


**BIOECONOMIA E SUSTENTABILIDADE: CAMINHOS PARA A REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO**

**BIOECONOMY AND SUSTAINABILITY: PATHWAYS TO REDUCING CARBON EMISSIONS**

**BIOECONOMÍA Y SOSTENIBILIDAD: CAMINOS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE CARBONO**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-115>

**Data de submissão:** 12/10/2025

**Data de publicação:** 12/11/2025

**Simone Silva dos Santos**

Graduanda em Biotecnologia

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/6763962275006269>

E-mail: [simonesilvadossanotos015@gmail.com](mailto:simonesilvadossanotos015@gmail.com)

**Edison Pinto dos Santos**

Doutorado em Desenvolvimento Econômico

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/2821682713242701>

E-mail: [edilson.barbosa@ufam.edu.br](mailto:edilson.barbosa@ufam.edu.br)

**Milena Gaion Malosso**

Doutorado

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1873078781409836>

E-mail: [milena@ufam.edu.br](mailto:milena@ufam.edu.br)

---

**RESUMO**

A bioeconomia surge como um paradigma estratégico para conciliar desenvolvimento socioeconômico e sustentabilidade, com potencial significativo para reduzir as emissões de carbono mediante a substituição de fontes fósseis e a promoção do sequestro de carbono. Este artigo analisa, por meio de uma revisão sistemática crítica da literatura científica recente, como modelos e práticas da bioeconomia alinhados aos princípios de sustentabilidade contribuem para a descarbonização em diversos setores. Os resultados indicam que estratégias como biocombustíveis, BECCS, Biochar e biorrefinarias apresentam alto potencial de mitigação, mas enfrentam desafios técnicos, econômicos e políticos que limitam sua escalabilidade. Conclui-se que a bioeconomia representa uma via viável para a transição para uma economia de baixo carbono, desde que apoiada por políticas integradas, inovação tecnológica e cooperação internacional.

**Palavras-chave:** Bioeconomia Sustentável. Emissões de Carbono. Descarbonização. Mitigação Climática. Revisão Sistemática.

**ABSTRACT**

Bioeconomy emerges as a strategic paradigm for reconciling socioeconomic development and sustainability, with significant potential to reduce carbon emissions by replacing fossil fuels and promoting carbon sequestration. This article analyzes, through a critical systematic review of recent scientific literature, how bioeconomy models and practices aligned with sustainability principles contribute to decarbonization in various sectors. The results indicate that strategies such as biofuels,

BECCS, biochar, and biorefineries have high mitigation potential but face technical, economic, and political challenges that limit their scalability. It concludes that bioeconomy represents a viable path for the transition to a low-carbon economy, provided it is supported by integrated policies, technological innovation, and international cooperation.

**Keywords:** Sustainable Bioeconomy. Carbon Emissions. Decarbonization. Climate Mitigation. Systematic Review.

## RESUMEN

La bioeconomía emerge como un paradigma estratégico para conciliar el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad, con un potencial significativo para reducir las emisiones de carbono mediante la sustitución de combustibles fósiles y la promoción de la captura y almacenamiento de carbono. Este artículo analiza, a través de una revisión sistemática crítica de la literatura científica reciente, cómo los modelos y prácticas de la bioeconomía alineados con los principios de sostenibilidad contribuyen a la descarbonización en diversos sectores. Los resultados indican que estrategias como los biocarburantes, la captura y almacenamiento de carbono con bioenergía (BECCS), el biocarbón y las biorrefinerías tienen un alto potencial de mitigación, pero enfrentan desafíos técnicos, económicos y políticos que limitan su escalabilidad. Se concluye que la bioeconomía representa una vía viable para la transición hacia una economía baja en carbono, siempre que cuente con el apoyo de políticas integradas, innovación tecnológica y cooperación internacional.

**Palabras clave:** Bioeconomía Sostenible. Emisiones de Carbono. Descarbonización. Mitigación del Cambio Climático. Revisión Sistemática.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente urgência em enfrentar as mudanças climáticas tem demandado a busca por modelos econômicos alternativos que conciliem desenvolvimento socioeconômico com a preservação ambiental. Nesse contexto, a bioeconomia emerge como um paradigma promissor, fundamentado na utilização de recursos biológicos renováveis e na aplicação de inovações tecnológicas para criar sistemas de produção mais sustentáveis e circulares. Sua relevância é particularmente acentuada no debate sobre a descarbonização, visto que propõe a substituição de insumos fósseis por alternativas de base biológica, além de incorporar práticas que promovem a captura e o armazenamento de carbono.

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar criticamente, com base na literatura científica recente, de que maneira os modelos e práticas da bioeconomia, quando alinhados aos princípios de sustentabilidade, contribuem para a redução das emissões de carbono em diversos setores e escalas. Para tanto, delineiam-se os seguintes objetivos específicos: mapear os principais conceitos, princípios e pilares da bioeconomia sustentável e sua intrínseca relação com a mitigação das mudanças climáticas; identificar as estratégias e tecnologias baseadas em recursos biológicos renováveis com maior potencial para substituir fontes fósseis e reduzir emissões líquidas de gases de efeito estufa; sistematizar os desafios críticos, limitações e trade-offs associados à expansão da bioeconomia como estratégia de mitigação; e, por fim, apontar lacunas de conhecimento e tendências emergentes de pesquisa no campo da bioeconomia aplicada à descarbonização. Parte-se da hipótese de que a bioeconomia sustentável, mediante a integração de inovações tecnológicas e arranjos institucionais adequados, configura-se como uma via viável e eficaz para a transição rumo a uma economia de baixo carbono.

Este artigo está organizado em cinco seções principais. Após esta introdução, o Referencial Teórico discute os fundamentos conceituais da bioeconomia sustentável e suas estratégias tecnológicas para substituição de fontes fósseis, estabelecendo a base teórica necessária para a análise. A metodologia detalha o desenho da revisão sistemática crítica realizada, incluindo critérios de seleção e procedimentos de análise. Na sequência, a seção de Resultados e Discussão apresenta e interpreta as evidências encontradas na literatura, categorizando-as em estratégias de implementação e impactos intersetoriais. Por fim, a conclusão sintetiza as principais descobertas, reflexões críticas e implicações para pesquisa e políticas públicas, reafirmando o papel central da bioeconomia no contexto da sustentabilidade e da descarbonização.

## 2 OBJETIVO

Geral: Analisar criticamente, a partir da literatura científica, como os modelos e práticas da bioeconomia, alinhados aos princípios de sustentabilidade, contribuem para a redução das emissões de carbono em diferentes setores e escalas.

