



ConBREpro

XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Promovendo a Sustentabilidade em Produtos Biobaseados: Barreiras e Estratégias

Kelwin Hluszko

Administração – UGV

Cleiton Hluszko

Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis (LESP) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa

Letícia Bewiahn Quiaroti

Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis (LESP) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa

Diego Alexis Ramos Huarachi

Laboratório de Estudos em Sistemas Produtivos Sustentáveis (LESP) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa

Resumo: A intensificação da exploração de recursos naturais ameaça a sustentabilidade dos sistemas produtivos, demandando estratégias alinhadas à bioeconomia circular (CBE). Este estudo aborda a problemática da integração da Pensamento de Ciclo de Vida (PCV) no desenvolvimento de bioprodutos, cuja implementação enfrenta barreiras metodológicas e a falta de estruturas de avaliação padronizadas. O objetivo foi identificar as principais barreiras e estratégias para promover a sustentabilidade competitiva através do PCV de bioprodutos, no âmbito de uma estrutura de apoio à decisão. Para isso, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) seguindo o protocolo PRISMA 2020, a partir de um portfólio de 79 artigos. Os resultados identificaram 10 barreiras críticas, como trade-offs ambientais, lacunas de dados em estudos de PCV, altos custos de produção e baixa maturidade tecnológica. A análise também revelou um desequilíbrio geográfico na produção científica e a interdependência sistêmica das barreiras ao longo do ciclo de vida. Conclui-se que a superação desses desafios requer abordagens integradas e coordenadas entre os setores acadêmico, industrial e governamental para viabilizar transições sustentáveis na bioeconomia circular.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Sustentabilidade. Biomassa. Economia Circular. Desafios. Bioprodutos. Avaliação de Impacto. Bioeconomia.

Promoting Sustainability in Biobased Products: Barriers and Strategies

Abstract: The intensification of natural resource exploitation threatens the sustainability of production systems, demanding strategies aligned with the circular bioeconomy (CBE). This study addresses the issue of integrating Life Cycle Thinking (LCT) into bioproduct development, whose implementation faces methodological barriers and the lack of standardized assessment frameworks. The objective was to identify the main barriers and strategies for promoting competitive sustainability

through LCT of bioproducts, within the framework of a decision-support framework. To this end, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PRISMA 2020 protocol, based on a portfolio of 79 articles. The results identified 10 critical barriers, such as environmental trade-offs, data gaps in LCT studies, high production costs, and low technological maturity. The analysis also revealed a geographic imbalance in scientific production and the systemic interdependence of barriers throughout the life cycle. It is concluded that overcoming these challenges requires integrated and coordinated approaches between the academic, industrial and governmental sectors to enable sustainable transitions in the circular bioeconomy.

Keywords: Life Cycle Assessment. Sustainability. Biomass. Circular Economy. Challenges. Bioproducts. Impact Assessment. Bioeconomy.

1. Introdução

O crescimento populacional, aliado ao avanço tecnológico, tem intensificado a exploração de recursos naturais, agravando a escassez de matérias-primas não renováveis e ameaçando a sustentabilidade dos sistemas produtivos (HUARACHI; HLUSZKO; ULLOA; MORETTI *et al.*, 2023). Em resposta a esse cenário, estratégias baseadas na bioeconomia circular (CBE), que integram princípios de sustentabilidade às práticas industriais, vêm sendo cada vez mais adotadas (BLOMSMA; BRENNAN, 2017). Neste contexto, a CBE surge como uma ferramenta fundamental para a transição rumo a modelos de produção mais sustentáveis (HLUSZKO; HUARACHI; ULLOA; SALVADOR *et al.*, 2024), sendo amplamente reconhecida por seu potencial em mitigar impactos ambientais e agregar valor a resíduos (LOIZIDES; LOIZIDOU; ORTHODOXOU; PETSAS, 2019).

Quando aplicada ao ciclo de vida dos bioprodutos, a bioeconomia circular possibilita a regeneração de recursos biológicos e a minimização de perdas ao longo da cadeia produtiva (MUSCAT; DE OLDE; RIPOLL-BOSCH; VAN ZANTEN *et al.*, 2021). Apesar desses benefícios, sua implementação ainda enfrenta barreiras metodológicas significativas, incluindo limites de sistema imprecisos, falta de análises de incerteza e avaliação incompleta dos impactos em termos de sustentabilidade (KHANDELWAL; KUMARI; PODUVAL; BEHERA *et al.*, 2025). É neste cenário que o Pensamento de Ciclo de Vida (LCT) emerge como uma abordagem essencial, ao oferecer uma perspectiva sistêmica sobre os impactos ambientais, sociais e econômicos em todo o processo produtivo (SEVIGNÉ-ITOIZ; MWABONJE; PANOUTSOU; WOODS, 2021).

No entanto, análises sistemáticas sobre os obstáculos para gerenciar esses fatores permanecem limitadas (HUARACHI; HLUSZKO; ULLOA; MORETTI *et al.*, 2023) (REQUIST; LI; GROSS, 2022), e a ausência de estruturas de avaliação padronizadas e integradas compromete tanto a eficácia quanto a mensuração dos impactos reais da CBE na sustentabilidade (LEONG; CHANG; KHOO; CHEW *et al.*, 2021). Estudos existentes frequentemente deixam de abordar sistematicamente os desafios mais prementes, particularmente aqueles decorrentes da complexa interação de fatores econômicos, técnicos e sociais (PRASANNA; JAYASUNDARA; GAMAGE; EKANAYAKE *et al.*, 2019).

