

## ECONOMIA CIRCULAR NO AGRONEGÓCIO: uma revisão bibliográfica (2020–2025)

FRISKE, Hadassa Landherr<sup>1</sup>  
MATTA, Adno Ferreira da<sup>2</sup>  
NOVAES, Cristiane Dias de<sup>3</sup>  
CORREA, Daiane<sup>4</sup>  
SOUZA, Marcelo Fernando Pereira<sup>5</sup>

Recebido em 27 de junho de 2025. Aceito em 01 de julho de 2025. Disponível online em 28 de agosto de 2025.

### RESUMO:

Este estudo realiza uma revisão sistemática da produção científica sobre Economia Circular (EC) no agronegócio, publicada entre 2020 e 2025. Seguindo o protocolo PRISMA, 1 126 registros foram inicialmente recuperados em cinco bases de dados; após triagem e critérios de elegibilidade, analisaram-se 92 artigos revisitados por pares e 11 relatórios técnicos. Os objetivos centrais foram (i) mapear as tecnologias habilitadoras de circularidade mais recorrentes e (ii) avaliar os indicadores e métricas de desempenho utilizados em estudos de caso agroalimentares. Verificou-se predominância de rotas biológicas: digestão anaeróbia (53 % dos trabalhos) mostrou redução média de 80 % nas emissões de metano e forneceu digestato substituto de fertilizantes; pirólise rápida (29 %) destacou-se pelo potencial de produção de bio-óleo e biochar com sequestro de carbono; soluções digitais — IoT, roteirização algorítmica e blockchain — apareceram em 18 % dos artigos, ampliando rastreabilidade e eficiência logística. Quanto às métricas, o *Material Circularity Indicator* (38 %) e a Análise de Fluxo de Matéria territorial (26 %) foram os mais aplicados, ao passo que indicadores socioeconômicos surgiram em apenas 9 % dos estudos, evidenciando lacuna crítica. Conclui-se que a consolidação da EC no agronegócio depende de políticas de incentivo, padronização de métricas multidimensionais e modelos de governança que promovam inclusão de pequenos produtores e distribuição justa de riscos e benefícios.

**Palavras-chave:** Economia Circular; Agronegócio; Tecnologias habilitadoras; Indicadores de desempenho; Revisão sistemática.

### ABSTRACT:

This paper presents a systematic review of Circular Economy (CE) research in agribusiness published from 2020 to 2025. Using the PRISMA protocol, 1 126 records were retrieved from five databases; after screening and eligibility checks, 92 peer-reviewed articles and 11 technical reports were examined. The review aimed (i) to map the most frequently cited enabling

<sup>1</sup> Doutoranda em Ciências Contábeis e Administração pela FUCAPE – ES e professora titular na FAF.  
E-mail: hadassalf13@gmail.com.

<sup>2</sup> Bacharel em Ciências Contábeis e professor titular na FAF.

<sup>3</sup> Bacharela em Administração e professora titular na FAF.

<sup>4</sup> Engenheira Agrônoma, Doutora em Produção Vegetal e professora titular na FAF.

<sup>5</sup> Doutor em Agronomia e professor titular na FAF.

technologies for circularity and (ii) to assess the indicators and metrics employed to measure circular performance in agri-food case studies. Biological routes predominated: anaerobic digestion (53 % of studies) achieved an average 80 % reduction in methane emissions and supplied digestate that substitutes mineral fertilisers; fast pyrolysis (29 %) was noted for producing bio-oil and biochar with long-term carbon sequestration; digital solutions — IoT, algorithmic routing and blockchain — featured in 18 % of papers, enhancing traceability and logistics efficiency. Regarding metrics, the Material Circularity Indicator (38 %) and territorial Material Flow Analysis (26 %) were most common, whereas socio-economic indicators appeared in only 9 % of studies, revealing a significant gap. The findings indicate that mainstreaming CE in agribusiness requires supportive policies, harmonised multidimensional metrics and governance models that ensure the inclusion of smallholders and an equitable sharing of risks and benefits.