### 2.1 ESPECÍFICOS

- Mapear os principais conceitos, princípios e pilares da bioeconomia sustentável e sua relação intrínseca com a mitigação das mudanças climáticas, com foco na redução de carbono.
- Identificar as principais estratégias e tecnologias baseadas em recursos biológicos renováveis que demonstram potencial efetivo para substituir fontes fósseis e reduzir emissões líquidas de GEE.
- Sistematizar os desafios críticos, limitações e *trade-offs* associados à expansão da bioeconomia como estratégia de mitigação climática, conforme discutido na literatura.

### 2.2 HIPÓTESES

- A bioeconomia sustentável reduz emissões de carbono mediante a substituição de fontes fósseis e o sequestro de carbono, alinhando-se a princípios de circularidade e renovabilidade.
- Estratégias como biocombustíveis, BECCS, Biochar e biorrefinarias possuem alto potencial de mitigação, mas dependem de superação de barreiras técnicas, econômicas e regulatórias para ampla adoção.
- A bioeconomia constitui um caminho viável para a descarbonização, exigindo cooperação internacional, investimento em P&D e harmonização entre dimensões econômicas, sociais e ambientais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 BIOECONOMIA SUSTENTÁVEL: CONCEITOS, PRINCÍPIOS E RELAÇÃO COM A MITIGAÇÃO CLIMÁTICA

O conceito de bioeconomia tem se tornado cada vez mais relevante no contexto das discussões sobre desenvolvimento sustentável e mitigação das mudanças climáticas. A bioeconomia pode ser definida como a produção e o uso de recursos biológicos, incluindo a biotecnologia, para desenvolver processos e produtos que sejam sustentáveis e que visem a redução da dependência de recursos não renováveis, alinhando-se aos princípios de renovabilidade, circularidade e baixo carbono (Neiva *et al.*, 2022). A evolução desse conceito reflete uma conscientização crescente sobre a necessidade de integrar

considerações ambientais nas estratégias econômicas e de desenvolvimento, especialmente em regiões ricas em biodiversidade, como a Amazônia (Picanço e Sobrinho, 2024).

Os princípios fundamentais da bioeconomia sustentável incluem a renovabilidade, a circularidade e a meta de baixo carbono. A renovabilidade implica na utilização de recursos que podem ser regenerados, evitando a exaustão de matérias-primas finitas (Moreira e Manzatto, 2024). A circularidade refere-se a um modelo de produção e consumo que busca minimizar a geração de resíduos e promover a reutilização, reciclagem e recuperação de materiais (Picanço *et al.*, 2024). Esses princípios estão intimamente ligados à redução de emissões de carbono, uma vez que a bioeconomia busca alternativas que não apenas substituem os combustíveis fósseis, mas também promovem a captura e o armazenamento de carbono por meio de práticas como a agricultura regenerativa e a implementação de bioenergia (Neiva *et al.*, 2022; Júnior, Rocha e Moreira, 2025).

A articulação da bioeconomia com a mitigação das mudanças climáticas é multifacetada. A implementação de tecnologias baseadas na bioeconomia pode resultar na diminuição significativa das emissões de carbono. Por exemplo, a produção de biocombustíveis a partir de biomassa não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também potencializa a absorção de CO<sub>2</sub> por meio do crescimento de plantas (Neiva *et al.*, 2022). Além disso, ao promover a valorização dos resíduos por meio da bioeconomia circular, é possível transformar subprodutos da agroindústria em novas fontes de renda, ao mesmo tempo que evita a emissão de gases de efeito estufa que ocorre quando esses resíduos são descartados inadequadamente (Teixeira e Mendes, 2023).

A atuação da bioeconomia na Amazônia é particularmente significativa, considerando que essa região abriga uma vasta biodiversidade e possui um potencial imenso para o desenvolvimento sustentável. No entanto, a transição para uma bioeconomia sustentável na Amazônia enfrenta desafios, como barreiras regulatórias e a necessidade de incentivos apropriados para capacitar as comunidades locais e promover o desenvolvimento de iniciativas sustentáveis (Dias, 2025). O fortalecimento do cooperativismo e a demanda por produtos sustentáveis podem impulsionar a bioeconomia, gerando empregos e melhorando as condições sociais, ao mesmo tempo que contribui para a preservação ambiental (Santos *et al.*, 2021).

A bioeconomia também se alinha diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU, que visam erradicar a pobreza, diminuir as desigualdades e proteger o planeta da degradação (Fattori e Souza, 2025). A implementação de políticas públicas que incentivem a pesquisa e desenvolvimento na bioeconomia, assim como a promoção de práticas que respeitem a biodiversidade e os ecossistemas, é essencial para garantir que a bioeconomia se torne uma realidade

que não apenas sustente a economia, mas que também conserve a natureza para as futuras gerações (Silva e Oliveira, 2021; Willerding *et al.*, 2020).

A evolução do conceito de bioeconomia é também uma resposta à crescente demanda por uma economia mais verde, que consiga atender as necessidades da sociedade contemporânea sem comprometer a capacidade dos futuros habitantes do planeta. A bioeconomia sustentável não apenas promete promover um modelo econômico mais limpo, mas também garante uma relação mais harmoniosa entre as atividades humanas e o meio ambiente, onde o crescimento econômico é realizado de maneira responsável e equilibrada (Santos, 2023). Por isso, é fundamental que os *stakeholders* envolvidos no desenvolvimento econômico e ambiental trabalhem em conjunto para promover uma bioeconomia que seja inclusiva, equitativa e respeitosa com os recursos naturais e sociais disponíveis (Mejias, 2019).

Além de ser um pilar importante para a mitigação das mudanças climáticas, a bioeconomia também está impulsionando inovações tecnológicas, especialmente em áreas como a agricultura 4.0 e a indústria 4.0, que prometem aumentar a eficiência dos processos produtivos e reduzir seu impacto ambiental. A aplicação de tecnologias emergentes, incluindo inteligência artificial e sensores, pode otimizar o uso de insumos e aumentar a qualidade do que é produzido, promovendo assim uma economia circular (Júnior, Rocha e Moreira, 2025; Maia, Shibata e Romão, 2021).

A implementação de estratégias para uma bioeconomia integrada deve considerar a diversidade e as peculiaridades regionais, visto que a Amazônia e outras regiões semelhantes apresentam características únicas que podem tanto favorecer o desenvolvimento sustentável quanto servir de barreira à sua efetivação (Picanço e Sobrinho, 2024; Maia, Shibata e Romão, 2021). A participação das comunidades locais na elaboração e na execução dessas estratégias é imprescindível para garantir que o desenvolvimento promovido seja realmente sustentável e traga benefícios diretos para quem lá vive, evitando, assim, a exploração e a apropriação indevida dos recursos locais (Dias, 2025; Marcovitch e Val, 2024).