Diante dessa lacuna, o presente manuscrito visa responder à seguinte questão de pesquisa (RQ): “Quais são as principais barreiras e estratégias para promover a sustentabilidade competitiva por meio do LCT de bioprodutos, dentro de uma estrutura de apoio à decisão?”. Para responder a essa RQ, o estudo buscou identificar barreiras para a promoção da sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de bioprodutos, visando capturar a influência de múltiplos fatores na integração da sustentabilidade competitiva nos modelos de negócio.

2. Referencial teórico

No âmbito do Pensamento de Ciclo de Vida (LCT), os impactos da sustentabilidade – considerando as dimensões ambiental, social e económica – são avaliados em todas as fases do ciclo de vida do produto (OMER; IBRAHIM; ELSHEIKH; HEGAB, 2025). Este processo inclui uma variedade de indicadores, permitindo uma análise sistemática dos efeitos observados em ciclos de vida lineares e circulares (LCI, 2023). Os conceitos teóricos do LCT são igualmente aplicáveis a produtos de fontes biológicas e renováveis, com foco em análises que visam medir os benefícios ambientais (GHEEWALA, 2023). Embora estes bioprodutos sejam concebidos para um melhor desempenho ambiental em comparação com os produtos convencionais que pretendem substituir (BRANDÃO; GONÇALVES; SANTOS, 2021), eles ainda geram impactos significativos nas dimensões ambiental, económica e social.

O LCT de um bioproduto é comumente associado à avaliação ambiental do ciclo de vida (ACV). No entanto, esta abordagem vai mais longe, reconhecendo que uma gestão de sustentabilidade abrangente requer a consideração de todas as etapas do ciclo de vida do produto, bem como o valor económico gerado e as partes interessadas envolvidas na cadeia de valor do bioproduto (KARUPPIAH; SANKARANARAYANAN; ALI; SANTIBANEZ GONZALEZ, 2023). Neste contexto, é essencial reconhecer que o LCT está fundamentado na avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida do produto, que inclui não apenas a ACV, mas também o Custo do Ciclo de Vida (LCC) e a Avaliação Social do Ciclo de Vida (S-LCA).

Assim, é necessário e urgente considerar as aspetos económicos e, especialmente, sociais, uma vez que permanecem incertezas sobre se os benefícios ambientais associados aos bioprodutos também se refletem nos resultados económicos e sociais (BRANDÃO; GONÇALVES; SANTOS, 2021) (SALVADOR; PUGLIERI; HALOG; ANDRADE *et al.*, 2021). Estas incertezas devem ser abordadas para determinar se o desenvolvimento de bioprodutos está verdadeiramente a contribuir para o desenvolvimento sustentável e a permitir que a bioeconomia circular impulse a sustentabilidade competitiva nas indústrias.

A bioeconomia circular é entendida como a convergência de dois conceitos bem estabelecidos no campo da ciência da sustentabilidade: bioeconomia e economia circular (MESA; SIERRA-FONTALVO; ORTEGON; GONZALEZ-QUIROGA, 2024). Neste paradigma emergente, os recursos biológicos, bem como os resíduos de origem biológica, são utilizados como matérias-primas para a produção de bens de alto valor acrescentado por meio de processos inovadores (SALVADOR; PUGLIERI; HALOG; ANDRADE *et al.*, 2021). A bioeconomia circular propõe uma transformação na forma como as indústrias utilizam os recursos biológicos, apresentando-se, quando devidamente gerida, como um caminho promissor para o desenvolvimento sustentável e a optimização de recursos (SRIVASTAV; BAGHERIAN; GHOSH, 2025).

3. Materiais e métodos

Para responder à questão de pesquisa sobre as principais barreiras e estratégias para promover a sustentabilidade no ciclo de vida de bioprodutos, o estudo adotou o método de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), seguindo as diretrizes do PRISMA 2020 (PAGE; MCKENZIE; BOSSUYT; BOUTRON *et al.*, 2021) e os padrões de relatório ROSES (HADDAWAY; MACURA; WHALEY; PULLIN, 2018). A revisão foi estruturada em cinco fases sequenciais: (i) definição de variáveis e estratégias de pesquisa, (ii) recolha de dados a partir de bases científicas, (iii) triagem de estudos com base em critérios de inclusão e exclusão, (iv) análise bibliométrica utilizando o pacote Bibliometrix no software R (ARIA; CUCCURULLO, 2017), e (v) análise sistemática da amostra final, incluindo a categorização de barreiras e estratégias.

A primeira etapa consistiu na definição da questão de pesquisa, do objetivo da revisão e na formulação da estratégia de busca, conforme detalhado na Tabela 1. A estratégia, aplicada às bases Scopus e Web of Science, combinou termos relacionados a "Pensamento de Ciclo de Vida", "bioprodutos" e "sustentabilidade" com palavras-chave sobre "barreiras" e "estratégias". O processo de triagem, ilustrado pelo fluxograma PRISMA, partiu de 874 registros identificados, resultando num portfólio final de 71 artigos após a remoção de duplicados e a aplicação dos critérios de elegibilidade, que priorizaram estudos com foco central em biomateriais e abordagem de ciclo de vida.

