tradicionais dos Anacé com as abordagens científicas contemporâneas em Educação Ambiental. Muitas vezes, os currículos educacionais não consideram as práticas culturais e as experiências locais, resultando em uma desconexão entre o conteúdo ensinado e a realidade vivida pelos indígenas (NOBREGA, 2022). Essa falta de relevância pode desestimular a participação da comunidade nos programas educativos.

Embora haja uma significativa mobilização comunitária e resistência por parte do povo Anacé em busca de seus direitos, as estratégias de resistência precisam ser fortalecidas para garantir que suas vozes sejam ouvidas nas discussões sobre Educação Ambiental e desenvolvimento sustentável (NOBREGA, 2022). A participação ativa da comunidade na definição das políticas educacionais é crucial para o sucesso das iniciativas.

Em resumo, os desafios na implementação da Educação Ambiental nas terras indígenas do povo Anacé são complexos e interligados. Eles exigem uma abordagem integrada que considere as especificidades culturais, sociais e ambientais da comunidade, além de um compromisso efetivo por parte do Estado para garantir os direitos territoriais dos Anacé.

Projeto Caravana Ambiental

O Projeto Caravana Ambiental é uma significativa iniciativa para promover a sustentabilidade nas comunidades indígenas, incluindo o povo Anacé. Busca aliar saberes tradicionais com práticas sustentáveis de conservação ambiental. Essa integração fortalece a identidade cultural e promove modos de vida que respeitem a natureza. As comunidades são incentivadas a compartilhar suas práticas ancestrais, que incluem técnicas de cultivo agroecológico e manejo sustentável dos recursos naturais, promovendo uma relação harmoniosa com o meio ambiente.

A Caravana Ambiental realiza também atividades educativas que visam sensibilizar as comunidades sobre a importância da conservação ambiental e da biodiversidade. Essas ações incluem oficinas, palestras e atividades práticas que envolvem crianças e adolescentes, promovendo uma cultura de preservação desde a

infância. A Educação Ambiental é um pilar essencial para garantir que as futuras gerações continuem a valorizar e proteger seus territórios (CAUCAIA, 2023).

O projeto também envolve membros das comunidades em discussões sobre suas necessidades e desafios a fim de que as comunidades possam reivindicar seus direitos e participar ativamente na gestão dos recursos naturais (CAUCAIA, 2023).

Em suma, o Projeto Caravana Ambiental contribui significativamente para a criação de ações sustentáveis para o povo Anacé e outras comunidades indígenas no Brasil.

Conclusão

A Educação Ambiental nas Terras Indígenas é uma ferramenta poderosa para promover a sustentabilidade e a preservação cultural. Ao integrar saberes tradicionais com práticas educativas contemporâneas e o estabelecimento de políticas públicas de fortalecimento indígena é possível formar uma nova geração consciente da importância do meio ambiente. A implementação dessas iniciativas requer um compromisso conjunto entre as comunidades indígenas, educadores e formuladores de políticas públicas, visando garantir um futuro sustentável para todos.

A valorização dos saberes ancestrais e a promoção da Educação Ambiental são essenciais na promoção da sustentabilidade nas terras indígenas. Projetos e práticas pedagógicas que valorizam a cultura, a agrobiodiversidade e a gestão sustentável dos recursos naturais são essenciais para fortalecer a segurança alimentar, a identidade cultural e o bem-estar das comunidades indígenas). É imperativo que a Educação Ambiental seja abordada de forma integral e que considere os conhecimentos e valores dos povos indígenas, visando a construção de uma sociedade mais justa, igualitária e sustentável.

Referências

BRISSAC, Sérgio Góes Telles. NÓBREGA, Luciana Nogueira Nóbrega. **Benzedeiras Anacé: a relevância dos ritos de cura na emergência étnica de um povo indígena do Ceará**. 2010. Disponível em: https://adelco.org.br/wp-content/uploads/2018/12/ac2b1d_9f59fac058c84123877621ca7c918f64.pdf Acessado em: 03 de janeiro de 2025.

CAUCAIA. **Projeto Caravana Ambiental celebra ações de sensibilização na escola indígena ANACÉ**. Prefeitura Municipal de Caucaia. 2023. Disponível em: <https://www.caucaia.ce.gov.br/informa/1081/projeto-caravana-ambiental-celebra-a-es-de-sensibi> Acessado em: 15 de janeiro de 2025.

FIRPO, Marcelo. **Povo indígena Anacé, pescadores, agricultores e outras comunidades tradicionais lutam e resistem contra impactos negativos do Complexo Industrial e Portuário do Pecém – CIPP**. Mapa de Conflitos: injustiça ambiental e saúde no Brasil. Neepes/ENSP/FIOCRUZ, 2013 Disponível em: <https://mapadeconflitos.ensp.fiocruz.br/conflito/ce-povo-anace-e-desrespeitado-e-expulso-de-seu-territorio-para-construcao-do-complexo-industrial-e-portuario-do-pecem/> Acessado em: 20 de dezembro de 2024.

MACIEL, Aline Neris de Carvalho. **Educação Ambiental No Âmbito Da Escola Diferenciada Da Terra Indígena Lagoa Da Encantada**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) UFC. Aquiraz/CE 2017

MEIRELES, Jeovah; BRISSAC, Sérgio; SCHETTINO, Marco Paulo. **O povo indígena Anacé e seu território tradicionalmente ocupado**. Parecer Técnico N° 01/09. Cadernos do LEME, Campina Grande, vol. 4, nº 1, p. 115 – 235. Jan./Jun. 2012. Disponível em: <https://adelco.org.br/wp-content/uploads/2018/06/O-povo-ind%C3%ADgena-Anac%C3%A9-e-seu-territ%C3%B3rio-tradicionalmente-ocupado-Parecer.pdf> . Acessado em: 17 de novembro de 2024.

NOBREGA, Luciana Nogueira; BARBOSA, Lia Pinheiro. **Uma Pedagogia das Retomadas: Ensinaamentos e Aprendizagens a Partir do Povo Indígena ANACÉ**. Revista da FAEEBA: Educação e Contemporaneidade, Salvador , v. 31, n. 67, p. 248-267, jul. 2022 . Disponível em: <https://doi.org/10.21879/faeeba2358-0194.2022.v31.n67.p248-267> Acessado em: 09 de fevereiro de 2025.

PAULINO, Nicolas. **“Escondido” até 1990 povo anace ocupa 25 aldeias sem escola indígena e com carência de saneamento**. Diário do Nordeste, 2023. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ceara/escondido-ate-1990-povo-anace-ocupa-25-aldeias-sem-escola-indigena-e-com-carencia-de-saneamento-1.3340019> . Acessado em: 18 de janeiro de 2025.

RODRIGUES, D. B; GIRARDON DOS SANTOS, D. T; LOPES, R. V. de M; SCHUCK, P. F. **A Educação Ambiental como Instrumento de Proteção dos Saberes Tradicionais dos Povos Indígenas**. 2017. Disponível em: <https://www.uffs.edu.br/campi/cerro-largo/repositorio-ccl/anais-viii-simposio-iberoamericano-de-cooperacao-para-o-desenvolvimento-e-a-integracao-regional> Acessado em 08 de janeiro de 2025.

SANTANA, Renato. **Homens armados atacam retomada do povo Anacé, no Ceará, destroem barracos e depredam cemitério**. Conselho Indigenista Missionário, 2024. Disponível em: <https://cimi.org.br/2024/07/homens-armados-atacam-retomada-do-povo-anace-no-ceara-destroem-barracos-e-depredam-cemiterio/> Acessado em: 10 de fevereiro de 2025.