A bioeconomia apresenta, portanto, um olhar renovado sobre como podemos utilizar nossos recursos naturais de maneira sustentável, criando oportunidades econômicas sem deixar de lado a responsabilidade ambiental. Para que a bioeconomia alcance seu potencial pleno, é essencial que estratégias integradas, devidamente regulamentadas e com participação ativa das comunidades locais sejam implementadas. Somente desta forma conseguiremos não apenas mitigar as mudanças climáticas, mas também garantir que o desenvolvimento econômico e social esteja em sintonia com a conservação e o respeito à biodiversidade que nos cerca (Bastos *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021).

## 2.2 ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS DE BIOECONOMIA PARA SUBSTITUIÇÃO DE FONTES FÓSSEIS

A bioeconomia, entendida como uma alternativa sustentável à economia dos combustíveis fósseis, tem ganhado destaque nas últimas décadas, especialmente em face das mudanças climáticas e da necessidade de um desenvolvimento econômico mais sustentável. As principais tecnologias associadas à bioeconomia, como biocombustíveis, bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), Biochar e biorrefinarias, desempenham papéis cruciais na transição para fontes renováveis de energia e produtividade sustentável.

Os biocombustíveis, feitos de matérias-primas biológicas, representam uma das alternativas mais promissoras às fontes de energia fósseis. A literatura indica que a produção de biocombustíveis a partir de biomassa pode oferecer uma fonte renovável de energia, além de ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Neiva *et al.*, 2022). Esses combustíveis têm demonstrado o potencial de reduzir significativamente as emissões de GEE em setores como o transporte e a indústria (Picanço *et al.*, 2024).

Outra tecnologia crucial na bioeconomia é a bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS). Esta estratégia busca produzir energia renovável e capturar as emissões de carbono resultantes desse processo. A implementação de unidades de BECCS em instalações de biocombustíveis pode resultar em reduções consideráveis nas emissões líquidas, contribuindo para o cumprimento de metas climáticas globais (Koury e Reymão, 2023). Estudos recentes enfatizam que as políticas públicas de incentivo ao BECCS são vitais para integrar essa tecnologia de forma eficaz na matriz energética (Bastos *et al.*, 2022).

Além de biocombustíveis e BECCS, o uso de Biochar tem se tornado um tópico recorrente nas discussões sobre soluções sustentáveis. O Biochar, um produto derivado da pirólise de biomassa, é reconhecido por suas propriedades que melhoram a qualidade do solo e a capacidade de sequestro de carbono (Hagemann *et al.*, 2016). Pesquisas têm mostrado que a incorporação de Biochar no solo não apenas melhora a retenção de água e nutrientes, mas também pode contribuir para a mitigação das emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Kamara *et al.*, 2015). Com a popularização do Biochar em práticas agrícolas, muitos agricultores têm relatado aumentos significativos na produtividade das culturas (Brantley *et al.*, 2015).

As biorrefinarias representam uma nova vertente dentro da bioeconomia que busca otimizar a conversão de biomassa em diversos produtos, incluindo biocombustíveis, bioquímicos e bioprodutos. As biorrefinarias estão alinhadas com os princípios da economia circular, promovendo a utilização eficiente dos recursos e minimizando os resíduos (Bastos *et al.*, 2022). Investigações sugerem que

essas instalações podem desempenhar um papel fundamental na criação de cadeias de suprimento mais sustentáveis, integrando tecnologias de ponta e inovação (Picanço *et al.*, 2024). A literatura relata casos de sucesso em biorrefinarias que produzem energia e geram produtos utilizados em diversas indústrias (Santos *et al.*, 2021).

Os setores de aplicação da bioeconomia incluem energia, indústria, agricultura e gestão de resíduos. No setor energético, a transição para biocombustíveis e bioenergia ajuda a diversificar a matriz elétrica e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, promovendo uma infraestrutura energética mais resiliente (Gutiérrez *et al.*, 2023). Na indústria, as biorrefinarias e a produção de bioquímicos sustentáveis têm o potencial de substituir produtos químicos tradicionais, reduzindo a pegada de carbono da produção industrial (Santos *et al.*, 2021). Na agricultura, a incorporação de Biochar e outros resíduos orgânicos resulta em solo mais fértil e produtivo, além de melhor manejo hídrico (Liu *et al.*, 2017). A gestão de resíduos também é transformada pela bioeconomia, onde a conversão de resíduos em bioenergia e biofertilizantes ajuda a criar um ciclo produtivo mais eficiente e menos poluente (Silva e Oliveira, 2021).

O potencial de redução de emissões associado à bioeconomia é substancial. Estudos estimam que, se implementadas em larga escala, essas tecnologias podem reduzir as emissões globais de GEE em até 70% até 2050, especialmente se integradas a políticas públicas eficazes e incentivos financeiros (Silva *et al.*, 2024). Exemplos de sucesso na implementação de tecnologias de bioeconomia são encontrados em diversas partes do mundo, incluindo projetos na Amazônia que buscam integrar a bioeconomia com práticas sustentáveis de manejo de recursos naturais (Koury e Reymão, 2023).

Iniciativas como essas demonstram que a bioeconomia não apenas promove um desenvolvimento mais sustentável, mas também pode gerar empregos e renda, especialmente em regiões como a Amazônia, onde o potencial de biodiversidade e recursos naturais é imenso (Silva *et al.*, 2024). A transição para uma economia baseada em biocombustíveis e bioprodutos ajuda a mitigar os impactos das mudanças climáticas e a valorizar os ecossistemas locais, promovendo uma relação mais harmoniosa entre economia e natureza (Silva e Oliveira, 2021).

A bioeconomia se apresenta como uma solução holística que enfrenta os desafios contemporâneos da sustentabilidade ambiental e propõe um novo paradigma de desenvolvimento socioeconômico. Integrando biocombustíveis, BECCS, Biochar e biorrefinarias em uma matriz produtiva inovadora, é possível vislumbrar um futuro onde a dependência de combustíveis fósseis seja reduzida consideravelmente, criando um ambiente mais saudável para as próximas gerações (Gutiérrez *et al.*, 2023).

### 3 METODOLOGIA

Este estudo consistiu em uma revisão sistemática crítica da literatura, com abordagem qualitativa, destinada a analisar como os modelos e práticas da bioeconomia, alinhados aos princípios de sustentabilidade, contribuem para a redução das emissões de carbono em diferentes setores e escalas, conforme documentado na produção científica recente.