Tabela 1 - Estratégia e Parâmetros para a Revisão Sistemática da Literatura

Característica	Descrição
Bases de Dados	Scopus, Web of Science (WoS)
String de Busca	("life cycle thinking" OR "life cycle assessment" OR LCA OR "life cycle analysis" OR "life cycle approach" OR "cradle-to-grave" OR "cradle-to-cradle") AND ("biomaterial" OR "bio-based material" OR "biobased material" OR "bio derived material" OR "biodegradable material" OR "bio-sourced material" OR "biosourced material" OR "bioengineered material" OR "biofabricated material" OR "green material" OR "biosynthetic material" OR "biopolymer" OR "bioproduct" OR "bio-based product" OR "biobased product" OR "bio derived product" OR "biodegradable product" OR "bio-sourced product" OR "biosourced product" OR "bioengineered product" OR "biofabricated product" OR "green product" OR "biosynthetic product") AND ("sustainable") AND ("barrier" OR "challenge" OR "obstacle" OR "constraint" OR "bottleneck" OR "strateg" OR "solution" OR "enabler" OR "action" OR "policy recommendation" OR "regulatory measure" OR "management framework" OR "governance model*" OR "project management" OR "project planning")
Campo de Aplicação	Título, Resumo, Palavras-chave
Tipos de Documento	Artigos completos e revisões
Data da Busca	Junho de 2025
Idioma	Inglês

Fonte(s): Elaborado pelos autores.

Por fim, a análise sistemática do portfólio final permitiu a extração e categorização dos dados, documentando-se informações como fator de impacto da revista, contagem de citações, barreiras e oportunidades. Esta abordagem metodológica rigorosa visou assegurar o robustez teórica e a aplicabilidade prática dos resultados, fornecendo uma base sólida para a identificação e estruturação hierárquica dos desafios e estratégias para a sustentabilidade competitiva de bioprodutos.

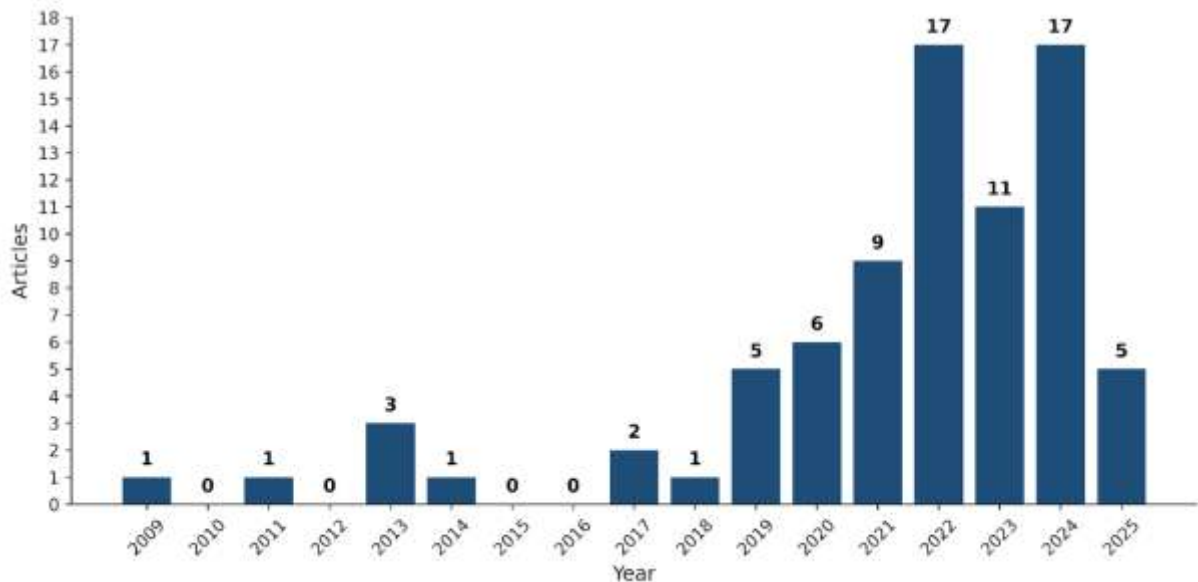
4. Resultados e discussões

4.1. Análise de portfólio

A análise da amostra revela a distribuição geopolítica da pesquisa acadêmica, oferecendo insights valiosos sobre o avanço da sustentabilidade competitiva em bioprodutos por meio da avaliação do ciclo de vida. A Figura 1 mostra um aumento notável nas publicações de 2017 a 2022, seguido por estabilização e um breve declínio em 2023. O pico de 17 estudos em 2022, repetido em 2024, sugere um interesse acadêmico renovado. Essa tendência reflete a capacidade de resposta da academia aos desafios

globais que vinculam sustentabilidade e competitividade (Rebolledo-Leiva, 2023). Variações no volume de publicações podem resultar de mudanças no financiamento da pesquisa, prioridades políticas ou amadurecimento do campo, indicando sua natureza dinâmica e sensibilidade a fatores externos (Gontard, 2018; Shi, 2020).