SOUZA, D.C. de, SALVI, R.F. **A Pesquisa Em Educação Ambiental: Um Panorama Sobre Sua Construção**. - Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências, 2012 <https://doi.org/10.1590/1983-21172012140308>.

CAPÍTULO 6

TÉCNICAS NUCLEARES APLICADAS À ANÁLISE AMBIENTAL: IMAGEAMENTO COM NÊUTRONS, RADIOTRAÇADORES, MONITORAÇÃO E COMUNICAÇÃO CIENTÍFICA

*NUCLEAR TECHNIQUES APPLIED TO ENVIRONMENTAL
ANALYSIS: NEUTRON IMAGING, RADIOTRACERS, MONITORING,
AND SCIENCE COMMUNICATION*

DOI: <https://doi.org/10.56001/25.9786501835532.06>

Submetido em: 28/09/2026

Revisado em: 04/09/2026

Publicado em: 06/10/2026

Erica Silvani Souza

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Rio de Janeiro-RJ

<https://orcid.org/0009-0005-9163-4459>

André Nunes Barbosa

Instituto de Engenharia Nuclear, Reator Argonauta – IEN/CNEN, Rio de Janeiro-RJ

<https://orcid.org/0009-0005-1150-0451>

Francisco José de Oliveira Ferreira

Instituto de Engenharia Nuclear – IEN/CNEN, Rio de Janeiro-RJ

<https://orcid.org/0009-0006-1980-6372>

Resumo

As técnicas nucleares e isotópicas desempenham papel relevante na análise ambiental ao oferecerem elevada sensibilidade, especificidade isotópica e possibilidades de investigação que complementam os métodos convencionais. Elas permitem identificar radionuclídeos e elementos-traço, acompanhar processos de transporte, investigar a dinâmica da água em materiais e sistemas ambientais e avaliar cenários de exposição humana e da biota. Este capítulo analisa as contribuições, a complementaridade e as condições de aplicação dessas técnicas em quatro frentes: imageamento com nêutrons; monitoração radiológica ambiental; aplicação de isótopos e radiotraçadores à gestão de recursos hídricos; e avaliação e comunicação de riscos radiológicos. O estudo foi desenvolvido como revisão narrativa de caráter técnico-conceitual, fundamentada em literatura científica e em documentos da IAEA, ICRP, UNSCEAR, CNEN e instituições brasileiras da área nuclear. A análise mostra que a radiografia e a tomografia com nêutrons possibilitam investigar a distribuição interna de água e materiais hidrogenados em sistemas opacos, enquanto isótopos

ambientais e radiotraçadores fornecem informações sobre origem, mistura, transporte, tempo de residência e idade aparente das águas. Métodos radiométricos e radioquímicos sustentam a identificação e a quantificação de radionuclídeos, e modelos dosimétricos relacionam as medições a cenários de exposição. Quando selecionadas em função da pergunta ambiental e utilizadas com amostragem representativa, calibração, rastreabilidade, controle da qualidade e análise das incertezas, essas abordagens produzem evidências relevantes para compreender processos, identificar fontes, avaliar intervenções e orientar decisões. Conclui-se que a integração das técnicas nucleares entre si e com métodos não nucleares amplia a capacidade de investigação e fornece subsídios cientificamente fundamentados à gestão ambiental.

Palavras-Chave: Análise ambiental. Imageamento com nêutrons. Monitoração radiológica. Radiotraçadores. Risco radiológico.

Abstract

Nuclear and isotopic techniques play an important role in environmental analysis by providing high sensitivity, isotopic specificity, and investigative capabilities that complement conventional methods. They enable the identification of radionuclides and trace elements, the tracking of transport processes, the investigation of water dynamics in materials and environmental systems, and the assessment of exposure scenarios for humans and biota. This chapter analyzes the contributions, complementarity, and conditions of application of these techniques in four areas: neutron imaging; environmental radiological monitoring; the application of isotopes and radiotracers to water resources management; and radiological risk assessment and communication. The study was conducted as a technical-conceptual narrative review based on scientific literature and documents published by the IAEA, ICRP, UNSCEAR, CNEN, and Brazilian nuclear institutions. The analysis shows that neutron radiography and tomography enable the investigation of the internal distribution of water and hydrogen-rich materials in opaque systems, whereas environmental isotopes and radiotracers provide information on the origin, mixing, transport, residence time, and apparent age of water. Radiometric and radiochemical methods support radionuclide identification and quantification, while dosimetric models relate measurements to exposure scenarios. When selected according to the environmental question and used with representative sampling, calibration, traceability, quality control, and uncertainty analysis, these approaches produce relevant evidence for understanding processes, identifying sources, evaluating interventions, and guiding decisions. It is concluded that integrating nuclear techniques with one another and with non-nuclear methods expands investigative capabilities and provides scientifically grounded support for environmental management.

Keywords: Environmental analysis. Neutron imaging. Radiological monitoring. Radiological risk. Radiotracers.

Introdução

A análise ambiental exige métodos capazes de identificar constituintes presentes em baixas concentrações, acompanhar seu deslocamento e investigar processos em diferentes escalas espaciais e temporais. As técnicas nucleares e isotópicas atendem a parte dessas demandas ao explorarem processos de decaimento nuclear, variações na composição isotópica e interações da radiação com a matéria. Essas abordagens permitem identificar e quantificar radionuclídeos, determinar elementos em diferentes matrizes e empregar isótopos como marcadores de origem, mistura, transporte, tempo de residência e idade aparente. Entre essas abordagens, o imageamento com nêutrons se destaca pela elevada sensibilidade a materiais ricos em hidrogênio e pela capacidade de visualizar, sem seccionar a amostra, a distribuição interna de água em meios opacos, fornecendo

informação espacial dificilmente obtida por métodos convencionais isolados. Quando há contraste suficiente, a técnica também permite identificar interfaces, vazios e descontinuidades. Como a maioria das instalações utiliza fontes estacionárias, essa análise é realizada predominantemente *ex situ*, mediante o transporte da amostra ou do objeto até a linha de imageamento.

A expressão “técnicas nucleares” abrange procedimentos fundamentados em fenômenos distintos. Espectrometrias gama e alfa, cintilação líquida e métodos radioquímicos permitem identificar ou quantificar radionuclídeos, com resultados expressos, conforme a finalidade, em atividade, concentração de atividade ou razão entre atividades. Na análise por ativação com nêutrons, a irradiação controlada produz radionuclídeos cujas emissões características permitem identificar e determinar elementos presentes na amostra. Isótopos estáveis e radioativos podem fornecer assinaturas empregadas como traçadores naturais ou introduzidos, enquanto a radiografia e a tomografia com nêutrons convertem diferenças de transmissão em imagens da estrutura interna. Essas abordagens não são intercambiáveis: cada uma produz determinado tipo de informação e apresenta requisitos próprios de amostragem, calibração, controle de qualidade, proteção radiológica e interpretação.

No campo ambiental, a utilidade dessas ferramentas não decorre apenas da sensibilidade ou do desempenho instrumental. Os resultados precisam ser relacionados à representatividade da amostragem, às transferências entre atmosfera, solo, água e biota, às condições hidrológicas e geoquímicas e às incertezas da análise. Após uma liberação acidental, por exemplo, mapas de deposição caracterizam a distribuição dos radionuclídeos no período avaliado, mas não determinam isoladamente sua mobilidade, sua transferência entre compartimentos ou a evolução da exposição. Erosão, escoamento, sedimentação, ressuspensão, absorção biológica e manejo territorial podem modificar essa distribuição. Após o acidente da Central Nuclear de Fukushima Daiichi, a compreensão da dinâmica do radiocésio exigiu monitoração prolongada, modelos de transferência e informações espacialmente referenciadas (Evrard *et al.*, 2020; UNSCEAR, 2022).