**Keywords:** Circular Economy; Agribusiness; Enabling technologies; Performance indicators; Systematic review.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de alimentos precisará crescer entre 50 % e 70 % até 2050 para atender a uma população estimada em 9,7 bilhões de pessoas (FAO, 2024). O atual modelo linear de produção agroalimentar – baseado em extração, transformação, consumo e descarte – contribui de forma significativa para o esgotamento de recursos naturais, perda de biodiversidade e mudanças climáticas. Relatórios do IPCC (2023) indicam que o sistema agroalimentar representa aproximadamente 28 % das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). Além disso, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2024) estima a geração anual de 4,6 Gt de resíduos agroindustriais, dos quais menos de 20 % são adequadamente valorizados.

Neste contexto, a Economia Circular (EC) surge como paradigma capaz de redirecionar a trajetória de desenvolvimento do agronegócio rumo à sustentabilidade. Suas raízes teóricas remontam aos estudos de Boulding (1966) sobre o "planeta finito" e de Stahel (1982) a respeito da lógica do *cradle-to-cradle*. Entretanto, foi a Ellen MacArthur Foundation (2021) que consolidou o conceito, definindo-o como um sistema econômico restaurativo e regenerativo por intenção e concepção.

Embora a EC envolva múltiplas dimensões, esta revisão concentra-se em estratégias de circularidade aplicáveis ao agronegócio, com ênfase em três eixos estratégicos:

1. Bioconversão de resíduos agropecuários e agroindustriais em biofertilizantes, bioplásticos e bioenergia;

2. Design de cadeias de suprimento circulares, incluindo logística reversa, simbiose industrial e upcycling de subprodutos;
3. Plataformas digitais e políticas indutoras que facilitem monitoramento, rastreabilidade e incentivos econômicos à circularidade.

Apesar do aumento exponencial de publicações sobre EC, a aplicação prática de seus princípios no agronegócio ainda carece de consolidação conceitual e metodológica. O objetivo geral deste artigo é revisar e sistematizar a produção científica nacional e internacional publicada entre 2020 e 2025, identificando barreiras, oportunidades e lacunas de pesquisa para a adoção de modelos circulares no setor. E os objetivos específicos são: Mapear tecnologias habilitadoras de circularidade mais citadas na literatura recente e Avaliar indicadores e métricas de desempenho circular utilizados em estudos de caso agroalimentares.

O agronegócio brasileiro representa 24,8 % do Produto Interno Bruto (CEPEA, 2025) e posiciona-se como maior exportador mundial de soja, café e proteína animal. A transição para a EC é estratégica para manter competitividade, cumprir compromissos climáticos (CASTRO, FREITAS e PACHECO, 2024) e atender à crescente demanda de consumidores e investidores por produtos sustentáveis e rastreáveis.

Além desta introdução, o artigo está estruturado em quatro seções adicionais: (2) Referencial Teórico, que aprofunda definições, princípios, tecnologias e métricas de EC no agronegócio; (3) Metodologia de revisão sistemática; (4) Resultados e Discussões, onde são analisadas evidências empíricas por eixo temático; e (5) Conclusão, com recomendações para pesquisa e prática. O artigo encerra com a lista completa de referências.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONCEITUAÇÃO DE ECONOMIA CIRCULAR

A EC pode ser compreendida como a antítese do modelo linear, propondo ciclos fechados de materiais e energia por meio de recirculação, reutilização, remanufatura, reciclagem e recuperação (GEISSDOERFER *et al.*, 2020). A Ellen MacArthur Foundation (2021) sintetiza seus três princípios fundantes: (i) eliminar resíduos e poluição; (ii) manter produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível; e (iii) regenerar sistemas naturais.

#### 2.1.1 Evolução histórica

Pode dividir a evolução história em três períodos:

- **Década de 1960 – 1980:** Boulding (1966) introduz a metáfora da "nave espacial Terra"; Stahel (1982) discute ciclos fechados de recursos.
- **1990 – 2010:** Emergência do conceito de *Industrial Ecology* (FROSCH; GALLUPPI, 1989) e *Life Cycle Assessment* (ISO 14040, 2006).
- **2010 – presente:** Consolidação e *mainstreaming* do termo Economia Circular, culminando em planos nacionais (UE, 2020; China, 2021) e marcos regulatórios no Brasil (PNRS, 2024).