Figura 1 - Distribuição anual de publicações científicas abordando análise do ciclo de vida e sustentabilidade de produtos de base biológica

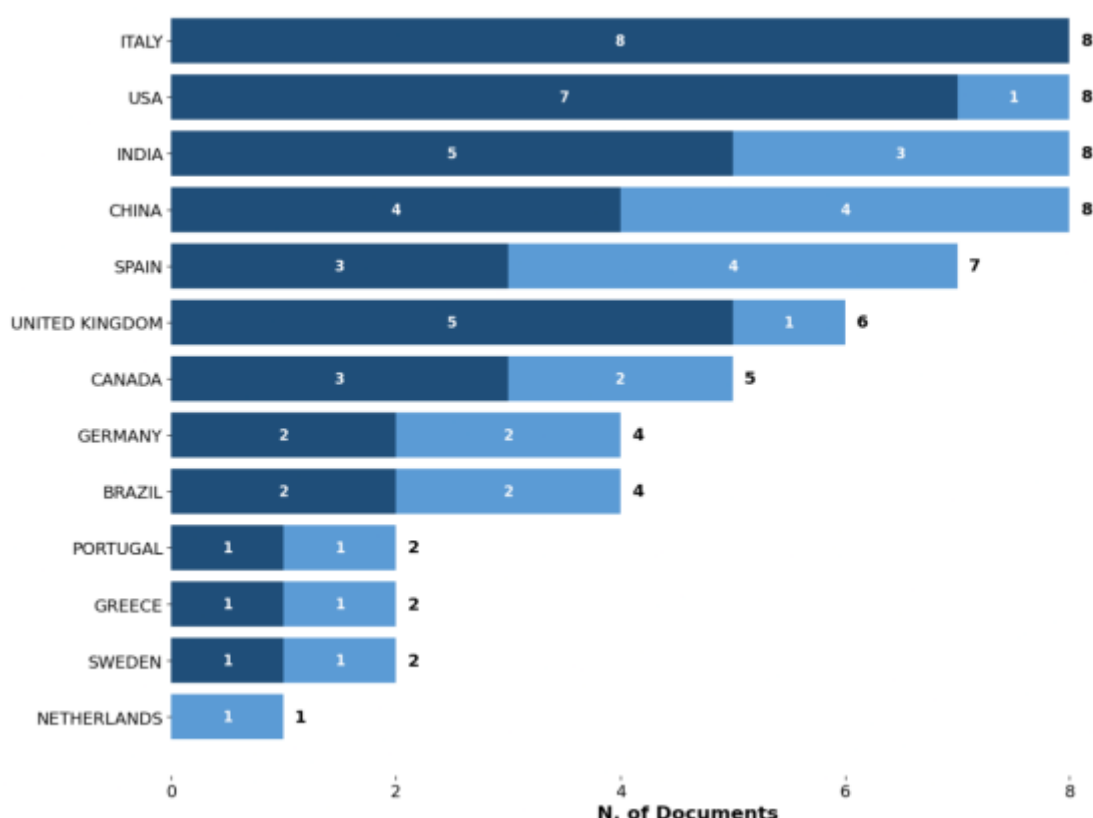


Fonte(s): Elaborado pelos autores.

A análise das contribuições nacionais, conforme ilustrado na Figura 3, revela uma hierarquia distinta no engajamento dos países com o tema. Itália e Estados Unidos emergem como os principais contribuidores, com oito e sete publicações de autoria única (representadas em azul-escuro), respectivamente. Logo em seguida, vêm a Índia (n=5), o Reino Unido (n=5) e a China (n=4), cada um demonstrando um nível notável de produção acadêmica. Isso sugere que a pesquisa nessa área apresenta um caráter policêntrico, estendendo-se para além dos centros acadêmicos tradicionais tipicamente associados à Europa e aos Estados Unidos.

Esse resultado diverge de partes da literatura existente, que anteriormente indicavam uma predominância europeia mais forte na pesquisa sobre sustentabilidade competitiva aplicada a bioprodutos (RAMOS HUARACHI; PIEKARSKI; PUGLIERI; DE FRANCISCO, 2020; YADAV; GYAMFI; ASONGU; BEHERA, 2024). O envolvimento substancial da Índia e da China sugere uma correlação entre investimentos nacionais em pesquisa e desenvolvimento, políticas de bioeconomia e estratégias para a segurança dos recursos naturais nesses países (REZVANI GHOMI; KHOSRAVI; SAEDI ARDAHAIEI; DAI *et al.*, 2021; YAASHIKAA; KUMAR; SARAVANAN; KARISHMA *et al.*, 2023). Consequentemente, observa-se uma geografia do conhecimento mais diversificada e globalizada.

Figura 2 - Distribuição nacional de publicações abordando análise do ciclo de vida e sustentabilidade de produtos de base biológica



Fonte(s): Elaborado pelos autores.

