



Desafios e limitações para economia circular na agricultura sustentável

Challenges and limitations for the circular economy in sustainable agriculture

Robério Satyro dos Santos Júnior^a, Roberto Rodrigues de Souza^a, Alberto Wisniewski Jr^b

^a Universidade Federal de Sergipe-UFS, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente-PRODEMA. Av. Marcelo Déda Chagas, S/N, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, Brasil. CEP: 49107-230. E-mail: satyro.roberio@gmail.com, rrsouza.br@gmail.com.

^b UFS, Grupo de Pesquisa em Petróleo e Energia da Biomassa-PEB. Av. Marcelo Déda Chagas, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, Brasil. CEP: 49107-230. E-mail: albertowj@academico.ufs.br.

ARTICLE INFO

Recebido 03 Mai 2024

Aceito 05 Nov 2025

Publicado 29 Dez 2025

ABSTRACT

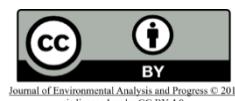
The way society produces and consumes has significantly impacted natural resources through intensified extraction. Additionally, the process of transforming the extracted raw materials generates atmospheric pollutants. Therefore, when we consider the current model of extraction, production, consumption, and disposal in nature (a linear economy), we can see the importance of creating a sustainable model that preserves natural resources and mitigates the effects of consumption patterns. In this regard, the objective was to conduct a systematic review on a global scale to understand the challenges and limitations of applying the circular economy in agriculture. The methodology followed the criteria for preparing a systematic review, with the extraction of scientific studies from databases. Some challenges and limitations in implementing the circular economy in agricultural waste management emerged, including the need for further research and development of technologies to produce biomass, as well as government involvement in creating public policies and fostering social participation. Considering this, the study highlighted the need to prioritize environmental issues as the primary focus in transitioning to a sustainable management model.

Keywords: Sustainable model, circular economy, agricultural waste.

RESUMO

A produção e o consumo da sociedade têm impactado significativamente os recursos naturais devido à extração excessiva. Além disso, o processo de transformação das matérias-primas extraídas gera emissões de poluentes no planeta. Desse modo, ao se pensar no modelo atual de extração, produção, consumo e descarte na natureza (economia linear), observa-se a importância de criar um modelo sustentável que permita preservar os recursos naturais e reduzir os efeitos dos padrões de consumo. Nesse sentido, o objetivo foi realizar uma revisão sistemática, em escala global, para compreender os desafios e as limitações à compreensão da economia circular aplicada à agricultura. A metodologia seguiu os critérios para a elaboração de uma revisão sistemática, com a extração de estudos científicos disponíveis em bases de dados. Tornaram-se evidentes alguns desafios e limitações para a implantação da economia circular na gestão dos resíduos agrícolas, entre eles: a necessidade de mais pesquisas e tecnologias para a produção de biomassa, o envolvimento dos governos na criação de políticas públicas e a participação social. Considerando isto, destacou-se a necessidade de tornar a questão ambiental o foco principal no processo de mudança para um modelo de gestão sustentável.

Palavras-Chave: Modelo sustentável, economia circular, resíduos agrícolas.



Journal of Environmental Analysis and Progress © 2016
is licensed under CC BY 4.0

Introdução

O padrão de consumo ao longo do tempo passou por diversas transformações, devido às

mudanças no comportamento dos seres humanos. Todo esse processo de mudança na forma de consumo ocasionou o aumento da extração de

recursos naturais, com impacto direto na biodiversidade, como desmatamento, contaminação do solo e emissões de gases de efeito estufa decorrentes do descarte de produtos tóxicos (Rueangsan et al., 2021).

Nesse contexto, o consumo excessivo da sociedade intensifica a demanda por recursos naturais e impulsiona o desmatamento de áreas para a expansão de atividades industriais, agrícolas e pecuárias.

Na agroindústria, o processo de produção ocorre de forma linear, envolvendo as etapas de cultivo, colheita, beneficiamento, venda, consumo e descarte. Na maioria dos casos, esse processo gera uma enorme quantidade de resíduos, que, quando dispostos de forma irregular, podem causar danos ao meio ambiente. Conforme Hu et al. (2021), todo esse processo se enquadra na Economia Linear (EL), pois parte do princípio de que os resíduos gerados na produção não são reaproveitados.

Para ilustrar o consumo e o descarte, Sridhar et al. (2021) estimam que 1,33 bilhão de toneladas de alimentos são perdidas ou desperdiçadas anualmente em todo o mundo, e que, com o crescimento da população, os níveis de geração de resíduos subiriam para 2,2 bilhões de toneladas. Nesse contexto, fica nítida a necessidade de reaproveitamento e aplicação desses resíduos, como forma de reduzir os impactos na extração de novos recursos e os prejuízos à biodiversidade.

Em contrapartida a esse movimento da EL, os estudos de Sandoval, Jaca & Ormazabal (2017) apontam o surgimento da Economia Circular (EC) como resposta aos desafios econômicos e produtivos decorrentes da linearidade. A EC permite um fluxo cíclico de extração, produção e distribuição sustentável, com a reciclagem e o reaproveitamento energético dos resíduos no próprio processo produtivo.

Em 2015, os países europeus iniciaram o processo de transição da EL para a circularidade, com o objetivo de impulsionar a competitividade e promover um crescimento econômico mais sustentável. No plano, constam 54 medidas que abrangem todas as etapas, desde a concepção do produto, seguindo os padrões sustentáveis, até o retorno para reutilização, reciclagem ou reaproveitamento energético (Construcía, 2020).