### 2.1.2 Hierarquia dos R-loops

Potting *et al.* (2021) propõem, dentro da EC a utilização da hierarquia dos “10 R” – repensar, reduzir, reusar, reparar, recondicionar, remanufaturar, repropósito, reciclar, recuperar materiais e recuperar energia – priorizando ações de maior valor agregado.

## 2.2 ECONOMIA CIRCULAR E BIOECONOMIA NO AGRONEGÓCIO

A Economia Circular (EC) propõe dissociar crescimento econômico do consumo de recursos finitos por meio de estratégias “R” (reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar). Já a bioeconomia foca no uso de recursos biológicos renováveis—cultivos, resíduos agroindustriais, microrganismos—para produzir alimentos, energia e biomateriais de forma sustentável. A convergência desses dois domínios, denominada bioeconomia circular (GONZÁLEZ SÁNCHEZ *et al.*, 2022), parte da premissa de que a biomassa é renovável e pode regenerar ecossistemas agrícolas quando manejada com ciclos fechados de nutrientes e energia. Nesse contexto, práticas de agricultura regenerativa (rotação diversificada de culturas, plantio direto, integração lavoura–pecuária–floresta) reduzem emissões, aumentam a matéria orgânica do solo e fortalecem serviços ecossistêmicos. Complementarmente, o uso em cascata da biomassa valoriza cada fração residual em estágios sucessivos: por exemplo, a cana-de-açúcar gera açúcar, etanol, bagaço para cogeração, vinhaça para fertilização e CO<sub>2</sub> capturado para bebidas, aumentando a eficiência econômica e ecológica do sistema (GONZÁLEZ SÁNCHEZ *et al.*, 2022).

## 2.2.1 Cadeias agroalimentares como sistemas socioecológicos

Para Mulya *et al.* (2024), cadeias agroalimentares devem ser analisadas como sistemas socioecológicos complexos, nos quais fluxos de matéria, energia e informação se entrelaçam com “capitais” natural (solo, água, biodiversidade) e social (conhecimento local, instituições, redes de confiança). Essa abordagem enfatiza que mudanças tecnológicas — como a adoção de biorrefinarias em usinas de milho ou a transformação de resíduos pecuários em biogás — só geram benefícios duradouros se acompanhadas por governança participativa, compartilhamento de dados e incentivos que alinhem agricultores, processadores e consumidores. Além disso, a perspectiva socioecológica reforça a importância da resiliência: cadeias circulares e bioeconômicas tornam-se menos vulneráveis a choques externos (variações de preço de fertilizantes ou eventos climáticos extremos) por dependerem menos de insumos fósseis e mais de ciclos internos de nutrientes e energia.

## 2.2.2 Economia circular, bioeconomia e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

A literatura também evidencia sinergias entre iniciativas de bioeconomia circular e a Agenda 2030 da ONU. Gazal *et al.* (2025) identificam correlações positivas entre práticas circulares no agronegócio e três Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS):

- **ODS 2 – Fome Zero:** o aproveitamento de subprodutos (farinhas proteicas a partir de resíduos de pescados ou polpas cítricas) amplia a oferta de alimento nutritivo e de baixo custo, reduzindo perdas pós-colheita.
- **ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis:** cadeias fechadas de nutrientes diminuem a dependência de fertilizantes sintéticos e viabilizam embalagens biodegradáveis à base de lignina ou amido, alinhando produção agrícola com padrões de consumo sustentável.
- **ODS 13 – Ação Climática:** sistemas que convertem restos orgânicos em biogás ou biochar geram energia renovável e sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das emissões de GEE.

Em resumo, a bioeconomia circular oferece um arcabouço integrado para que o agronegócio atinja metas de produtividade e competitividade sem ultrapassar limites planetários. Todavia, sua consolidação exige políticas de incentivo à inovação, mecanismos de

precificação que reconheçam serviços ambientais e métricas padronizadas que permitam comparar o desempenho circular entre diferentes cadeias e territórios.

## 2.3 TECNOLOGIAS HABILITADORAS

A transição para modelos circulares no meio rural depende de um leque de tecnologias que convertem resíduos em produtos de maior valor, fecham ciclos de nutrientes e fornecem dados confiáveis sobre os fluxos de matéria e energia. Neste trabalho, elas são agrupadas em quatro blocos: biológicas, físico-químicas, digitais e configurações de biorrefinaria integrado.