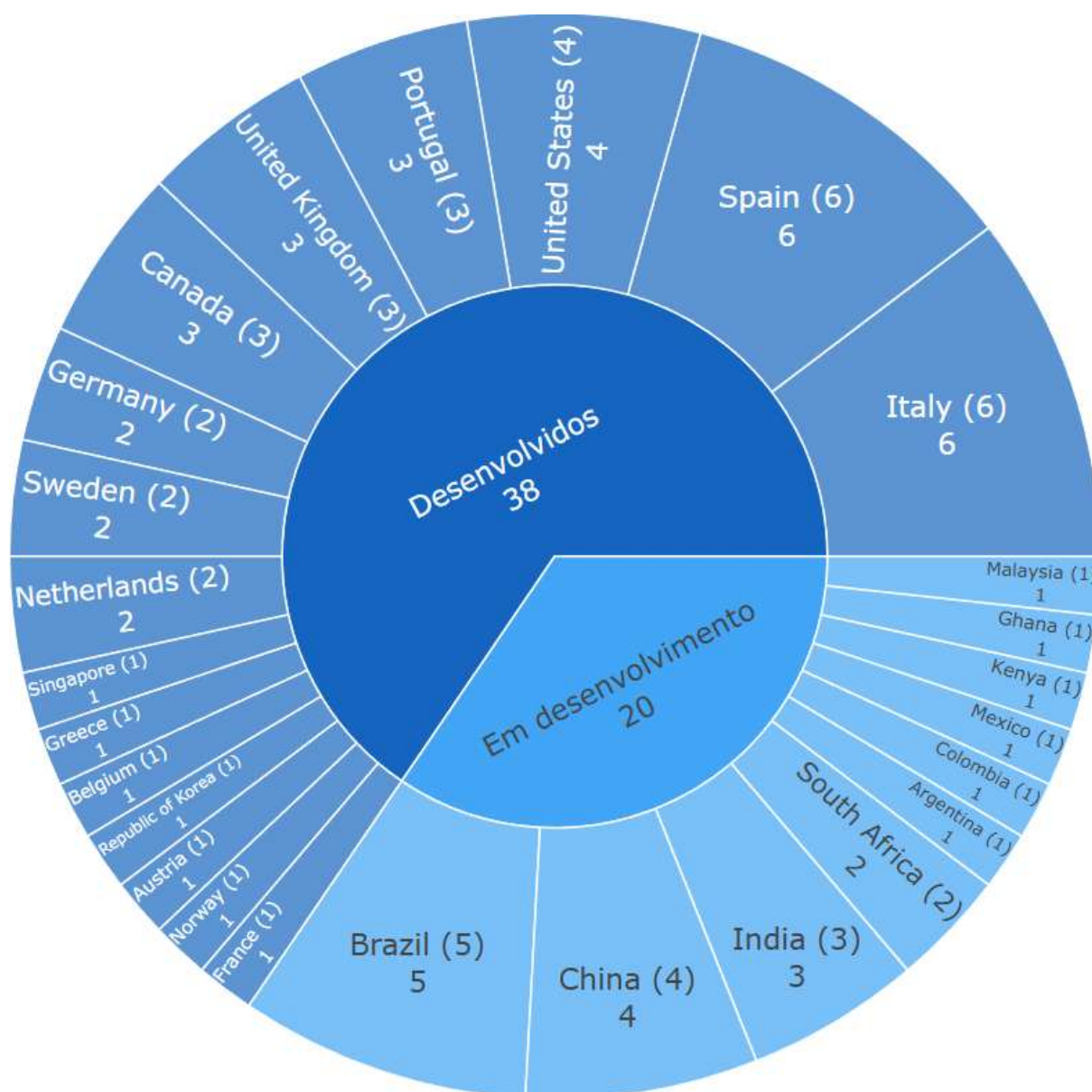
A interpretação conjunta das Figuras 1 e 2 revela uma visão fundamental para a estrutura proposta: o pico temático atual é predominantemente impulsionado por uma coalizão de nações desenvolvidas, notadamente Itália e Estados Unidos. Essa correlação sugere que infraestruturas de pesquisa robustas, mecanismos de financiamento estáveis e um precedente histórico de liderança acadêmica nesses países desempenham um papel crítico na expansão da produção científica (YU; DONG; DE JONG, 2022). Tais condições parecem promover engajamento e inovação sustentados, reforçando sua influência na formação de trajetórias globais de pesquisa nesse domínio.

Embora nações economicamente avançadas frequentemente apresentem maior capacidade de consumo e, conseqüentemente, níveis elevados de pegadas ambientais insustentáveis, a inclusão de países em desenvolvimento continua essencial (JAHANGER; USMAN; MURSHED; MAHMOOD *et al.*, 2022). Essas nações enfrentam desafios socioeconômicos persistentes, como segurança alimentar, geração de renda e gestão de resíduos, que poderiam ser diretamente enfrentados por meio do avanço de bioprodutos {Torres-León, 2018 #6571}. A sub-representação observada nesta amostra revela uma lacuna crítica, ressaltando a necessidade de estruturas holísticas que apoiem a sustentabilidade competitiva, integrando as dimensões econômica, social e ambiental. Tais abordagens são imperativas para promover atividades econômicas mais resilientes nesses contextos.

Nesse contexto, Brasil e China emergem como os principais representantes entre os países em desenvolvimento, contribuindo com cinco e quatro estudos, respectivamente. No entanto, sua relativa proeminência apenas acentua a disparidade com outros pares, principalmente a Índia. A contribuição limitada da Índia, um dos países mais populosos do mundo, constitui um contraste notável (ver Figura 3). Essa desconexão entre massa

populacional crítica e produção acadêmica sinaliza uma oportunidade distinta para pesquisas futuras. Estudos subsequentes devem ter como objetivo aplicar e adaptar a estrutura proposta a essas regiões sub-representadas, abordando seus desafios específicos e potencialmente catalisando um desenvolvimento mais inclusivo e sustentável, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição comparativa da produção acadêmica entre países desenvolvidos e em desenvolvimento



Fonte(s): Elaborado pelos autores.