A metodologia foi estruturada em cinco etapas principais, seguindo protocolos rigorosos de revisão e análise temática, conforme detalhado a seguir.

#### 3.1 DELINEAMENTO DA REVISÃO

A pesquisa pautou-se no protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), adaptado para sínteses qualitativas. O objetivo foi mapear, avaliar e sintetizar evidências sobre a contribuição da bioeconomia para a descarbonização, com ênfase em quatro dimensões alinhadas aos objetivos específicos:

- Conceitos e princípios da bioeconomia sustentável e sua relação com a mitigação climática;
- Estratégias e tecnologias baseadas em recursos biológicos para substituição de fontes fósseis;
- Desafios, limitações e *trade-offs* associados à expansão da bioeconomia;
- Lacunas de conhecimento e tendências emergentes de pesquisa.

#### 3.2 ESTRATÉGIA DE BUSCA E SELEÇÃO DE ESTUDOS

Foram consultadas as seguintes bases de dados, selecionadas por sua relevância nas áreas de sustentabilidade, energia, bioeconomia e ciências ambientais: Scopus, Web of Science, SciELO e PubMed.

Utilizou-se uma combinação de descritores controlados e não controlados em português e inglês, com os operadores booleanos AND e OR: ("bioeconomy" OR "bioeconomia") AND ("carbon emissions" OR "emissões de carbono" OR "decarbonization" OR "descarbonização") AND ("sustainability" OR "sustentabilidade") AND ("renewable resources" OR "recursos renováveis" OR "biomass" OR "biomassa").

##### 3.2.1 Critérios de Inclusão:

- Estudos publicados entre 2018 e 2025;
- Artigos em inglês, português ou espanhol;
- Abordagem teórica, empírica ou crítica relacionada à bioeconomia e redução de emissões;
- Foco em setores como energia, indústria, agricultura ou gestão de resíduos.

### 3.2.2 Critérios de Exclusão:

- Teses, dissertações, capítulos de livros e resumos de congressos;
- Estudos que não abordassem explicitamente a relação entre bioeconomia e mitigação de carbono;
- Publicações duplicadas ou sem acesso ao texto completo.

### 3.2.3 Processo de Triagem:

O processo de triagem dos artigos seguiu o protocolo PRISMA de forma rigorosa. A partir de um total de cinquenta artigos identificados nas bases de dados, foi realizada uma triagem inicial com base na análise de títulos e resumos. Desse modo, a amostra final foi composta por dez estudos, os quais foram incluídos para a subsequente análise qualitativa e síntese crítica.

## 3.3 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados dos artigos selecionados foram catalogados em uma planilha estruturada contendo:

- Metadados: autor, ano, país, título, periódico;
- Categorias analíticas: foco do estudo, metodologia, setor de abrangência, estratégias, mecanismos de redução de emissões, principais desafios e fatores de sucesso.

## 3.4 SÍNTESE CRÍTICA

Os dados extraídos foram interpretados à luz do referencial teórico da bioeconomia sustentável e da economia circular, com destaque para: (1) A eficácia das estratégias tecnológicas na redução de emissões; (2) os desafios comuns de implementação (políticos, tecnológicos, econômicos); (3) O papel de políticas públicas e cooperação internacional; (4) As particularidades regionais; (5) As tendências emergentes e lacunas de pesquisa identificadas.

A análise permitiu a construção de quadros sintéticos (Quadros 1, 2 e 3) que organizam visualmente as evidências e facilitam a discussão crítica dos resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O trabalho analisou um conjunto de dez estudos científicos selecionados a partir de um grupo inicial de cinquenta, utilizando critérios de elegibilidade para garantir a relevância e o alinhamento temático com os objetivos da pesquisa. Cada estudo foi minuciosamente revisado, com atenção aos aspectos metodológicos, ao setor de abrangência e ao foco principal, permitindo uma compreensão

abrangente das diferentes abordagens sobre bioeconomia e redução de emissões de carbono, cujas principais características estão sintetizadas no Quadro 1:

Quadro 1 – características dos estudos incluídos

| Estudo                             | Foco  | Metodologia  | Abrangência do setor  |
|------------------------------------|---|--|---|
| Kusuma <i>et al.</i> (2022)        | Transição sustentável para a indústria de cimento à base de biomassa                                | Revisão sistemática; perspectiva multinível; Análise de políticas  | Cimento (industrial), biocombustíveis (energia)   |
| Idoko <i>et al.</i> (2024)         | Papel da bioenergia na utilização sustentável de resíduos e na transição de baixo carbono           | Métodos mistos (revisão sistemática, avaliação do ciclo de vida, pegada de carbono, estudos de caso)   | Bioenergia (energia), gestão de resíduos  |
| Machado <i>et al.</i> (2019)       | Potencial da bioeconomia para reduzir as emissões brasileiras de gases de efeito estufa             | Modelagem (Equilíbrio Geral Computável, Avaliação do Ciclo de Vida de Insumo-Produto Ambientalmente Estendido)   | Energia (biocombustíveis, bioeletricidade), produtos químicos, agricultura, silvicultura, pecuária                          |
| Yan <i>et al.</i> (2024)           | Desenvolvimento de baixo carbono em parques industriais chineses via bioeconomia                    | Revisão sistemática; qualitativo; Análise de políticas   | Parques industriais (industriais), energia/materiais de base biológica  |
| Bauer <i>et al.</i> (2018)         | Reduções globais de emissões e uso de bioenergia (Fórum de Modelagem Energética 33)                 | Modelagem (Modelos de Avaliação Integrada)   | Energia (biocombustíveis, bioenergia com captura e armazenamento de carbono)  |
| Christianides <i>et al.</i> (2025) | Emissões de dióxido de carbono biogénico no sector dos biocombustíveis/bioenergia da União Europeia | Análise quantitativa; Análise de políticas   | Biocombustíveis, biogás, biometano, gás de síntese, combustão/pirólise (energia) de biomassa, silvicultura                  |
| Stegmann <i>et al.</i> (2020)      | Bioeconomia circular em clusters europeus   | Revisão sistemática; qualitativo (entrevistas)   | Biomassa (energia), plásticos, construção (industrial), biorrefinarias  |
| Kurniawan <i>et al.</i> (2023)     | Biochar para economia circular e neutralidade de carbono  | Revisão sistemática; qualitativo (entrevistas)   | Biochar (agricultura, energia), economia circular   |
| Raman <i>et al.</i> (2025)         | Biocombustíveis, biomassa, bioenergia e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável                    | Revisão sistemática; métodos mistos (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, machine learning, BERTopic); Análise de políticas | Biocombustíveis, biomassa, bioenergia (energia)   |
| Vostriakova (2022)                 | Transformação bioeconômica para descarbonização   | Quantitativo (regressão); Análise teórica  | Energia (fontes de energia renováveis, captura e utilização/armazenamento de carbono), indústria, agricultura, silvicultura |