Este capítulo analisa, com ênfase no imageamento com nêutrons, as contribuições e as limitações das técnicas nucleares aplicadas à investigação ambiental em quatro frentes: imageamento com nêutrons em solos, plantas, sistemas porosos e outros materiais; detecção de radionuclídeos e monitoração radiológica ambiental; aplicação de técnicas isotópicas e radiotraçadores à gestão de recursos hídricos; e avaliação e

comunicação de riscos radiológicos. Busca-se relacionar os princípios físicos de cada abordagem às grandezas medidas, às evidências produzidas e às inferências que podem ser sustentadas, considerando amostragem, calibração, controle de qualidade, proteção radiológica e incertezas. Desse modo, discutem-se tanto as possibilidades de aplicação quanto as condições que delimitam o alcance das conclusões e sua utilização em decisões ambientais.

Metodologia

O capítulo foi elaborado como revisão narrativa de caráter técnico-conceitual, organizada em torno das quatro frentes definidas na Introdução. A seleção das fontes priorizou normas, guias e publicações técnicas da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e relatórios do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR). No contexto brasileiro, foram consultados documentos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Materiais do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN) e do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN) foram utilizados para caracterizar competências, infraestrutura e aplicações desenvolvidas no país.

A literatura científica foi localizada por busca dirigida, com ênfase em revisões e estudos das áreas de ciências ambientais, física aplicada, ciência do solo, ciências vegetais, hidrologia isotópica e proteção radiológica. Foram priorizados trabalhos que descrevessem o princípio de medição, apresentassem aplicações ambientais documentadas e discutissem limitações ou incertezas. As fontes foram examinadas segundo quatro questões: qual grandeza ou propriedade é medida; que informação ambiental pode ser inferida; quais condições técnicas sustentam essa inferência; e quais limitações afetam a interpretação e a comunicação dos resultados. A revisão não adotou protocolo sistemático nem procedimentos de metanálise; buscou integrar técnicas, problemas ambientais, tipos de evidência e subsídios à tomada de decisão.

Resultados e Discussão (Desenvolvimento)

• Tópico 1: Fundamentos e complementaridade das técnicas

O emprego de uma técnica nuclear deve começar pela definição da grandeza ou propriedade de interesse. Atividade, concentração de atividade, razão isotópica, vazão,

tempo de residência, idade aparente, espessura equivalente de água e coeficiente de atenuação representam informações distintas e não constituem medidas equivalentes de contaminação, exposição, risco ou impacto ambiental. Uma concentração de atividade em água ou solo, por exemplo, precisa ser interpretada considerando o radionuclídeo, sua meia-vida, forma físico-química, mobilidade e biodisponibilidade, além das vias e da duração da exposição. A estimativa do risco requer modelagem da exposição e da dose, não podendo ser deduzida exclusivamente do valor medido. De modo análogo, uma imagem por transmissão de nêutrons não determina a composição química completa do objeto: o contraste depende das seções de choque dos núcleos presentes, do espectro e da geometria do feixe, da espessura, do espalhamento e da resposta do detector.

A escolha do método também depende das escalas espacial e temporal. Isótopos ambientais e radiotraçadores podem revelar origem e mistura das águas, conexões entre reservatórios e estimativas de tempo de residência ou idade aparente, conforme o traçador e o modelo conceitual. O imageamento com nêutrons acompanha processos internos em amostras ou dispositivos, com resolução determinada pela instalação, pela geometria, pelo detector e pela amostra. A monitoração radiológica combina planejamento amostral, medições in situ ou laboratoriais e séries temporais, eventualmente integradas a modelos de dispersão, transferência e exposição. A complementaridade surge quando evidências produzidas por métodos e escalas diferentes respondem a uma pergunta ambiental comum, preservando suas condições e incertezas.

A Tabela 1 sintetiza as informações produzidas, as aplicações ambientais e os principais limites de interpretação das técnicas discutidas.

Tabela 1: Técnicas nucleares, informações produzidas, aplicações ambientais e condições de interpretação

Técnica ou abordagem	Informação produzida	Aplicações ambientais	Condições de interpretação
Espectrometria gama	Identificação de radionuclídeos e concentração de atividade	Solos, sedimentos, águas, alimentos e biota	Eficiência, geometria, autoatenuação, limite de detecção e rastreabilidade
Métodos radioquímicos, espectrometria alfa e cintilação líquida	Concentração de atividade após preparação ou separação específica	Determinação de urânio, rádio, polônio, estrôncio, trítio e outros radionuclídeos	Rendimento químico, interferentes, branco, calibração e tempo de contagem
Isótopos ambientais e radiotraçadores	Origem, mistura, transporte, vazão e idade aparente	Recarga, conexão entre reservatórios, dispersão e tempo de residência	Modelo conceitual, fracionamento, decaimento, conservação do traçador e autorização de uso
Análise por ativação com nêutrons	Concentração de elementos por emissões induzidas	Elementos-traço em solos, sedimentos, aerossóis, plantas e materiais	Fonte de nêutrons, interferências espectrais, padrões, ativação residual e radioproteção
Radiografia e tomografia com nêutrons	Distribuição espacial da atenuação e do conteúdo de água	Solos, raízes, materiais porosos, corrosão e patrimônio	Calibração, espessura, espalhamento, resolução, acesso à instalação e possível ativação
Dosimetria e modelagem ambiental	Taxa de dose, dose absorvida ou efetiva e indicadores para a biota	Avaliação da exposição humana e não humana	Cenários de exposição, transferência, geometria, hábitos dos receptores e incertezas

Fonte: Elaboração dos autores.

• Tópico 2: Imageamento com nêutrons no estudo de água, solos, plantas e materiais

A radiografia com nêutrons registra a distribuição espacial da transmissão de um feixe através da amostra, enquanto a tomografia reconstrói tridimensionalmente o coeficiente de atenuação a partir de projeções obtidas em diferentes ângulos. O contraste não acompanha de maneira simples o número atômico, como ocorre predominantemente no imageamento por raios X: alguns metais apresentam transmissão relativamente elevada para nêutrons térmicos, enquanto o hidrogênio produz forte atenuação, principalmente por espalhamento. Essa combinação permite visualizar água e outros

materiais ricos em hidrogênio no interior de recipientes metálicos, meios porosos e sistemas opacos à luz visível. A transmissão depende do espectro e da geometria do feixe, das seções de choque, da espessura, do espalhamento e da resposta do detector. Sua conversão em espessura equivalente ou conteúdo de água requer referências, calibração e correções apropriadas. Em instalações baseadas em reatores de pesquisa, as amostras precisam ser transportadas até a linha de imageamento, caracterizando uma análise predominantemente *ex situ*.

Nos sistemas solo-planta, o imageamento com nêutrons permite acompanhar infiltração, redistribuição e absorção de água, além do desenvolvimento das raízes, sem seccionar a amostra durante a aquisição. Oswald *et al.* (2008) quantificaram conjuntamente infiltração, crescimento radicular e absorção de água em amostras de pequena espessura. Outros estudos combinaram radiografia, água deuterada e modelagem numérica para localizar regiões de absorção e investigar o transporte nas raízes (Zarebanadkouki *et al.*, 2012, 2013, 2014). Como deutério e hidrogênio interagem diferentemente com nêutrons, a substituição parcial da água comum por água deuterada produz contraste para acompanhar o traçador. A tomografia rápida ampliou a observação tridimensional de processos dinâmicos de infiltração, absorção e transporte em sistemas radiculares (Tötzke *et al.*, 2017, 2021; Cai *et al.*, 2022). Como essas medições utilizam recipientes compatíveis com o feixe e condições controladas, sua extrapolação para o campo requer integração com medidas hidrológicas, edáficas e fisiológicas.