A comparação entre as Figuras 2 e 3 revela uma observação crucial: numerosos pesquisadores de países em desenvolvimento conduzem estudos relacionados a bioprodutos em instituições localizadas em países mais ricos. Essa tendência indica que, apesar da presença de talentos científicos nessas regiões, o conhecimento gerado é predominantemente alavancado fora de seus países de origem. Essa dinâmica ressaltam um desequilíbrio estrutural na disseminação e utilização da pesquisa global, sugerindo a necessidade de estratégias que fortaleçam a capacidade local e garantam que os avanços científicos beneficiem as regiões de onde se originam.

Essa situação apresenta um desafio claro: o conhecimento produzido por esses pesquisadores frequentemente não é aplicado para abordar questões de sustentabilidade

em seus próprios países. As agendas de pesquisa tendem a se alinhar às prioridades definidas por instituições estrangeiras, frequentemente negligenciando necessidades locais específicas, como a gestão de resíduos, a utilização de recursos naturais regionais e o desenvolvimento de soluções adaptadas ao contexto socioeconômico de origem (HERSE; LYVER; SCOTT; MCINTOSH *et al.*, 2020). Esse desalinhamento ressalta a importância de promover estruturas de pesquisa que sejam responsivas às realidades locais e capazes de traduzir a produção científica em impacto contextualmente relevante.

Portanto, a estrutura projetada para promover a sustentabilidade competitiva de bioprodutos deve levar em conta essa realidade. Em vez de simplesmente replicar modelos internacionais, a estrutura deve incorporar mecanismos que abordem diretamente as barreiras mais salientes enfrentadas por regiões menos desenvolvidas. Essa abordagem deve ser fundamentada em parcerias internacionais que visem fomentar a geração e a disseminação de conhecimento nesses contextos. Essa integração é essencial para garantir que as estratégias de sustentabilidade sejam inclusivas e responsivas aos desafios regionais.

Finalmente, duas descobertas bibliométricas são essenciais para moldar o modelo proposto. Primeiro, a estrutura deve manter baixa complexidade e priorizar a avaliação de como a sustentabilidade competitiva ao longo do ciclo de vida do bioproduto pode gerar benefícios tangíveis. Em particular, deve enfatizar o potencial de superar barreiras mais prevalentes no contexto de países emergentes e menos desenvolvidos. Essa abordagem direcionada aumenta a relevância e a aplicabilidade do modelo em regiões que enfrentam desafios socioeconômicos e ambientais distintos.

Essa base ressalta a necessidade de desenvolver uma estrutura que organize sistematicamente as principais barreiras relacionadas à questão de pesquisa (consulte a seção Metodologia), ao mesmo tempo em que identifica e vincula estratégias viáveis para o avanço do tema. Tal estrutura deve ser particularmente orientada para apoiar o desenvolvimento de nações menos avançadas, garantindo que as soluções propostas sejam contextualmente relevantes e capazes de enfrentar os desafios específicos de cada região. Ao alinhar caminhos estratégicos com necessidades locais, a estrutura pode servir como catalisadora para um progresso inclusivo e sustentável.

4.2. Barreiras à Implementação da Sustentabilidade Competitiva

A análise crítica dos resultados da revisão sistemática revelou quatro descobertas fundamentais para o avanço da sustentabilidade competitiva nos bioprodutos. A primeira diz respeito ao (i) claro desequilíbrio geográfico na produção científica, que se concentra predominantemente em países desenvolvidos, como Itália e Estados Unidos, refletindo a presença de infraestruturas de pesquisa consolidadas e maior acesso a financiamento (YU; DONG; DE JONG, 2022). Em contrapartida, economias emergentes, apesar de possuírem vastos recursos biológicos e forte potencial, permanecem sub-representadas na literatura, o que restringe a diversidade de perspectivas e a aplicabilidade dos resultados em contextos de desenvolvimento.

A segunda descoberta revela a (ii) significativa dependência acadêmica de países em desenvolvimento, onde uma parcela considerável da investigação é conduzida em parceria com ou no interior de instituições de nações desenvolvidas. Esta dinâmica, embora contribua para o avanço científico, indica uma concentração de capacidades de pesquisa e poder decisório em regiões de alto rendimento, fazendo com que o conhecimento gerado frequentemente reflita prioridades e contextos não totalmente alinhados com os desafios de sustentabilidade específicos dos países em desenvolvimento, reforçando assim as desigualdades regionais em inovação.

A terceira descoberta permitiu a identificação de dez barreiras críticas que impedem a implementação eficaz da sustentabilidade competitiva ao longo do ciclo de vida dos bioprodutos, a saber: trade-offs ambientais, lacunas e incompletude de dados em estudos de PCT, altos custos de produção, uso intensivo de energia, baixa maturidade tecnológica e escalabilidade, incertezas sobre a gestão do fim de vida, competição pela matéria-prima, limitações mecânicas e de desempenho, e baixa aceitação pelo mercado e consumidores (GALLO; ARRIGHI; MORESCHI; DEL BORGHI *et al.*, 2022; LAKHIAR; ZHAO; GUO; CHEN, 2024) (ASGHAR; SAIRASH; HUSSAIN; BAQAR *et al.*, 2022; WEN; FOSTER; VAN WINDEN; IERAPETRITOU, 2024) {Consentino, 2024 #6663}(COPPOLA; GAUDIO; LOPRESTO; CALABRO *et al.*, 2021; RAHAMAN; HOSSAIN KHAN, 2025; YAASHIKAA; KUMAR; SARAVANAN; KARISHMA *et al.*, 2023).