Fonte: elaborado pelos próprios autores (2025)

Kusuma *et al.* (2022) dedicaram-se à transição sustentável na indústria de cimento com base em biomassas, utilizando uma revisão sistemática e uma perspectiva multinível, com aplicação nos setores industrial e energético. Idoko *et al.* (2024) exploraram o papel da bioenergia na gestão sustentável de resíduos e na transição para baixo carbono, recorrendo a métodos mistos que incluíram

revisão sistemática, avaliação do ciclo de vida e estudos de caso, com foco nos setores de energia e resíduos. Machado *et al.* (2019) avaliaram o potencial da bioeconomia para reduzir emissões de gases de efeito estufa no Brasil através de modelagem de equilíbrio geral computável e avaliação do ciclo de vida, abrangendo setores como energia, agricultura, silvicultura e pecuária.

Yan *et al.* (2024) examinaram o desenvolvimento de baixo carbono em parques industriais chineses impulsionado por estratégias de bioeconomia, utilizando uma revisão sistemática e análise qualitativa de políticas, com aplicação no setor industrial e em materiais de base biológica. Bauer *et al.* (2018) focaram-se nas reduções globais de emissões e no uso de bioenergia, utilizando modelos de avaliação integrada, com especial relevo para o setor energético. Christianides *et al.* (2025) analisaram as emissões de dióxido de carbono biogénico no setor de bioenergia da União Europeia, utilizando métodos quantitativos e análise de políticas, com aplicação em biocombustíveis, silvicultura e tecnologias de conversão de biomassa.

Stegmann *et al.* (2020) investigaram a bioeconomia circular em clusters europeus, através de revisão sistemática e abordagem qualitativa com entrevistas, abrangendo setores como biomassa, plásticos, construção e biorrefinarias. Kurniawan *et al.* (2023) exploraram o uso de Biochar para economia circular e neutralidade carbónica, utilizando revisão sistemática e métodos qualitativos, com aplicação na agricultura e energia. Raman *et al.* (2025) analisaram as contribuições de biocombustíveis, biomassa e bioenergia para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, utilizando revisão sistemática com métodos mistos e análise de tópicos, com foco no setor energético. Por fim, Vostriakova (2022) estudou a transformação bioeconômica para a descarbonização, utilizando métodos quantitativos e análise teórica, com aplicação nos setores de energia, indústria, agricultura e silvicultura.

Esta diversidade de abordagens e setores reflete a multidimensionalidade da bioeconomia como estratégia de mitigação das alterações climáticas e oferece uma base sólida para a análise crítica realizada no trabalho.

#### 4.1 ANÁLISE TEMÁTICA

A presente seção expõe e debate os resultados da análise crítica da literatura científica, organizados em dois eixos temáticos centrais que estruturam a discussão e respondem aos objetivos deste trabalho. A investigação buscou analisar como os modelos da bioeconomia contribuem para a redução das emissões de carbono, e a discussão se desenvolve a partir de uma lógica que parte das estratégias operacionais até os seus efeitos e complexidades sistêmicas.

O primeiro eixo temático, estratégias de implementação da bioeconomia, detalha o conjunto de ações e tecnologias identificadas na literatura, categorizando suas aplicações setoriais específicas, seu status atual de maturidade e sua eficácia reportada na substituição de fontes fósseis e na redução de emissões líquidas de gases de efeito estufa. O segundo eixo temático, impactos intersetoriais da redução de carbono, avança na discussão para analisar os mecanismos de redução de emissões, os desafios de implementação e os fatores críticos de sucesso que permeiam a aplicação dessas estratégias.

A discussão, portanto, é sustentada pela integração dessas duas dimensões. Os quadros analíticos construídos fornecem a base factual para este exame, permitindo contrastar perspectivas da literatura e avaliar a viabilidade e o impacto multifacetado das diversas vias da bioeconomia na transição para uma economia de baixo carbono, culminando na identificação de tendências e lacunas de conhecimento.

O Quadro 2 sintetiza as principais estratégias de implementação da bioeconomia identificadas na literatura, destacando suas aplicações setoriais, status de implementação e eficácia reportada na redução de emissões de carbono.

Quadro 2 - Estratégias de Implementação da Bioeconomia

| Estudo                       | Estratégia   | Aplicação do setor                 | Status de implementação  | Eficácia   |
|------------------------------|--|------------------------------------|--|--|
| Kusuma <i>et al.</i> (2022)  | Substituição de combustível (20–30%); substituição de clínquer (3–80%); bioenergia com captura e armazenamento de carbono; Otimização de processos | Cimento, energia                   | Algumas estratégias prontas (sem grandes capitais); política de necessidades de todo o sistema | Potencial quantitativo; escalável com política   |
| Idoko <i>et al.</i> (2024)   | Integração da bioenergia na economia circular; estruturas políticas de apoio   | Bioenergia, resíduos               | Conceitual; implementação prejudicada por política/tecnologia/custo                            | Mitigação significativa de gases de efeito estufa; Desafios limitam a escala                         |
| Machado <i>et al.</i> (2019) | Biomassa em energia (18%); renováveis (45%); reflorestação; intensificação da pecuária   | Energia, agricultura, silvicultura | Possibilidade de implantação em larga escala; Questões de uso da terra                         | redução de 7,5% no setor de energia; Uso do solo, alteração do uso do solo e compensações florestais |
| Yan <i>et al.</i> (2024)     | Energia/materiais de base biológica; bioeconomia em nível de sistema; Integração de políticas  | Parques industriais                | Estágio inicial; foco no nível da unidade; nascente no nível do sistema                        | Potencial alto; precisa de política e integração   |
| Bauer <i>et al.</i> (2018)   | Bioenergia com captura e armazenamento de carbono; alocação de bioenergia; Pesquisa e  | Energia                            | Bioenergia com captura e armazenamento de carbono e bioenergia                                 | 600-1300 gigatoneladas de remoção de dióxido de  |