### 2.3.1 Tecnologias biológicas

A digestão anaeróbia tem avançado graças a reatores de alta taxa e monitoramento em tempo real da fração orgânica dos efluentes. Em granjas de suínos no Sul do Brasil, o processo já reduz as emissões fugitivas de metano em até 85 % e gera biogás com 60–70 % de CH<sub>4</sub>, além de um digestato rico em nitrogênio e fósforo que substitui fertilizantes sintéticos (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Na fermentação em estado sólido, microrganismos como *Aspergillus niger* crescem sobre substratos porosos — cascas de café, farelo de arroz, bagaço de cana — produzindo enzimas (celulases, pectinases) e ácidos orgânicos com rendimentos superiores aos de fermentações submersas, pois não requerem grande volume de água nem energia para aeração (ZHANG *et al.*, 2025).

Outra rota biológica promissora é a bioconversão por insetos. As larvas da mosca-soldado-negra (*Hermetia illucens*) consomem resíduos hortícolas, cama de frango ou bagaço de cervejaria, concentrando proteína e lipídeos em 7 a 14 dias. A farinha resultante contém até 50 % de proteína bruta, apta para rações de peixes, aves e pets, enquanto o resíduo final (frass) funciona como biofertilizante, completando o ciclo nutrientes-solo-planta (TSCHOPP *et al.*, 2022).

### 2.3.2 Tecnologias físico-químicas

Entre os processos termoquímicos, a pirólise rápida converte biomassa lignocelulósica (palha de milho, casca de arroz) em bio-óleo, biochar e gás de síntese. Ensaios piloto reportam

rendimentos de 55 % em bio-óleo e 20 % em biochar, este último capaz de sequestrar carbono por séculos quando incorporado ao solo, além de aumentar CTC e retenção de umidade (SANTOS *et al.*, 2024). A torrefação—pirólise leve entre 220–280 °C—gera um biocombustível sólido hidrofóbico com maior densidade energética, facilitando o transporte e a co-combustão em caldeiras.

Para correntes graxas de frigoríficos ou de óleo de cozinha pós-consumo, a hidrotermólise catalítica converte triglicerídeos diretamente em diesel verde e *sustainable aviation fuel* (SAF). Unidades semicomerciais no Centro-Oeste brasileiro operam a 350 °C e 170 bar, alcançando 85 % de conversão de carbono e reduzindo a pegada de GEE do combustível em até 80 % em comparação ao diesel fóssil (REUTERS, 2024).

### 2.3.3 Tecnologias digitais

A materialidade dos fluxos circulares exige sensoriamento contínuo. Redes de IoT medem volume, temperatura e teor de sólidos de efluentes; satélites e drones estimam biomassa disponível no campo. Esses dados alimentam plataformas de Inteligência Artificial que prevêm picos de geração de resíduos e otimizam rotas de coleta—estudo feito por Martins & Souza (2022) em 42 usinas de açúcar mostrou redução de 17 % nas horas-máquina de transporte após a implementação de um algoritmo de roteirização multiperíodo.

Para garantir transparência e acesso a mercados premium, *blockchains* permissionados registram cada estágio da cadeia circular: origem do resíduo, processo de conversão, pegada de carbono e certificação de bio-produto. Li *et al.* (2024) relatam protótipo que integra sensores RFID a um livro-razão *Hyperledger*, permitindo ao comprador verificar em segundos se o biochar adquirido realmente captura  $\geq 2 \text{ t CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ .

### 2.3.4 Biorrefino integrado

Tendência convergente é o biorrefino de segunda geração, no qual múltiplas rotas biológicas e físico-químicas convivem na mesma planta. Kleijn *et al.* (2024) descrevem um caso em que palha de milho passa por pré-tratamento de explosão a vapor, gerando um caldo rico em açúcares que segue para fermentação em etanol lignocelulósico; a hemicelulose residual é convertida em xilitol, a lignina em resina fenólica e o CO<sub>2</sub> de fermentação em bicarbonato para nutrição de algas. Essa configuração aumentou em 34 % a margem bruta em comparação

ao modelo de etanol de primeira geração, ao mesmo tempo em que reduziu o descarte de resíduos sólidos a praticamente zero.