A técnica também pode investigar materiais relacionados à água, à energia e à durabilidade. Em rochas, concreto, argamassas, membranas e outros meios porosos, permite acompanhar umedecimento, secagem, retenção e caminhos preferenciais. Em dispositivos eletroquímicos, pode revelar a distribuição interna de água em componentes sem acesso óptico. Em objetos tecnológicos e bens do patrimônio, o contraste entre metais e constituintes ricos em hidrogênio auxilia na localização de materiais orgânicos, lubrificantes, adesivos e umidade, sem seccionar inicialmente o objeto. A relevância ambiental depende da questão investigada, como conservação, prevenção de falhas, eficiência energética ou avaliação de materiais destinados à retenção de contaminantes.

A interpretação deve distinguir imagens qualitativas de determinações quantitativas. A quantificação exige imagens de feixe aberto e de corrente escura, correções da resposta do detector e do espalhamento, calibração compatível com a amostra e propagação das incertezas. Na tomografia, também devem ser considerados a distribuição angular das projeções, a reconstrução e os artefatos causados por movimento,

elevada atenuação ou campo de visão insuficiente. Em estudos dinâmicos, existe compromisso entre fluxo de nêutrons, resoluções espacial e temporal e relação sinal-ruído. A exposição da amostra deve ser avaliada considerando fluência, tempo de irradiação, possível dose absorvida e atividade induzida. Quando houver manipulação posterior ou retorno da amostra a outro ambiente, sua liberação deve seguir os procedimentos de proteção radiológica da instalação.

- **Tópico 3: Radiação, contaminação e monitoração ambiental**

A radioatividade ambiental não é sinônimo de contaminação radiológica. Radionuclídeos naturais participam de processos geológicos e biogeoquímicos e estão presentes em rochas, solos, águas, atmosfera e organismos. Radionuclídeos artificiais também podem ser detectados em decorrência da precipitação radioativa associada a testes nucleares realizados no passado, de descargas autorizadas, de liberações relacionadas a práticas médicas e industriais ou de acidentes. O termo contaminação refere-se à presença indesejada de material radioativo em superfícies, materiais, meios ambientais ou organismos. A detecção de um radionuclídeo artificial pode indicar contribuição antrópica e justificar investigação, mas não demonstra, isoladamente, exposição significativa ou dano. A avaliação depende da atividade ou concentração de atividade, do radionuclídeo, de sua forma físico-química, mobilidade e biodisponibilidade, das vias e da duração da exposição e das características dos receptores. Essa distinção permite separar presença detectável, contaminação, exposição e risco radiológico.

Um Programa de Monitoração Radiológica Ambiental constitui um processo planejado e sistemático, cujos objetivos devem preceder a definição dos pontos, das matrizes e da frequência de amostragem (CNEN, 2011). O programa pode caracterizar a linha de base, acompanhar campos de radiação e concentrações de atividade, verificar o controle de efluentes e descargas, identificar tendências, avaliar alterações nas fontes e nas vias de exposição, testar modelos de transferência e subsidiar estimativas de exposição humana e da biota. A espectrometria gama de alta resolução permite identificar e quantificar emissores gama em diferentes matrizes, enquanto radionuclídeos emissores alfa ou beta sem emissão gama suficientemente intensa exigem, em geral, preparação específica, separações radioquímicas, espectrometria alfa, cintilação líquida ou outros métodos apropriados. No Brasil, IRD e IPEN mantêm competências complementares em análises radiométricas e radioquímicas, metrologia, comparações interlaboratoriais,

monitoração ambiental, proteção radiológica e gerenciamento de rejeitos (IRD, 2021; IPEN, 2025).

A qualidade dos resultados depende tanto da representatividade da amostragem quanto do desempenho do sistema de medição. Preservação, transporte, homogeneização, massa ou volume analisado, tempo decorrido desde a coleta, correção do decaimento, geometria, eficiência, autoatenuação, radiação de fundo, branco analítico, materiais de referência e cadeia de custódia podem contribuir para a incerteza. A calibração deve ser compatível com a geometria, a densidade e a composição da matriz quando esses fatores influenciarem a resposta do detector. Resultados próximos aos limites do método exigem tratamento estatístico coerente; valores inferiores ao limite de detecção não devem ser substituídos arbitrariamente por zero. Séries temporais precisam preservar a comparabilidade entre procedimentos, equipamentos, unidades e datas de referência, enquanto mapas devem informar a densidade dos pontos, a resolução, o método de interpolação e as incertezas.

A monitoração após o acidente da Central Nuclear de Fukushima Daiichi ilustra a passagem da caracterização inicial da deposição para a compreensão de processos ambientais prolongados. Embora parcela expressiva do radiocésio tenha permanecido retida nas camadas superficiais dos solos, especialmente em áreas florestais, frações móveis foram redistribuídas por erosão, escoamento, transporte de partículas e manejo do território (Evrard *et al.*, 2020). Bases de dados sobre concentrações e inventários de ^{137}Cs em sistemas florestais e sobre o transporte fluvial ao longo de seis anos permitiram comparar regiões e avaliar modelos (Hashimoto *et al.*, 2020; Taniguchi *et al.*, 2020). O caso mostra que a monitoração não constitui uma fotografia isolada, mas uma infraestrutura continuada de produção e interpretação de dados. Para a biota, a ICRP desenvolveu a abordagem dos Animais e Plantas de Referência e as Faixas de Referência de Consideração Derivada — *Derived Consideration Reference Levels* —, que auxiliam a avaliação, mas não constituem limites universais nem fronteiras automáticas entre ausência e ocorrência de dano (ICRP, 2008, 2014, 2017). A interpretação deve relacionar concentrações ambientais, transferência, exposição externa e interna, taxas de dose absorvida e informações ecológicas específicas do local.