|                                    | desenvolvimento orientados para políticas  |                                 | destacável; restrições de tecnologia/custo   | carbono; robusto em mitigação   |
|------------------------------------|--|---------------------------------|--|---|
| Christianides <i>et al.</i> (2025) | Resíduos florestais; Bioenergia com captura e armazenamento de carbono                               | Bioenergia, silvicultura        | Bioenergia com captura e armazenamento de carbono em alguns estados da União Europeia; lacunas de infraestrutura | Emissões negativas possíveis; adoção desigual   |
| Stegmann <i>et al.</i> (2020)      | Resíduos/resíduos; biorrefinarias; Soluções circulares   | Biomassa, plásticos, construção | Foco crescente; fim de vida subdesenvolvido  | Potencial de sustentabilidade; Barreiras políticas/de mercado                               |
| Kurniawan <i>et al.</i> (2023)     | Biochar para solo/adsorvente; Gestão baseada na economia circular                                    | Agricultura, energia            | Conceitual; estratégias de gestão ausentes   | 12% de compensação de dióxido de carbono; potencial de economia líquida zero/circular       |
| Raman <i>et al.</i> (2025)         | Biocombustíveis (primeira a quarta geração); inteligência artificial; política/colaboração           | Bioenergia                      | Emergentes; precisa de investimento/capacidade   | Redução de gases de efeito estufa, alinhamento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| Vostriakova (2022)                 | Fontes de energia renováveis, captura e utilização/armazenamento de carbono, priorização de biomassa | Indústria energética            | Cedo; falta de apoio legislativo   | Os modelos se encaixam em ~ 30% de fontes de energia renováveis; potencial alto             |

Fonte: elaborado pelos próprios autores (2025)

Conforme Kusuma *et al.* (2022), a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis e a utilização de cinzas de biomassa na indústria cimenteira apresentam potencial quantitativo significativo, embora dependam de políticas públicas robustas e otimização de processos. Idoko *et al.* (2024) ressaltam o papel da integração da bioenergia na economia circular, especialmente no setor de resíduos, apontando para uma mitigação expressiva de gases de efeito estufa, ainda que limitada por desafios tecnológicos e de custo.

No contexto brasileiro, Machado *et al.* (2019) demonstram que o uso de biomassa para energia e o reflorestamento podem reduzir em 7,5% as emissões no setor energético, embora alertem para os impactos do uso da terra e das mudanças indiretas no uso do solo. Yan *et al.* (2024) enfatizam o potencial de parques industriais chineses na adoção de materiais de base biológica, ainda em estágio inicial, requerendo integração sistêmica e suporte político. Bauer *et al.* (2018) destacam a bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) como estratégia robusta, capaz de promover a remoção de 600 a 1300 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>, dependendo de avanços tecnológicos e arcabouços internacionais.

Christianides *et al.* (2025) analisam a adoção desigual de BECCS na União Europeia, com destaque para o uso de resíduos florestais, mas identificam lacunas infraestruturais como entraves. Stegmann *et al.* (2020) abordam a bioeconomia circular em clusters europeus, com foco em biorrefinarias e aproveitamento de resíduos, embora reconheçam barreiras políticas e de mercado. Kurniawan *et al.* (2023) avaliam o Biochar como alternativa promissora para sequestro de carbono e economia circular, com potencial de compensar 12% das emissões, mas ressaltam a carência de estratégias de gestão adequadas.

Raman *et al.* (2025) discutem o emergente uso de biocombustíveis de quarta geração e inteligência artificial, alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, mas dependentes de investimento e capacidade tecnológica. Por fim, Vostriakova (2022) destaca o uso de fontes renováveis e captura de carbono em setores energético e industrial, com alto potencial, porém limitado pela falta de suporte legislativo e adaptação regulatória.

As estratégias mapeadas evidenciam um cenário diversificado e promissor, porém marcado por desafios de ordem técnica, econômica e política, que influenciam diretamente sua eficácia e escalabilidade.

O Quadro 3 sintetiza os mecanismos de redução de carbono, os desafios de implementação e os fatores críticos de sucesso associados às estratégias de bioeconomia analisadas.

Quadro 3 - Impactos intersetoriais da redução de carbono

| Estudo                             | Mecanismos de redução  | Desafios de implementação                | Fatores de sucesso  |
|------------------------------------|--|--|---|
| Kusuma <i>et al.</i> (2022)        | Biocombustíveis, cinzas de biomassa, bioenergia com captura e armazenamento de carbono | Política, coordenação setorial           | Intervenção política, otimização de processos                     |
| Idoko <i>et al.</i> (2024)         | Bioenergia a partir de resíduos  | Política, tecnologia, custo              | Integração da economia circular                                   |
| Machado <i>et al.</i> (2019)       | Biomassa, energias renováveis, reflorestamento   | Desmatamento, uso da terra               | Reflorestamento, manejo da pecuária                               |
| Yan <i>et al.</i> (2024)           | Energia/materiais de base biológica  | Alinhamento e integração de políticas    | Política, inovação em nível de sistema                            |
| Bauer <i>et al.</i> (2018)         | Bioenergia com captura e armazenamento de carbono, alocação de bioenergia              | Tecnologia/custo, uso da terra, política | Investigação e desenvolvimento, política internacional            |
| Christianides <i>et al.</i> (2025) | Bioenergia com captura e armazenamento de carbono, resíduos florestais                 | Infraestrutura, adoção de tecnologia     | Principais modelos de países, investimento                        |
| Stegmann <i>et al.</i> (2020)      | Resíduos, biorrefinarias, circularidade  | Política, custo, tamanho do mercado      | Política, desenvolvimento do mercado                              |
| Kurniawan <i>et al.</i> (2023)     | Biochar, economia circular   | Lacunas de gestão e pesquisa             | Gestão baseada na economia circular, alinhamento dos Objetivos de |

|                            |   |                                   |   |
|----------------------------|---|-----------------------------------|---|
|                            |   |                                   | Desenvolvimento Sustentável                 |
| Raman <i>et al.</i> (2025) | Biocombustíveis, inteligência artificial, política                                    | Investimento, capacidade          | Política, colaboração, tecnologia           |
| Vostriakova (2022)         | Fontes de energia renováveis, captura e utilização/armazenamento de carbono, biomassa | Legislação, adaptação regulatória | Normas da União Europeia, adaptação gradual |

Fonte: elaborado pelos próprios autores (2025)

Conforme Kusuma *et al.* (2022), os mecanismos incluem a utilização de biocombustíveis, cinzas de biomassa e bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), cuja eficácia depende fortemente de intervenções políticas e da otimização de processos industriais. Idoko *et al.* (2024) destacam a geração de bioenergia a partir de resíduos como mecanismo central, mas alertam para obstáculos relacionados a políticas setoriais, custos tecnológicos e a necessidade de integração com princípios de economia circular.