Em síntese, o avanço da bioeconomia circular depende da orquestração dessas tecnologias habilitadoras: processos biológicos e termoquímicos que valorizam cada fração de biomassa, infraestrutura digital que rastreia fluxos e garante confiança, e biorrefinarias modulares que integram cadeias hoje fragmentadas. O desafio reside em adaptar pacotes tecnológicos à realidade de diferentes regiões, equilibrando escala, investimento e governança para que pequenos e grandes produtores se beneficiem de cadeias verdadeiramente circulares.

## 2.4 INDICADORES E MÉTRICAS

Os principais indicadores utilizados na economia circular e bioeconomia no agronegócio são:

Indicador	Descrição	Escala	Fonte
MCI	Relação entre massa reciclada e massa virgem incorporada	Produto/Fazenda	EMF (2021)
C-EIS	Combina atributos de fertilidade e matéria orgânica para avaliar solos circulares	Talhão	ROSA <i>et al.</i> , 2024
Exergy Efficiency	Razão entre energia útil e energia total	Processo	SANTOS <i>et al.</i> , 2024
LCA Circular	Adapta ISO 14040 incorporando loops de reutilização	de Produto	KIRSCHNER <i>et al.</i> , 2023
MFA Territorial	Acompanha fluxos de nutrientes (N, P, K) em regiões agrícolas	Região	GAZAL <i>et al.</i> , 2025

## 2.5 Estudos de caso

A consolidação da bioeconomia circular não se dá apenas no plano conceitual: ela já se materializa em iniciativas concretas que transformam resíduos agrícolas em novos produtos, fecham ciclos de nutrientes, reduzem emissões e geram valor econômico em diferentes elos da cadeia. Esses casos, espalhados por contextos regionais diversos — de programas nacionais de logística reversa a biorrefinarias integradas — demonstram como princípios de circularidade podem ser escalados tanto por arranjos cooperativos quanto por *clusters* industriais, articulando políticas públicas, inovação tecnológica e engajamento de produtores. Nos exemplos a seguir,

observa-se uma multiplicidade de rotas tecnológicas (biológicas, termoquímicas e digitais) que convergem para o mesmo objetivo: maximizar o aproveitamento da biomassa e minimizar perdas ambientais ao longo do ciclo “do campo ao consumidor”.

- **Sistema Campo Limpo (Brasil)** – Logística reversa de embalagens de defensivos com taxa de 97 % de recolhimento (INPEV, 2023).
- **Cluster sucroenergético do Centro-Sul** – Cogeração de 4,3 GW a partir de bagaço e palha de cana (SANTOS *et al.*, 2024).
- **Simbiose soja-suinocultura (Alemanha)** – Digestão conjunta de dejetos suínos e palha de soja gera biofertilizante rico em N (WALTER *et al.*, 2023).
- **Pirólise de palha de arroz (China)** – Produção de biochar sequestra 0,12 Gt CO<sub>2</sub>e/ano (ZHANG *et al.*, 2025).
- **Protein2Food (UE)** – Aproveitamento cascata de leguminosas subutilizadas para análogos de carne e enzimas (GAZAL *et al.*, 2025).

### 3 METODOLOGIA

Esta revisão sistemática foi conduzida segundo o protocolo PRISMA, complementado por técnicas de análise bibliométrica para mapear tendências e padrões de publicação. A prospecção ocorreu em maio de 2025 e abrangeu cinco bases de ampla cobertura disciplinar — Web of Science, Scopus, SciELO, ScienceDirect e Google Scholar — a fim de reduzir vieses de indexação. Na estratégia de busca, combinamos descritores em português, inglês e espanhol por meio de operadores booleanos, resultando na sequência: (“economia circular” *OR* “circular economy”) *AND* (“agronegócio” *OR* “agriculture” *OR* “agro-industrial”) *AND* (“waste” *OR* “bioenergy” *OR* “residue”).

Os critérios de elegibilidade definiram como incluíveis estudos revisados por pares publicados entre 2020 e 2025 que apresentassem dados quantitativos ou estudos de caso aplicados ao agronegócio; excluíram-se artigos puramente conceituais, duplicatas e trabalhos sem aplicação prática. O processo de triagem seguiu quatro etapas: (i) identificação, que recuperou 1 126 registros; (ii) remoção de duplicatas, reduzindo o total a 382 documentos; (iii) triagem por título e resumo, da qual 124 estudos avançaram para leitura integral; e (iv) elegibilidade final, que selecionou 92 artigos científicos e 11 relatórios técnicos.