- **Tópico 4: Isótopos e radiotraçadores na gestão de recursos hídricos**

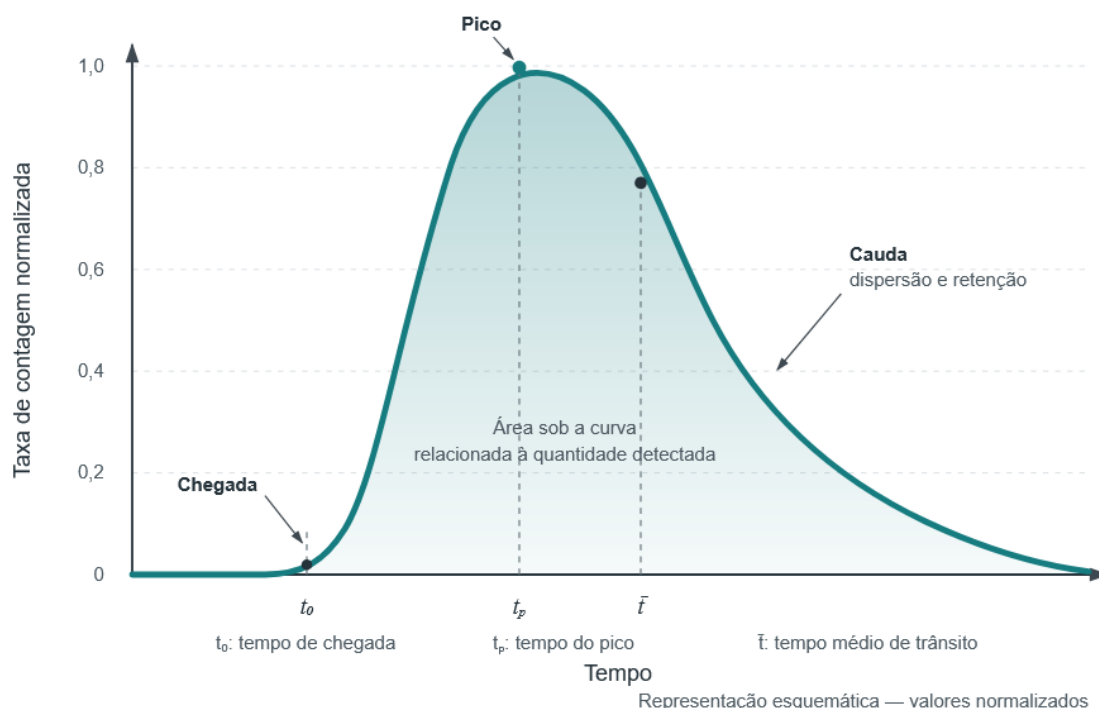
A hidrologia isotópica utiliza variações na composição isotópica da água e das substâncias nela dissolvidas para investigar processos do ciclo hidrológico. As razões dos isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio, expressas geralmente como $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, fornecem informações relacionadas à origem da precipitação e a processos de evaporação, condensação, mistura e variação de altitude. Radionuclídeos como o trítio (^3H) e o carbono-14 (^{14}C) abrangem diferentes escalas temporais das águas subterrâneas: o trítio é particularmente útil na identificação de componentes de recarga recente, enquanto o ^{14}C pode contribuir para a investigação de águas mais antigas, desde que sejam consideradas as transformações geoquímicas do carbono dissolvido. Isótopos de nitrogênio, enxofre, estrôncio e boro também podem auxiliar na diferenciação de fontes de solutos e contaminantes. A seleção do sistema isotópico deve ser compatível com a pergunta e fundamentada em um modelo conceitual hidrogeológico (Kendall; McDonnell, 1998; IAEA, 2013).

Essas ferramentas podem delimitar áreas de recarga, reconhecer misturas entre aquíferos, estimar contribuições de águas superficiais, investigar intrusão salina, identificar conexões entre rios e águas subterrâneas e estimar tempos de residência. A *Global Network of Isotopes in Precipitation* (GNIP), mantida pela IAEA em cooperação com a Organização Meteorológica Mundial, e a *Global Network of Isotopes in Rivers* (GNIR) fornecem referências espaciais e temporais para a interpretação dos dados (IAEA, 2012b). Essas bases não substituem a caracterização local, mas permitem situar os resultados em padrões regionais e globais. A informação isotópica torna-se mais robusta quando integrada à hidroquímica, à geologia, à meteorologia, aos níveis piezométricos e à modelagem do fluxo subterrâneo.

Traçadores deliberadamente introduzidos podem determinar vazões, dispersão, tempos de trânsito, mistura, retenção e eficiência de processos. Após uma injeção controlada, a curva de passagem, obtida pela variação da concentração ou da taxa de contagem ao longo do tempo, fornece informações sobre o transporte no sistema. Sua interpretação depende da geometria, da posição dos detectores ou pontos de amostragem, da resposta instrumental, do regime de escoamento e do modelo adotado. Radioisótopos oferecem elevada sensibilidade e podem permitir medições sem interromper o processo, mas exigem justificativa técnica, autorização regulatória, controle da atividade, planejamento da proteção radiológica e gestão dos materiais remanescentes. A escolha entre

radioisótopos, isótopos estáveis e traçadores não isotópicos deve considerar sensibilidade, seletividade, impacto ambiental, segurança e viabilidade operacional. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, uma curva de passagem obtida pela detecção temporal de um radiotraçador, destacando o tempo de chegada (t_0), o tempo do pico (t_p), o tempo médio de trânsito ($\bar{t}$) e a cauda associada à dispersão e à retenção no sistema.

Figura 1: Representação esquemática de uma curva de passagem de radiotraçador.



Fonte: Elaboração dos autores.

No Brasil, trabalhos do Laboratório de Aplicações de Radiotraçadores na Indústria e Meio Ambiente do IEN/CNEN demonstram a aplicação desses princípios à caracterização de escoamentos e à medição de vazão em tubulações. Santos *et al.* (2021) analisaram a geometria de colimação de detectores de NaI(Tl) empregados no método de tempo de trânsito, mostrando que a qualidade da curva de passagem depende do ângulo sólido, da posição dos detectores e da resposta do sistema. Embora desenvolvidas em contexto industrial, essas aplicações compartilham com os estudos hídricos os fundamentos de injeção controlada, transporte, dispersão e detecção temporal.

A interpretação de idades aparentes requer cautela. Mistura de águas com diferentes histórias de recarga, difusão, interação com a matriz geológica, produção ou perda *in situ*, decaimento radioativo e incertezas na função de entrada podem produzir

valores que não correspondem ao tempo de percurso de uma parcela individual. No caso do ^{14}C , a incorporação de carbono proveniente da matriz carbonática pode alterar a idade calculada se não forem efetuadas correções adequadas. Combinações de traçadores sensíveis a diferentes intervalos temporais tendem, portanto, a produzir interpretações mais robustas. A datação deve ser apresentada como estimativa dependente do modelo, acompanhada das hipóteses, correções e incertezas correspondentes (IAEA, 2013). Para a gestão, os resultados precisam ser convertidos em informações aplicáveis sobre origem da água, áreas de recarga, renovação dos reservatórios, conexões entre compartimentos e possíveis fontes de contaminação. No contexto brasileiro, a determinação de radionuclídeos naturais em águas minerais, associada à caracterização química inorgânica, exemplifica a contribuição dessas técnicas para a avaliação da qualidade radiológica dos recursos hídricos (Wakasugi, 2018).

- **Tópico 5: Avaliação e comunicação de riscos radiológicos ambientais**

A avaliação do risco radiológico relaciona dados ambientais a cenários de exposição, estimativas de dose e, quando pertinente, à caracterização de possíveis consequências. O processo compreende a identificação das fontes e dos radionuclídeos, a caracterização das liberações, a modelagem da dispersão e da transferência entre compartimentos, a definição dos receptores e o cálculo das doses. Para o público, são consideradas vias externas e internas, como irradiação externa por radionuclídeos presentes no solo, inalação de material suspenso e ingestão de água e alimentos. Para a biota, utilizam-se organismos, geometrias, habitats e hábitos representativos. A passagem da atividade medida para a dose estimada depende, portanto, de modelos de transferência, fatores de ocupação, taxas de ingestão e outras hipóteses que precisam ser explicitadas.

As recomendações da ICRP organizam a proteção radiológica em torno dos princípios de justificação e otimização. Nas situações planejadas, a otimização é conduzida com o auxílio de restrições de dose ou de risco e, quando aplicáveis, de limites de dose; nas situações de emergência e de exposição existente, são utilizados níveis de referência. Esses instrumentos orientam decisões, mas não representam fronteiras físicas absolutas entre ausência e presença de dano (ICRP, 2007). Os guias da IAEA complementam essa estrutura ao tratarem da proteção do público e do ambiente, do controle das descargas radioativas e da avaliação prospectiva dos impactos radiológicos ambientais (IAEA, 2018a, 2018b, 2018c).

A incerteza decorre da variabilidade ambiental, da representatividade espacial e temporal das amostras, da resposta instrumental, dos parâmetros de transferência e dos hábitos atribuídos aos receptores. Avaliações transparentes devem distinguir, tanto quanto possível, incerteza de medição, variabilidade real e limitações do conhecimento disponível. Cenários conservadores são úteis para triagem, mas precisam ser identificados como tais para que não sejam confundidos com previsões centrais. Da mesma forma, a estimativa de dose não deve ser apresentada como observação direta de efeito biológico, pois constitui uma grandeza obtida por meio de medições, modelos e hipóteses de exposição.