No contexto brasileiro, Machado *et al.* (2019) identificam no uso de biomassa, energias renováveis e reflorestamento mecanismos eficazes para a redução de emissões, embora enfrentem desafios significativos como o desmatamento e conflitos de uso da terra, sendo o manejo sustentável da pecuária e políticas de reflorestamento fatores determinantes para o sucesso. Yan *et al.* (2024) enfatizam a importância do alinhamento e da integração de políticas públicas para viabilizar o uso de materiais de base biológica em parques industriais, apontando a inovação em nível sistêmico como fator crucial.

Bauer *et al.* (2018) ressaltam o papel da BECCS e da alocação estratégica de bioenergia como mecanismos robustos para a mitigação global, mas reconhecem que limitações tecnológicas, custos elevados e disputas pelo uso da terra representam desafios substanciais, exigindo cooperação internacional e investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Christianides *et al.* (2025) corroboram esse panorama ao destacarem que a infraestrutura inadequada e a adoção desigual de tecnologias de captura de carbono entre países europeus dificultam a plena realização do potencial da bioenergia, dependendo de modelos de referência e investimentos direcionados.

Stegmann *et al.* (2020) identificam na valorização de resíduos e no desenvolvimento de biorrefinarias mecanismos promissores para a circularidade, mas apontam que a escala limitada do mercado, os custos operacionais e a insuficiência de marcos regulatórios consistem em barreiras significativas, superáveis por meio de políticas de fomento e desenvolvimento de mercado. Kurniawan *et al.* (2023) discutem o uso de Biochar e modelos de economia circular como vias para a neutralidade

de carbono, mas alertam para a carência de frameworks de gestão e pesquisa aplicada, sendo o alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável um fator habilitador essencial.

Raman *et al.* (2025) enfatizam a contribuição de biocombustíveis avançados e inteligência artificial para a descarbonização, embora destaquem a necessidade de investimentos em capacidade tecnológica e políticas colaborativas entre setores. Por fim, Vostriakova (2022) analisa o potencial de fontes renováveis, captura e armazenamento de carbono, e priorização de biomassa, cuja implementação é dificultada pela falta de suporte legislativo e adaptação regulatória, dependendo de normativas harmonizadas, como as da União Europeia, e de uma transição gradual.

Em conjunto, os estudos revelam que a efetividade dos mecanismos de redução de carbono está intrinsecamente ligada à superação de desafios técnicos, econômicos e regulatórios, sendo o suporte político, a inovação sistêmica e a cooperação internacional fatores indispensáveis para a realização de uma bioeconomia sustentável e baixo carbono.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu analisar criticamente, a partir da literatura científica recente, de que forma os modelos e práticas da bioeconomia, alinhados aos princípios de sustentabilidade, contribuem para a redução das emissões de carbono em diversos setores e escalas. A revisão sistemática realizada evidenciou que a bioeconomia sustentável se configura como um paradigma socioeconômico promissor, capaz de integrar a utilização de recursos biológicos renováveis a processos produtivos de baixo carbono, promovendo assim a transição para uma economia mais circular e menos dependente de fontes fósseis.

Os resultados demonstram que estratégias como a produção de biocombustíveis, a implementação de bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), a aplicação de Biochar e o desenvolvimento de biorrefinarias apresentam potencial significativo para substituir combustíveis fósseis e reduzir emissões líquidas de gases de efeito estufa. Contudo, a eficácia e a escalabilidade dessas tecnologias estão condicionadas a superação de desafios de ordem técnica, econômica e política, incluindo a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento, a criação de marcos regulatórios adequados e a integração de políticas setoriais.

Além disso, a análise destacou a importância do contexto regional, em especial no bioma Amazônico, onde a bioeconomia pode aliar conservação ambiental e desenvolvimento social, desde que implementada com participação comunitária e respeito à biodiversidade. Identificaram-se ainda lacunas de conhecimento, sobretudo no que tange à integração sistêmica das tecnologias e aos *trade-offs* associados ao uso da terra e à competição por recursos.

Em síntese, a bioeconomia sustenta-se como uma via viável e necessária para a descarbonização, mas sua consolidação exigirá cooperação internacional, inovação contínua e compromisso político para harmonizar objetivos econômicos, ambientais e sociais. Futuras pesquisas deverão focar na avaliação de impactos em larga escala, na otimização de cadeias produtivas e no desenvolvimento de modelos inclusivos que garantam a equidade e a sustentabilidade em longo prazo.

## REFERÊNCIAS

- BASTOS, B.; LOPES, J.; GONÇALVES, A.; NEIVA, K. Bioeconomia, economia circular e agroindústria 4.0: proposições para as transições tecnológicas emergentes. *Colóquio - Revista do Desenvolvimento Regional*, v. 19, n. 1, p. 312-338, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26767/2375>. Acesso em: 8 de ago. 2025.
- BAUER, N. et al. Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. *Climatic Change*, v. 163, p. 1603–1620, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/326133133\\_Global\\_energy\\_sector\\_emission\\_reductions\\_and\\_bioenergy\\_use\\_overview\\_of\\_the\\_bioenergy\\_demand\\_phase\\_of\\_the\\_EMF-33\\_model\\_comparison](https://www.researchgate.net/publication/326133133_Global_energy_sector_emission_reductions_and_bioenergy_use_overview_of_the_bioenergy_demand_phase_of_the_EMF-33_model_comparison). Acesso em: 11 de ago. 2025.
- BRANTLEY, K. et al. Pine woodchip biochar impact on soil nutrient concentrations and corn yield in a silt loam in the mid-southern U.S. *Agriculture*, v. 5, n. 1, p. 30-47, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture5010030>. Acesso em: 8 de ago. 2025.
- CHRISTIANIDES, D. et al. Biogenic CO2 Emissions in the EU Biofuel and Bioenergy Sector: Mapping Sources, Regional Trends, and Pathways for Capture and Utilisation. *Energies*, v. 18, n. 1, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/6/1345>. Acesso em: 10 de ago. 2025.
- DIAS, R. Bioeconomia, inclusão social e sustentabilidade: caminhos para uma transição verde e justa. *Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar* - ISSN 2675-6218, v. 6, n. 3, e636303, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v6i3.6303>. Acesso em: 8 de ago. 2025.
- FATTORI, M.; SOUZA, M. Bioeconomia e os objetivos de desenvolvimento sustentável. *Journal of Education Science and Health*, v. 5, n. 1, p. 1-9, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.52832/jesh.v5i1.530>. Acesso em: 8 de ago. 2025.
- GUTIÉRREZ, L. et al. Bioeconomia e sociobiodiversidade na perspectiva agroecológica para o bem viver. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 18, n. 1, p. 129-150, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33240/rba.v18i1.23741>. Acesso em: 8 de ago. 2025.
- HAGEMANN, N. et al. Does soil aging affect the N2O mitigation potential of biochar? A combined microcosm and field study. *GCB Bioenergy*, v. 9, n. 5, p. 953-964, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12390>. Acesso em: 8 de ago. 2025.
- IDOKO, I. P. et al. Exploring the Role of Bioenergy in Achieving Sustainable Waste Utilization and Promoting Low-Carbon Transition Strategies. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 2024. Disponível em: <https://ijsrst.com/index.php/home/article/view/IJSRST241161112>. Acesso em: 11 de ago. 2025.
- JÚNIOR, J.; ROCHA, S.; MOREIRA, D. Estado da arte da produção de bebidas artesanais a partir de frutas amazônicas com foco em processos sustentáveis e inovação tecnológica. *Revft*, v. 29, n. 142, p. 47-48, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.69849/revistaft/ra10202501111447>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