A quarta e última descoberta salienta a (iv) necessidade de compreender as inter-relações entre estas barreiras, uma vez que os resultados indicam que elas formam um sistema interconectado de restrições que se reforçam mutuamente ao longo das etapas do ciclo de vida do bioproduto. Por exemplo, as lacunas de dados reduzem a fiabilidade das avaliações de impacto, o que, por sua vez, limita os investimentos tecnológicos e sustenta os altos custos de produção. Reconhecer e mapear estas interdependências multidimensionais é essencial para priorizar ações e desenvolver estratégias coordenadas que ataquem as causas estruturais e não apenas os sintomas, suportando o desenho de quadros de decisão integrados para transições de sustentabilidade mais eficazes na bioeconomia circular.

5. Conclusões

A análise dos resultados revelou quatro descobertas principais. A primeira aponta um claro desequilíbrio geográfico na produção científica, com a pesquisa concentrada predominantemente em nações desenvolvidas, como Itália e Estados Unidos. Essa concentração reflete infraestruturas de pesquisa consolidadas e maior acesso a financiamento, enquanto economias emergentes, apesar de seu potencial na bioeconomia circular, permanecem sub-representadas, limitando a diversidade de perspectivas e a aplicabilidade dos resultados em contextos de desenvolvimento.

A segunda descoberta revela a dependência académica de países em desenvolvimento, onde uma parcela significativa da pesquisa é conduzida em parceria com instituições de nações desenvolvidas. Embora essas colaborações sejam valiosas, elas frequentemente resultam em agendas de pesquisa desalinhadas dos desafios locais específicos, como a gestão de resíduos e o uso de recursos naturais regionais. Isso limita a capacidade de formular soluções adaptadas e reforça as desigualdades regionais em inovação, destacando a necessidade de parcerias internacionais mais equitativas.

A terceira descoberta identificou nove barreiras críticas e multidimensionais que impedem a implementação da sustentabilidade competitiva no ciclo de vida dos bioprodutos. Estas incluem trade-offs ambientais, lacunas de dados, altos custos de produção, uso intensivo de energia, baixa maturidade tecnológica e incertezas na gestão do fim de vida, entre outras. A quarta descoberta salienta que estas barreiras não atuam de forma isolada, mas formam um sistema interconectado de restrições, onde um fator influencia e reforça o outro ao longo das etapas do ciclo de vida.

Em conjunto, essas descobertas reforçam que a promoção da sustentabilidade competitiva na bioeconomia circular exige uma abordagem sistémica e coordenada. Superar essas barreiras interdependentes requer não apenas inovação tecnológica, mas também alinhamento institucional e geopolítico. A integração de insights teóricos com perspetivas práticas e políticas demonstra a necessidade de ações coordenadas entre academia, indústria e governo para priorizar intervenções que ataquem as causas

fundamentais e não apenas os sintomas, promovendo transições de sustentabilidade mais eficazes e inclusivas.

Referências

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, 11, n. 4, p. 959-975, 2017. Article.

ASGHAR, A.; SAIRASH, S.; HUSSAIN, N.; BAQAR, Z. *et al.* Current challenges of biomass refinery and prospects of emerging technologies for sustainable bioproducts and bioeconomy. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, 16, n. 6, p. 1478-1494, 2022.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. **Journal of Industrial Ecology**, 21, n. 3, p. 603-614, 2017. Article.

BRANDÃO, A. S.; GONÇALVES, A.; SANTOS, J. M. R. C. A. Circular bioeconomy strategies: From scientific research to commercially viable products. **Journal of Cleaner Production**, 295, 2021. Review.

COPPOLA, G.; GAUDIO, M. T.; LOPRESTO, C. G.; CALABRO, V. *et al.* Bioplastic from renewable biomass: a facile solution for a greener environment. **Earth systems and environment**, 5, n. 2, p. 231-251, 2021.

GALLO, M.; ARRIGHI, G.; MORESCHI, L.; DEL BORGHI, A. *et al.* Life cycle assessment of a circular economy process for tray production via water-based upcycling of vegetable waste. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, 10, n. 42, p. 13936-13944, 2022.

GHEEWALA, S. Life cycle assessment for sustainability assessment of biofuels and bioproducts. **Biofuel Research Journal**, 2023-03-01 2023.

HADDAWAY, N. R.; MACURA, B.; WHALEY, P.; PULLIN, A. S. ROSES Reporting standards for Systematic Evidence Syntheses: Pro forma, flow-diagram and descriptive summary of the plan and conduct of environmental systematic reviews and systematic maps. **Environmental Evidence**, 7, n. 1, 2018. Article.

HERSE, M.; LYVER, P.; SCOTT, N.; MCINTOSH, A. *et al.* Engaging Indigenous Peoples and Local Communities in Environmental Management Could Alleviate Scale Mismatches in Social–Ecological Systems. **BioScience**, 70, p. 699-707, 2020-08-01 2020.

HLUSZKO, C.; HUARACHI, D. A. R.; ULLOA, M. I. C.; SALVADOR, R. *et al.* How do the BRICS approach sustainable concerns? A systematic literature review. **Environmental Development**, p. 101075, 2024.

HUARACHI, D. A. R.; HLUSZKO, C.; ULLOA, M. I. C.; MORETTI, V. *et al.* Life Cycle Thinking for a Circular Bioeconomy: Current Development, Challenges, and Future Perspectives. **Sustainability (Switzerland)**, 15, n. 11, 2023. Review.