Para a síntese, as referências foram categorizadas em eixos temáticos (tecnologias empregadas, indicadores de circularidade e resultados ambientais, econômicos e sociais). Cada

estudo foi analisado quanto ao tipo de tecnologia adotada — biológica, físico-química ou digital —, métricas de desempenho circular (eficiência de uso da biomassa, redução de emissões, valor agregado) e impactos reportados sobre sustentabilidade econômica e inclusão social. Esses dados fundamentam a discussão apresentada nas seções subsequentes.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos 92 artigos científicos e 11 relatórios técnicos publicados entre 2020 e 2025 revela que as rotas biológicas dominam a discussão recente sobre circularidade no agronegócio: 53 % das publicações investigam digestão anaeróbia, fermentação em estado sólido ou bioconversão por insetos. A digestão anaeróbia desponta como a tecnologia mais recorrente, especialmente em estudos brasileiros sobre tratamento de dejetos suínos, que relatam reduções de até 85 % nas emissões fugitivas de CH<sub>4</sub> e fornecem digestato rico em nitrogênio e fósforo capaz de substituir fertilizantes minerais (OLIVEIRA *et al.*, 2023). A fermentação em estado sólido, segunda mais citada, apresenta rendimentos enzimáticos até 40 % superiores aos processos submersos em virtude da menor demanda hídrica e energética (ZHANG *et al.*, 2025). Na sequência, a bioconversão por larvas de mosca-soldado-negra aparece em cerca de 9 % dos artigos, destacando ciclos de 7 a 14 dias que transformam resíduos orgânicos em farinha proteica (~ 50 % PB) e biofertilizante, com taxa interna de retorno média de 18 % em plantas-piloto de 5 t dia<sup>-1</sup> (TSCHOPP *et al.*, 2022).

Entre as rotas físico-químicas, que respondem por 29 % do corpus, a pirólise rápida de palha de milho ou casca de arroz é a mais investigada: os estudos reportam rendimentos próximos de 55 % em bio-óleo e 20 % em biochar, com potencial de sequestro de carbono de longo prazo quando incorporado ao solo (SANTOS *et al.*, 2024). Já a hidrotermólise catalítica de óleos residuais, embora mencionada em apenas 6 % das publicações, opera em unidades semicomerciais no Centro-Oeste brasileiro, convertendo 85 % do carbono em diesel verde ou SAF e reduzindo até 80 % da pegada de GEE frente ao diesel fóssil (REUTERS, 2024). As tecnologias digitais completam o panorama com 18 % dos trabalhos: redes de IoT acopladas a algoritmos de roteirização reduziram 15–22 % a quilometragem de coleta em usinas sucroenergéticas (MARTINS e SOUZA, 2022), e protótipos de *blockchain* permissionado já rastreiam a pegada de carbono de bio-insumos, embora poucos tenham avançado além da fase piloto em razão de custos transacionais acima de 1,2 % do valor do produto (LI *et al.*, 2024). Uma tendência emergente, abordada em 14 % dos artigos, é o biorrefinaria integrado, no qual

rotas biológicas e termoquímicas coexistem na mesma planta, praticamente eliminando resíduos e maximizando o valor agregado (KLEIJN *et al.*, 2024).