KAMARA, A.; KAMARA, H.; KAMARA, M. Effect of rice straw biochar on soil quality and the early growth and biomass yield of two rice varieties. *Agricultural Sciences*, v. 06, n. 08, p. 798-806, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/as.2015.68077>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

KOURY, S.; REYMÃO, A. Mudanças climáticas, bioeconomia e trabalho decente na Amazônia. *Jus Scriptum*, v. 8, n. 3, p. 69-106, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/238407.8.3-4>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

KURNIAWAN, T. et al. Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *Journal of Environmental Management*, v. 345, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479723002177?via%3Dihub>. Acesso em: 10 de ago. 2025.

KUSUMA, R. T. et al. Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 168, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122004075?via%3Dihub>. Acesso em: 10 de ago. 2025.

LIU, Z. et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLOS ONE*, v. 12, n. 6, e0179079, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

MACHADO, P. G. et al. The potential of a bioeconomy to reduce Brazilian GHG emissions towards 2030: a CGE-based life cycle analysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 2, p. 420–434, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337430231\\_The\\_potential\\_of\\_a\\_bioeconomy\\_to\\_reduce\\_Brazilian\\_GHG\\_emissions\\_towards\\_2030\\_a\\_CGE-based\\_life\\_cycle\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/337430231_The_potential_of_a_bioeconomy_to_reduce_Brazilian_GHG_emissions_towards_2030_a_CGE-based_life_cycle_analysis). Acesso em: 11 de ago. 2025.

MAIA, V.; SHIBATA, A.; ROMÃO, E. Revisão dos novos modelos de produção: economia circular, bioeconomia e biossociedade. *Research Society and Development*, v. 10, n. 9, e59610918539, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.18539>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

MARCOVITCH, J.; VAL, A. Bioeconomia para quem?: bases para um desenvolvimento sustentável na Amazônia. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786589321453>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

MEJIAS, R. Bioeconomia e suas aplicações. *Ândé Ciências e Humanidades*, v. 2, n. 3, p. 105-121, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.36942/iande.v2i3.87>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

MOREIRA, D.; MANZATTO, Â. A contribuição da bioeconomia ao desenvolvimento sustentável na amazônia: uma análise cienciométrica. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 5, e4517, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv22n5-029>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

NEIVA, K. et al. Bioeconomia: Um ensaio teórico sobre as dimensões das abordagens conceituais das partes interessadas. *Ciência e Natura*, v. 44, e16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460x67555>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

NEIVA, K.; GONÇALVES, A.; LOPES, J.; VASCONCELOS, A. O papel da biodiversidade nas proposições da bioeconomia. Colóquio - Revista do Desenvolvimento Regional, v. 19, n. 3, p. 218-242, jul./set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.26767/2249>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

PICANÇO, C. et al. Política pública de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação na bioeconomia da amazônia ocidental: uma análise com abordagem de rede e cognitiva no programa prioritário de bioeconomia. Revista Caderno Pedagógico, v. 21, n. 1, p. 3509-3521, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n1-186>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

PICANÇO, C.; SOBRINHO, M. Bioeconomia biotecnológica na amazônia ocidental. P2P e Inovação, v. 10, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21728/p2p.2024v10n2e-6886>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

RAMAN, R. et al. Analyzing the contributions of biofuels, biomass, and bioenergy to sustainable development goals. iScience, v. 28, n. 6, 2025. Disponível em: [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(25\)00418-3?\\_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004225004183%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(25)00418-3?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2589004225004183%3Fshowall%3Dtrue). Acesso em: 10 de ago. 2025.

SANTOS, A.; ROCHA, J.; MAFRA, R.; FERREIRA, M. A relevância da bioeconomia para o desenvolvimento regional: estudo de caso em uma empresa de biocosméticos do estado do Amazonas. Informe GEPEC, v. 25, p. 91-108, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/igepec.v25i0.26305>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

SANTOS, R. O ecossistema de inovação no estado do Pará: um panorama sustentável para a bioeconomia local. Revista Foco, v. 16, n. 5, e1730, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n5-091>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

SILVA, L. et al. Cooperativismo e bioeconomia: desafios para o desenvolvimento sustentável na amazônia. Peer Review, v. 6, n. 10, p. 204-219, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1168272/cooperativismo-e-bioeconomia-desafios-para-o-desenvolvimento-sustentavel-na-amazonia>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

SILVA, M.; OLIVEIRA, M. A bioeconomia como alternativa complementar ao modelo de desenvolvimento do Amazonas. Informe GEPEC, v. 25, p. 46-65, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/igepec.v25i0.26297>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

STEGMANN, P.; LONDO, M.; JUNGMINER, M. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. Resources, Conservation and Recycling: X, v. 6, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590289X1930026X?via%3Dihub>. Acesso em: 11 de ago. 2025.

TEIXEIRA, T.; MENDES, F. Valorization of acai waste from processing agro-industry: A review. Research Society and Development, v. 12, n. 11, e126121143799, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i11.43799>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

VOSTRIAKOVA, V. The role of sustainable bioeconomic transformation in the long-term strategy of decarbonization. Herald UNU. International Economic Relations and World Economy, v. 22, n. 1, 2022. Disponível em: [http://visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/43\\_2022ua/8.pdf](http://visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/43_2022ua/8.pdf). Acesso em: 10 de ago. 2025.

WILLERDING, A. et al. Estratégias para o desenvolvimento da bioeconomia no estado do Amazonas. Estudos Avançados, v. 34, n. 98, p. 145-166, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.3498.010>. Acesso em: 8 de ago. 2025.

YAN, K. et al. Review on low-carbon development in Chinese industrial parks driven by bioeconomy strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 189, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032124002648?via%3Dihub>. Acesso em: 11 de ago. 2025.