A comunicação de riscos integra a gestão ambiental. A radiação ionizante é invisível, associa-se historicamente a acidentes, armas e doenças e envolve grandezas pouco familiares ao público. Por isso, mensagens fundamentadas apenas em números ou afirmações genéricas de segurança tendem a ser insuficientes. A percepção do risco também incorpora confiança institucional, possibilidade de controle, voluntariedade da exposição, distribuição de benefícios e prejuízos e memória social. O modelo de amplificação social do risco mostra que sinais técnicos são interpretados e transformados por instituições, meios de comunicação e grupos sociais (Kasperson *et al.*, 1988).

Uma comunicação responsável deve informar o que foi medido, onde, quando e por qual método; apresentar unidades e comparações pertinentes; explicar limites de detecção e incertezas; diferenciar detecção, contaminação, exposição, dose e risco; e indicar quais decisões poderão ser revistas diante de novos dados. Resultados inferiores ao limite de detecção devem ser descritos como não detectados nas condições do método, e não como ausência absoluta do radionuclídeo. Em emergências, são essenciais preparação, coordenação institucional, rapidez, consistência das mensagens e reconhecimento explícito do que ainda não se sabe (IAEA, 2012a).

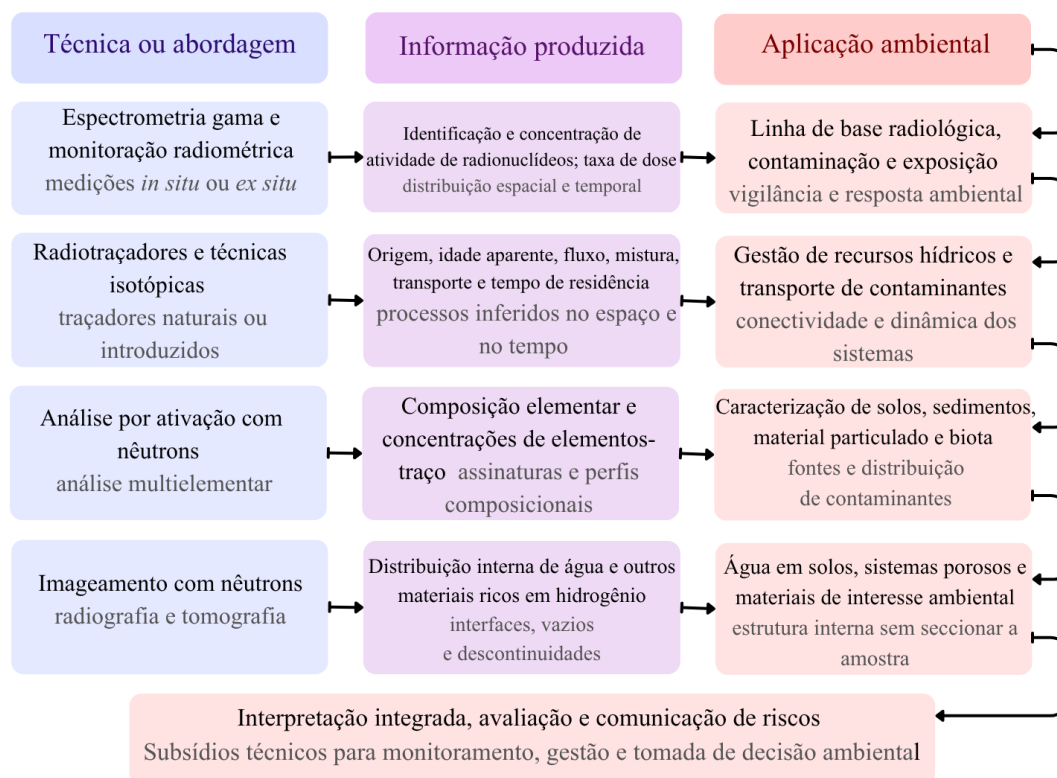
O público não deve ser tratado apenas como receptor de informações. Conhecimentos locais podem auxiliar na escolha dos pontos de amostragem e na identificação de hábitos, padrões de ocupação e vias de exposição. Programas participativos podem fortalecer a confiança quando preservam a qualidade analítica, a rastreabilidade e as responsabilidades institucionais. A participação social não substitui laboratórios qualificados, protocolos metrológicos ou autoridades regulatórias; acrescenta informações contextuais e amplia a transparência e a legitimidade do processo decisório. Em situações prolongadas, disponibilizar dados, explicar incertezas e

documentar os fundamentos das decisões tornam-se componentes da recuperação social e ambiental.

• Tópico 6: Integração das técnicas na análise ambiental

Os quatro eixos discutidos formam uma cadeia de investigação na qual cada abordagem produz um tipo específico de evidência. O imageamento com nêutrons permite observar processos internos e mecanismos de transporte em amostras sob condições controladas; isótopos ambientais e radiotraçadores fornecem informações sobre origem, mistura, transporte e escalas temporais; e a monitoração radiológica determina a presença, a distribuição e as tendências dos radionuclídeos em diferentes matrizes. A avaliação dosimétrica relaciona as concentrações medidas a cenários de exposição, enquanto a comunicação incorpora resultados e incertezas ao processo decisório. A integração amplia a capacidade de interpretação, mas não elimina os limites próprios de cada método. A Figura 2 sintetiza a articulação entre as técnicas, os tipos de informação produzidos e sua utilização na avaliação ambiental.

Figura 2: Integração das técnicas nucleares na investigação e na tomada de decisão ambiental.



Fonte: elaboração dos autores.

Um estudo sobre transporte de contaminantes em solo, por exemplo, pode empregar imageamento com nêutrons para observar frentes de umedecimento, distribuição de água e heterogeneidades do meio poroso; traçadores para investigar caminhos preferenciais e tempos de trânsito; métodos espectrométricos ou radioquímicos para quantificar radionuclídeos; e modelos para estimar transporte e exposição. Nesse arranjo, o imageamento com nêutrons não precisa detectar diretamente o contaminante: sua contribuição pode consistir em revelar processos hidráulicos e estruturais que condicionam sua mobilidade. A interpretação pode ainda exigir métodos não nucleares, como hidroquímica, caracterização mineralógica, propriedades hidráulicas, análises granulométricas, medições fisiológicas, geofísica, sensoriamento remoto e informações meteorológicas. A complementaridade não consiste em acumular técnicas, mas em selecionar medições que respondam a partes relacionadas de uma mesma pergunta ambiental.

A integração deve ser planejada desde a formulação do estudo. Amostras, escalas, intervalos temporais, geometrias, limites de detecção e unidades precisam ser compatíveis com as relações investigadas; resultados obtidos em laboratório não podem ser transferidos diretamente para sistemas ambientais amplos sem relações de escala e validação independente. A robustez científica depende de uma pergunta delimitada, de um modelo conceitual coerente, da escolha de métodos compatíveis com as grandezas de interesse, da garantia da qualidade, da análise das incertezas e de uma comunicação proporcional à decisão. A sofisticação instrumental não compensa uma amostragem inadequada ou uma inferência que ultrapasse os dados. A integração metodológica deve, portanto, fortalecer a explicação ambiental, e não apenas ampliar o número de resultados produzidos.