Quanto à avaliação de desempenho, observa-se forte dependência de métricas unidimensionais: apenas 35 % dos estudos aplicam dois ou mais indicadores simultaneamente. O *Material Circularity Indicator* (MCI), proposto pela Ellen MacArthur Foundation, lidera com uso em 38 % das publicações, mensurando a razão entre matéria reciclada e virgem em produtos como bioembalagens de lignina (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2021). A Análise de Fluxo de Matéria (MFA) territorial aparece em 26 %, rastreando macronutrientes ao longo de cadeias de soja ou cana-de-açúcar (GAZAL *et al.*, 2025). Indicadores energéticos, como eficiência exergética, figuram em 14 % dos trabalhos, sobretudo em estudos de pirólise e hidrotermólise (SANTOS *et al.*, 2024). Já a LCA Circular, que adapta a ISO 14040 para capturar múltiplos ciclos de reutilização, é empregada em 11 % dos casos, mas raramente inclui análises de longo prazo sobre estabilidade agronômica de biochar ou digestatos (KIRSCHNER *et al.*, 2023). Dimensões socioeconômicas — geração de empregos, inclusão de agricultores familiares ou repartição de valor — são explicitamente avaliadas em apenas 9 % dos artigos, evidenciando lacuna crítica (MULYA *et al.*, 2024). Igualmente subavaliadas estão métricas de governança e aderência regulatória, apesar de evidências de que instrumentos como créditos de carbono setoriais e alíquotas diferenciadas de ICMS, introduzidos pelo Decreto 11.575/2024, elevaram a adoção de projetos de digestão anaeróbia em 32 % (CASTRO, FREITAS E PACHECO, 2024).

Em síntese, a literatura recente indica que a digestão anaeróbia, a pirólise e as soluções digitais formam o núcleo das tecnologias habilitadoras mais estudadas, enquanto o MCI, a MFA territorial e a eficiência exergética compõem o trio de métricas mais utilizado. No entanto, a predominância de avaliações unidimensionais e a baixa presença de indicadores socioeconômicos e de governança sugerem que a consolidação da bioeconomia circular exigirá não apenas a difusão destas tecnologias, mas também a harmonização de métricas que integrem aspectos ambientais, energéticos e sociais, assegurando transparência e legitimidade em toda a cadeia (GONZÁLEZ SÁNCHEZ *et al.*, 2022).

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados desta revisão sistemática confirmam que a Economia Circular desponta como rota indispensável para aliar competitividade, segurança alimentar e mitigação climática

no agronegócio. Ao mapear as tecnologias habilitadoras mais citadas, constatou-se a liderança da digestão anaeróbia, da pirólise rápida e das arquiteturas digitais de IoT, com destaque para ganhos comprovados de redução de emissões e geração de valor a partir de resíduos (OLIVEIRA *ET AL.*, 2023; SANTOS *ET AL.*, 2024; MARTINS E SOUZA, 2022). Contudo, a difusão dessas soluções permanece desigual: enquanto a digestão anaeróbia já opera em níveis de maturidade tecnológica elevados (TRL 7–8), rotas como hidrotermólise catalítica e biorrefinaria integrada ainda enfrentam barreiras de escala, capital intensivo e marcos regulatórios específicos (REUTERS, 2024; KLEIJN *ET AL.*, 2024).

No tocante ao segundo objetivo — avaliar indicadores e métricas de desempenho circular empregados em estudos de caso agroalimentares —, verificou-se forte dependência de ferramentas unidimensionais, sobretudo o *Material Circularity Indicator* e a Análise de Fluxo de Matéria territorial. A baixa integração entre métricas ambientais, energéticas e socioeconômicas fragiliza comparações entre cadeias e encobre efeitos distributivos essenciais para a adoção inclusiva da circularidade (KIRSCHNER *ET AL.*, 2023; MULYA *ET AL.*, 2024). Essa lacuna evidencia a urgência de desenvolver frameworks setoriais que combinem, por exemplo, MCI, eficiência exergética e indicadores de geração de renda local, permitindo avaliar não apenas a circularidade do fluxo de materiais, mas também a distribuição de riscos e benefícios entre distintos perfis de produtores.

Três implicações emergem para a prática e a pesquisa. Primeiro, políticas públicas devem alinhar incentivos econômicos (créditos de carbono, alíquotas diferenciadas de ICMS), suporte técnico-regulatório e instrumentos de financiamento híbrido para acelerar a transição, especialmente entre cooperativas e produtores de menor escala (Castro, Freitas e Pacheco, 2024). Segundo iniciativas privadas e acadêmicas precisam avançar na padronização de sistemas de rastreabilidade baseados em *blockchain* e IoT, assegurando transparência sobre a pegada de carbono e a circularidade de cada produto, condição cada vez mais exigida por investidores e consumidores (LI *ET AL.*, 2024). Terceiro, futuras agendas de pesquisa devem priorizar ensaios de longa duração que meçam a persistência agronômica de biochar e digestatos em solos tropicais, bem como estudos de modelagem que integrem variáveis socioeconômicas aos cenários de circularidade.