JAHANGER, A.; USMAN, M.; MURSHED, M.; MAHMOOD, H. *et al.* The linkages between natural resources, human capital, globalization, economic growth, financial development, and ecological footprint: The moderating role of technological innovations. **Resources Policy**, 2022-01-25 2022.

KARUPPIAH, K.; SANKARANARAYANAN, B.; ALI, S. M.; SANTIBANEZ GONZALEZ, E. D. R. Impact of Circular Bioeconomy on Industry's Sustainable Performance: A Critical Literature Review and Future Research Directions Analysis. **Sustainability (Switzerland)**, 15, n. 14, 2023. Review.

KHANDELWAL, N.; KUMARI, S.; PODUVAL, S.; BEHERA, S. K. *et al.* Life-cycle assessment of three biorefinery pathways across different generations. **Scientific Reports**, 15, n. 1, 2025. Article.

LAKHIAR, M. T.; ZHAO, X.; GUO, Y.; CHEN, S. Investigations on the mechanical and life cycle properties of novel marine-based sustainable BFRP composites. **Construction and Building Materials**, 453, p. 139105, 2024.

LCI. **What is Life Cycle Thinking?**, 2023. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/activities/what-is-life-cycle-thinking/>.

LEONG, H. Y.; CHANG, C. K.; KHOO, K. S.; CHEW, K. W. *et al.* Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: a solution to global issues. **Biotechnology for Biofuels**, 14, n. 1, 2021. Review.

LOIZIDES, M. I.; LOIZIDOU, X. I.; ORTHODOXOU, D. L.; PETSA, D. Circular bioeconomy in action: Collection and recycling of domestic used cooking oil through a social, reverse logistics system. **Recycling**, 4, n. 2, 2019. Article.

MESA, J. A.; SIERRA-FONTALVO, L.; ORTEGON, K.; GONZALEZ-QUIROGA, A. Advancing circular bioeconomy: A critical review and assessment of indicators. **Sustainable Production and Consumption**, 46, p. 324-342, 2024. Review.

MUSCAT, A.; DE OLDE, E. M.; RIPOLL-BOSCH, R.; VAN ZANTEN, H. H. E. *et al.* Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. **Nature Food**, 2, n. 8, p. 561-566, 2021. Review.

OMER, M. A. E.; IBRAHIM, A. M. M.; ELSHEIKH, A.; HEGAB, H. A Framework for Integrating Sustainable Production Practices Along the Product Life Cycle. **Environmental and Sustainability Indicators**, 2025-01-01 2025.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I. *et al.* The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **The BMJ**, 372, 2021. Review.

PRASANNA, R.; JAYASUNDARA, J.; GAMAGE, S. K. N.; EKANAYAKE, E. *et al.* Sustainability of SMEs in the Competition: A Systemic Review on Technological Challenges and SME Performance. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, 2019-12-12 2019.

RAHAMAN, M. T.; HOSSAIN KHAN, M. S. Biomaterials for manufacturing environmentally sustainable textiles and apparel: sources, applications, challenges, enablers and future directions. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-56, 2025.

RAMOS HUARACHI, D. A.; PIEKARSKI, C. M.; PUGLIERI, F. N.; DE FRANCISCO, A. C. Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends. **Journal of Cleaner Production**, 264, 2020. Review.

REQUIST, R.; LI, C.; GROSS, E. K. U. Geometric energy transfer in two-component systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 380, n. 2223, 2022. Article.

REZVANI GHOMI, E.; KHOSRAVI, F.; SAEDI ARDAHAEI, A.; DAI, Y. *et al.* The life cycle assessment for polylactic acid (PLA) to make it a low-carbon material. **Polymers**, 13, n. 11, p. 1854, 2021.

SALVADOR, R.; PUGLIERI, F. N.; HALOG, A.; ANDRADE, F. G. D. *et al.* Key aspects for designing business models for a circular bioeconomy. **Journal of Cleaner Production**, 278, 2021. Review.

SEVIGNÉ-ITOIZ, E.; MWABONJE, O.; PANOUTSOU, C.; WOODS, J. Life cycle assessment (LCA): Informing the development of a sustainable circular bioeconomy? **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 379, n. 2206, 2021. Review.

SRIVASTAV, A. L.; BAGHERIAN, A.; GHOSH, D. The circular bioeconomy: pathways to sustainability and resource optimization. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 27, n. 2, p. 815-832, 2025. Review.

WEN, C.-M.; FOSTER, C.; VAN WINDEN, W.; IERAPETRITOU, M. Toward Net-Zero Greenhouse Gas Emission: Techno-Economic and Life Cycle Analyses of Routes for Triacetic Acid Lactone (TAL) Bioproduction. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, 12, n. 33, p. 12430-12445, 2024.

YAASHIKAA, P.; KUMAR, P. S.; SARAVANAN, A.; KARISHMA, S. *et al.* A biotechnological roadmap for decarbonization systems combined into bioenergy production: Prelude of environmental life-cycle assessment. **Chemosphere**, 329, p. 138670, 2023.

YADAV, A.; GYAMFI, B. A.; ASONGU, S. A.; BEHERA, D. K. The role of green finance and governance effectiveness in the impact of renewable energy investment on CO2 emissions in BRICS economies. **Journal of Environmental Management**, 358, 2024. Article.

YU, N.; DONG, Y.; DE JONG, M. A helping hand from the government? How public research funding affects academic output in less-prestigious universities in China. **Research Policy**, 2022-07-03 2022.