Considerações Finais

As técnicas nucleares ampliam a capacidade de investigar processos ambientais ao oferecerem elevada sensibilidade, informações isotópicas e modalidades de imageamento complementares aos métodos convencionais. O imageamento com nêutrons permite visualizar a distribuição de água, sistemas radiculares e materiais hidrogenados no interior de estruturas opacas; isótopos ambientais e radiotraçadores fornecem informações sobre origem, mistura, fluxo, transporte, tempo de residência e idade aparente das águas; métodos radiométricos e radioquímicos sustentam a identificação, a

quantificação e o acompanhamento de radionuclídeos; e modelos dosimétricos relacionam as medições ambientais a cenários de exposição humana e da biota.

O valor dessas ferramentas depende da integração entre física, química, hidrologia, ciência do solo, ecologia, metrologia e proteção radiológica. A atividade medida não é, por si só, sinônimo de impacto, assim como o contraste observado em uma imagem não constitui automaticamente uma medida quantitativa. Em ambos os casos, a calibração, o modelo conceitual, as condições experimentais, a análise das incertezas e o contexto ambiental determinam quais conclusões podem ser sustentadas. A integração com dados hidroquímicos, geológicos, meteorológicos, fisiológicos e ecológicos amplia a capacidade explicativa, desde que sejam respeitadas as escalas e as limitações de cada evidência.

No contexto brasileiro, IRD/CNEN, IPEN/CNEN e IEN/CNEN reúnem, em diferentes combinações, competências relacionadas à metrologia das radiações, à análise de radionuclídeos, à monitoração ambiental, à radioquímica, aos reatores de pesquisa, ao imageamento com nêutrons, às aplicações de radiotraçadores, à gestão de rejeitos e à formação especializada. A articulação dessas competências com universidades, órgãos ambientais, empresas e gestores de recursos hídricos pode ampliar a utilização das técnicas nucleares na investigação de problemas concretos. Essa expansão deve permanecer acompanhada por garantia da qualidade, rastreabilidade, proteção radiológica, conformidade regulatória e comunicação capaz de distinguir detecção, contaminação, exposição, dose e risco.

Conclui-se que as técnicas nucleares aplicadas à análise ambiental não constituem um procedimento único, mas um conjunto complementar de estratégias de investigação. Quando selecionadas em função da pergunta ambiental e utilizadas com controle metrológico, elas podem produzir evidências para compreender processos, identificar fontes, avaliar intervenções e apoiar decisões. A comunicação clara das hipóteses, dos métodos, dos resultados, das incertezas e dos limites de interpretação completa esse percurso e contribui para transformar informação técnica em conhecimento ambiental cientificamente fundamentado e socialmente utilizável. Entre as abordagens examinadas, o imageamento com nêutrons ocupa posição de destaque por tornar visíveis a água e outros materiais ricos em hidrogênio no interior de estruturas opacas e por permitir acompanhar processos internos sem seccionar a amostra.

Agradecimentos

Erica Silvani Souza reconhece o apoio recebido por meio da Bolsa de Estudos Avançados, no âmbito do Edital IEN-CNEN nº 002/2024.

Referências

CAI, G. *et al.* Quantification of root water uptake and redistribution using neutron imaging: a review and future directions. **The Plant Journal**, v. 111, n. 2, p. 348–359, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.15839>.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Posição Regulatória 3.01/008:2011: Programa de monitoração radiológica ambiental**. Rio de Janeiro: CNEN, 2011. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_08.pdf. Acesso em: 27 set. 2026.

EVARD, O. *et al.* Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, p. 644–660, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0099-x>.

HASHIMOTO, S. *et al.* A dataset of ¹³⁷Cs activity concentration and inventory in forests contaminated by the Fukushima accident. **Scientific Data**, v. 7, art. 431, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00770-1>.

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA (IRD). **Occupational and environmental radiation protection**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ird/en/occupational-and-environmental-radiation-protection>. Acesso em: 27 set. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Communication with the public in a nuclear or radiological emergency**. Vienna: IAEA, 2012a. (EPR-Public Communications 2012). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/8889/communication-with-the-public-in-a-nuclear-or-radiological-emergency>. Acesso em: 27 set. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Monitoring isotopes in rivers: creation of the Global Network of Isotopes in Rivers (GNIR)**. Vienna: IAEA, 2012b. (IAEA-TECDOC-1673). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/8693/monitoring-isotopes-in-rivers-creation-of-the-global-network-of-isotopes-in-rivers-gnir>. Acesso em: 27 set. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Isotope methods for dating old groundwater**. Vienna: IAEA, 2013. 357 p. (STI/PUB/1587). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/8880/isotope-methods-for-dating-old-groundwater>. Acesso em: 27 set. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Radiation protection of the public and the environment**. Vienna: IAEA, 2018a. (IAEA Safety Standards Series No. GSG-8). Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781_web.pdf. Acesso em: 27 set. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Regulatory control of radioactive discharges to the environment**. Vienna: IAEA, 2018b. (IAEA Safety Standards Series No. GSG-9). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/12197/regulatory-control-of-radioactive-discharges-to-the-environment>. Acesso em: 27 set. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Prospective radiological environmental impact assessment for facilities and activities**. Vienna: IAEA, 2018c. (IAEA Safety Standards Series No. GSG-10). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/12198/prospective-radiological-environmental-impact-assessment-for-facilities-and-activities>. Acesso em: 27 set. 2026.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **Annals of the ICRP**, v. 37, n. 2–4, 2007. (ICRP Publication 103). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. **Annals of the ICRP**, v. 38, n. 4–6, 2008. (ICRP Publication 108). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2008.10.006>.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Protection of the environment under different exposure situations. **Annals of the ICRP**, v. 43, n. 1, 2014. (ICRP Publication 124). DOI: <https://doi.org/10.1177/0146645313497456>.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. **Annals of the ICRP**, v. 46, n. 2, 2017. (ICRP Publication 136). DOI: <https://doi.org/10.1177/0146645317728022>.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). **Sobre o IPEN**. São Paulo: IPEN/CNEN, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ipen/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/sobre-o-ipen>. Acesso em: 28 set. 2026.

KASPERSON, R. E. *et al.* The social amplification of risk: a conceptual framework. **Risk Analysis**, v. 8, n. 2, p. 177–187, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1988.tb01168.x>.

KENDALL, C.; McDONNELL, J. J. (ed.). **Isotope tracers in catchment hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-10239-8>.

OSWALD, S. E. *et al.* Quantitative imaging of infiltration, root growth, and root water uptake via neutron radiography. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 3, p. 1035–1047, 2008. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0156>.

SANTOS, R. F. G.; BRANDÃO, L. E. B.; DOMINGUES, A. M.; DUALIBI FILHO, J. C. D. Procedure to optimize the solid angle for the collimation of the NaI detector used to measure the flow rate in pipelines. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 9, n. 1A, p. 1–15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15392/bjrs.v9i1A.1550>.

TANIGUCHI, K. *et al.* Dataset on the 6-year radiocesium transport in rivers near Fukushima Daiichi nuclear power plant. **Scientific Data**, v. 7, art. 433, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00774-x>.

TÖTZKE, C. *et al.* Capturing 3D water flow in rooted soil by ultra-fast neutron tomography. **Scientific Reports**, v. 7, art. 6192, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06046-w>.

TÖTZKE, C.; KARDJILOV, N.; HILGER, A.; RUDOLPH-MOHR, N.; MANKE, I.; OSWALD, S. E. Three-dimensional in vivo analysis of water uptake and translocation in maize roots by fast neutron tomography. **Scientific Reports**, v. 11, art. 10578, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90062-4>.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2020/2021 Report**. Volume II, Scientific Annex B. New York: United Nations, 2022. Disponível em: https://www.unscear.org/unscear/publications/2020_2021_2.html. Acesso em: 27 set. 2026.