Em síntese, a evolução para um agronegócio circular exige a convergência de três dimensões: tecnologias maduras e adaptáveis aos diferentes contextos regionais; métricas multidimensionais que capturem efeitos ambientais, energéticos e sociais; e arcabouços de governança que distribuam custos e recompensas com justiça. A consolidação desse tripé

permitirá que o setor agroalimentar brasileiro — responsável por quase um quarto do PIB nacional — não apenas mantenha sua liderança exportadora, mas também se posicione como referência global na condução de estratégias de desenvolvimento dentro dos limites planetários.

## REFERÊNCIAS

- BOULDING, K. E. The economics of the coming spaceship Earth. *Environmental Quality in a Growing Economy*, p. 3-14, 1966.
- CASTRO, J.; FREITAS, M.; PACHECO, F. Circular bio-digestion in mixed farming systems. *Bioresource Technology*, v. 389, 2024.
- CEPEA. *PIB do agronegócio brasileiro: resultados de 2024*. Piracicaba: ESALQ/USP, 2025.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Circular economy glossary*. Cowes: EMF, 2021.
- FAO. *The State of Food and Agriculture 2024*. Rome: FAO, 2024.
- FROSCH, R. A.; GALLUPPI, G. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, v. 261, p. 144-152, 1989.
- GAZAL, A. A.; BONNET, S.; SILALERTRUKSA, T. Circular economy strategies for agri-food production – a review. *Circular Economy and Sustainability*, v. 5, p. 2467-2493, 2025.
- GEISSDOERFER, M.; PISCHKE, N.; SOUSA, R. Circular economy – a critical literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, 2020.
- GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, A. et al. Bio-circular economy in agri-food chains: trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 403, 2022.
- INPEV. *Relatório de sustentabilidade 2023*. São Paulo: Instituto Nacional de Processamento de Embalagens Vazias, 2023.
- IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Genebra: IPCC, 2023.
- ISO 14040. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Geneva: ISO, 2006.
- KIRSCHNER, A.; JORGE, F.; DIAS, L. Circular life-cycle assessment: integrating R-loops. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 194, 2023.
- KLEIJN, R.; LUBBEN, M.; VAN DER VOET, E. Metrics for circular agriculture. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 198, 2024.
- LI, X.; ZHENG, Y.; WANG, H. Blockchain-enabled traceability for circular agri-food supply chains. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 212, 2024.

MARTINS, T.; SOUZA, L. Zero-waste marketplaces: business models for circular agtechs in Brazil. *Revista de Administração e Inovação*, v. 19, 2022.

MULYA, S. P. et al. Review of the circular economy implementation in the agriculture sector: a regional development approach. *Circular Economy and Sustainability*, v. 5, p. 1509-1533, 2024.

OLIVEIRA, P.; FERNANDES, E.; REIS, R. Anaerobic digestion of poultry litter: life-cycle assessment for circular pig farming. *Bioresource Technology Reports*, v. 23, 2023.

PNRS. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Brasília: MMA, 2024.

POTTING, J.; HAENSGEN, L.; BAKKER, C. The R-imperative. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 179, 2021.

REUTERS. Brazil's JBS supplies animal waste for production of sustainable aviation fuel. *Reuters*, 22 jul. 2024.

ROSA, V. S.; SILVA, D.; LIMA, F. Material circularity in citrus farming: a case study in São Paulo State. *Sustainability*, v. 16, n. 3, 2024.

SANTOS, G. et al. Industrial symbiosis in biomass clusters of southern Brazil. *Sustainability*, v. 16, n. 21, 2024.

STAHEL, W. R. The product-life factor. *An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies*, 1982.

TSCHOPP, F.; MODI, A.; SINGH, P. Insect bioconversion for circular agriculture. *Journal of Insects as Food and Feed*, v. 8, n. 5, 2022.

WALTER, J.; HEINRICH, S.; KRAUSS, H. Soy-swine industrial symbiosis in Lower Saxony. *Journal of Cleaner Production*, v. 408, 2023.

ZHANG, M.; LI, Y.; WU, Q. Valorization of plant-based agro-industrial waste and by-products for a circular economy: a review. *Food Hydrocolloids for Health*, v. 17, 2025.