WAKASUGI, D. S. M. **Avaliação da concentração de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb e ^{210}Po e caracterização química inorgânica das águas minerais dos Parques das Águas de Águas de Contendas e Lambari – MG**. 2018. 273 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.85.2019.tde-01022019-111224>.

ZAREBANADKOUKI, M. *et al.* Quantification and modeling of local root water uptake using neutron radiography and deuterated water. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 3, art. vzj2011.0196, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0196>.

ZAREBANADKOUKI, M.; KIM, Y. X.; CARMINATI, A. Where do roots take up water? Neutron radiography of water flow into the roots of transpiring plants growing in soil. **New Phytologist**, v. 199, n. 4, p. 1034–1044, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12330>.

ZAREBANADKOUKI, M.; KROENER, E.; KAESTNER, A.; CARMINATI, A. Visualization of root water uptake: quantification of deuterated water transport in roots using neutron radiography and numerical modeling. **Plant Physiology**, v. 166, n. 2, p. 487–499, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.114.243212>.

CAPÍTULO 7

PUBLIQUE COM A SCIENCE EM FLUXO CONTÍNUO

PUBLISH WITH SCIENCE IN CONTINUOUS FLOW

DOL:

Submetido em: 18/11/2025

Revisado em: 03/12/2025

Publicado em: 04/12/2025

AUTORES

Universidade Federal do Brasil, Faculdade de Ciências, Localidade-PE

<http://lattes.cnpq.br/>

AUTORES

Universidade Estadual do Brasil, Centro de Ciências, Localidade-PB

<https://orcid.org/>

AUTORES

Instituto Federal do Brasil, Departamento de Ciências, Localidade-SE

<http://lattes.cnpq.br/>

Resumo

Texto

Palavras-chave: Words.

Abstract

Texto

Keywords: Words.

Introdução

Aqui começa sua publicação e história de sucesso.

CAPÍTULO 8

PUBLIQUE COM A SCIENCE EM FLUXO CONTÍNUO

PUBLISH WITH SCIENCE IN CONTINUOUS FLOW

DOI:

Submetido em: 18/11/2025

Revisado em: 03/12/2025

Publicado em: 04/12/2025

AUTORES

Universidade Federal do Brasil, Faculdade de Ciências, Localidade-PE

<http://lattes.cnpq.br/>

AUTORES

Universidade Estadual do Brasil, Centro de Ciências, Localidade-PB

<https://orcid.org/>

AUTORES

Instituto Federal do Brasil, Departamento de Ciências, Localidade-SE

<http://lattes.cnpq.br/>

Resumo

Texto

Palavras-chave: Words.

Abstract

Texto

Keywords: Words.

Introdução

Aqui começa sua publicação e história de sucesso.

SOBRE OS ORGANIZADORES DO LIVRO DADOS CNPQ:

Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos



Possui Graduação em Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2003) e Mestrado em Genética e Biologia Molecular pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006). Doutor em Biotecnologia pela RENORBIO (Rede Nordeste de Biotecnologia (2013), Área de Concentração Biotecnologia em Saúde atuando principalmente com pesquisa relacionada a genética do câncer de mama. Participou como Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial Nível 3 de relevantes projetos tais como: Projeto Genoma *Anopheles darlingi* (de 02/2008 a 02/2009); e Isolamento de genes de interesse biotecnológico para a agricultura (de 08/2009 a 12/2009). Atualmente é Professor Adjunto III da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, do Centro de Educação e Saúde onde é Líder do Grupo de Pesquisa BASE (Biotecnologia Aplicada à Saúde e Educação) e colaborador em ensino e pesquisa da UFRPE, UFRN e EMBRAPA-CNPQ. Tem experiência nas diversas áreas da Genética, Fisiologia Molecular, Microbiologia e Bioquímica com ênfase em Genética Molecular e de Microrganismos, Plantas e Animais, Biologia Molecular e Biotecnologia Industrial. Atua em projetos versando principalmente sobre os seguintes temas: Metagenômica, Carcinogênese, Monitoramento Ambiental e Genética Molecular, Marcadores Moleculares Genéticos, Polimorfismos Genéticos, Bioinformática, Biodegradação, Biotecnologia Industrial e Aplicada, Sequenciamento de DNA, Nutrigenômica, Farmacogenômica, Genética na Enfermagem e Educação.

Pós-Dra. Carliane Rebeca Coelho da Silva



Possui Graduação em Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco apresentando monografia na área de genética com enfoque em transgenia. Mestrado em Melhoramento Genético de Plantas pela Universidade Federal do Rural de Pernambuco com dissertação na área de melhoramento genético com enfoque em técnicas de imunodeteção. Doutora em Biotecnologia pela RENORBIO (Rede Nordeste de Biotecnologia, Área de Concentração Biotecnologia em Agropecuária) atuando principalmente com tema relacionado a transgenia de plantas. Pós-doutorado em Biotecnologia com concentração na área de Biotecnologia em Agropecuária. Atua com linhas de pesquisa focalizadas nas áreas de defesa de plantas contra estresses bióticos e abióticos, com suporte de ferramentas biotecnológicas e do melhoramento genético. Tem experiência na área de Engenharia Genética, com ênfase em isolamento de genes, expressão em plantas, melhoramento genético de plantas via transgenia, marcadores moleculares e com práticas de transformação de plantas via "ovary drip". Tem experiência na área de genética molecular, com ênfase nos estudos de transcritos, expressão diferencial e expressão gênica. Integra uma equipe com pesquisadores de diferentes instituições como Embrapa Algodão, UFRPE, UEPB e UFPB, participando de diversos projetos com enfoque no melhoramento de plantas.

Prof Dr. Carlos Frederico Lins e Silva Brandão



Possui graduação em Bacharelado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2003), mestrado em Ciências Florestais pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2007) e doutorado em Ciências Florestais pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2013). Atuou como consultor ambiental no Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste (CEPAN) entre 2012 e 2016, além de prestar consultoria ambiental em empresas e escritórios de advocacia. Foi Professor Substituto na Universidade Federal de Alagoas (2017) e professor adjunto nas áreas de Ciências do Ambiente e Recuperação de Áreas Degradadas do Campus de Engenharia e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (2017 - 2022), atualmente é professor adjunto da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE). Tem experiência na área de Ecologia, com ênfase em Ecologia florestal, atuando principalmente nos seguintes temas: Estrutura e funcionamento de ecossistemas florestais (Floresta Atlântica e Caatinga) e restauração ecológica.

PESQUISAS E PRÁTICAS EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

“Esperamos que tenham aproveitado todos os trabalhos disponíveis na íntegra e gratuitos para seu conhecimento e consulta.

Esta obra objetivou ampliar os seus horizontes sobre a temática proposta além dos muros acadêmicos, proporcionando uma visão mais realista, ampla e multidisciplinar desta área de estudo seus impactos e descobertas.

Os livros da Science compreendem do conhecimento mais simples ao mais complexo, do mais acadêmico ao mais aplicado, procurando sempre a socialização global com conhecimento científico respaldado e de qualidade, para que a sociedade possa se beneficiar em todos os sentidos.

Agradecemos o seu interesse em chegar até o final deste livro na busca por conhecimento. Aguardem novos títulos e eventos da Editora Science sempre comprometida com a qualidade e o sucesso da sua publicação.”

PARA MAIS INFORMAÇÕES E OBRAS DA EDITORA SCIENCE ACESSE:

www.editorascience.com.br

Siga nossas redes sociais e amplie o alcance dos nossos livros:

Facebook: <http://www.facebook.com/editorascience>

Instagram: <https://www.instagram.com/editorascience>



Todos os Direitos Reservados