No Brasil, a economia circular (EC) vem sendo analisada, principalmente em razão da pandemia de COVID-19, que exigiu medidas sustentáveis (Brasil, 2022a). Alguns modelos de negócios caminham rumo à circularidade da produção, mas, na Europa, onde a implementação está mais avançada, estima-se que a conversão para a economia circular possa gerar renda de cerca de

320 bilhões de euros até 2025. A meta europeia é reciclar 65% dos resíduos até 2035 e abolir a incineração de resíduos até 2040 (Silva, 2020).

Ao tratar especificamente do setor da agricultura, há uma grande quantidade de alimentos cultivados, comercializados e consumidos, gerando resíduos na colheita (restos de planta) e no beneficiamento (cascas e caroços). Nesse cenário, o panorama da ABRELPE (2021) e o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2022b) afirmam que a maior parcela dos resíduos sólidos gerados concentra-se no setor agrícola e na área urbana, especialmente na matéria orgânica. As informações comprovam uma economia agrária pautada por altos volumes de produção e geração de resíduos pós-consumo.

Diante do modelo linear adotado pela agricultura, faz-se necessário pensar em uma economia que busque a reincorporação e o aproveitamento máximo desses resíduos no processo de produção, agregando valor por meio dos tratamentos aplicados à biomassa gerada. Logo, o problema consiste na valorização e no uso de tecnologias capazes de impactar positivamente a construção de uma agricultura circular e sustentável.

Nessa conjuntura, uma alternativa pouco explorada no Brasil, que vem sendo discutida em nível mundial na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP27), é o sequestro de carbono, por meio da produção de biocarvão, como alternativa à captura dos gases de efeito estufa emitidos (Lima & Dias, 2023). O processo ocorre com o aprisionamento do CO₂ no solo, que, em condições normais, seria emitido na atmosfera, além de evitar a propagação do metano gerado pela degradação da biomassa.

Nesses termos, na visão de Foster, Roberto & Igari (2016), a resposta seria a economia circular (EC), que simboliza o fim da cultura do descarte, eliminando o pensamento de “produzir, usar e descartar”. Logo, esse novo modelo simbolizaria a produção sustentável e a introdução do conceito de “lixo zero”, com o aproveitamento pleno dos resíduos.

Diante da necessidade de incorporação de um modelo circular na agricultura, surge a seguinte questão: “O que se sabe sobre os desafios e limitações à incorporação da EC na gestão de resíduos sólidos?”. Para tanto, o estudo buscou compreender os desafios e as limitações à introdução da EC nas práticas agrícolas por meio de uma revisão sistemática da literatura.

Material e Métodos

A metodologia seguiu o modelo de Santos Jr. & Souza (2023), baseada na coleta de artigos científicos publicados em bases de dados.

A natureza dos dados é, em sua maioria, qualitativa, com base em análises de pesquisas que identificam o contexto da economia circular aplicado à produção de biocombustíveis de 2^a geração, de acordo com os atributos locais.

Foram seguidas quatro etapas, segundo o modelo de Santos Jr. & Souza (2023): 1 - Elaboração e busca de artigos, 2 - Escolha por título e resumo, 3 - Avaliação da qualidade, extração e 4 - Sintetização das informações.

Elaboração e busca pelos artigos

A elaboração foi dividida em três partes: Pontos da pesquisa: demarcação do assunto; escolha das palavras-chave e combinações; limitação do momento de publicação dos artigos; triagem da base de dados, Observação/Seleção, com a seleção segundo os critérios descritos anteriormente, com a inclusão ou exclusão de artigos selecionados e Descrição/Classificação, com organização dos artigos, conforme os critérios de relevância observado pelo pesquisador.

Como a busca foi realizada manualmente, artigos duplicados foram excluídos. Considerou-se um período de treze anos (2011-2024). O intervalo escolhido para a extração dos artigos foi o período em que houve uma imersão de pesquisas em escala mundial, como aponta Azevedo (2015), quando a Ellen MacArthur Foundation publicou o primeiro

de uma série de relatórios intitulada “Em direção a uma economia circular”.

A procura ocorreu em bases de dados selecionadas, garantindo maior alcance sobre os temas abordados. As bases de dados (*Scopus*, *Scielo*, *ScienceDirect* e *Springer*) têm acesso institucional pela Universidade Federal de Sergipe, por meio dos Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Os termos “OR” e “AND” foram usados para encadear as palavras-chave quando necessário. Foram usadas, em combinação, as seguintes expressões: *circular economy* (economia circular), *biomass* (biomassa), *circular system* (sistema circular), *sustainable agriculture* (agricultura sustentável), *organic waste* (resíduos orgânicos), *sustainability* (sustentabilidade), *Carbon credit* (crédito de carbono), *Carbon sequestration* (sequestro de carbono) e *2nd generation biofuel* (biocombustíveis de 2^a geração). No mais, os resultados foram organizados em uma planilha do Excel para a construção das etapas seguintes.

Escolha por título e resumo

Após o levantamento inicial, foi realizada a escolha, de acordo com a leitura do título e resumo. Um artigo foi inserido quando correspondia às opções de inclusão e excluído se acatasse apenas uma das opções de exclusão exibidas no Quadro 1.

Quadro 1. Opções para inclusão (OI) e exclusão (OE) dos artigos publicados, abordando resíduos da agricultura e seus impactos no ambiente. Fonte: Santos Jr. & Souza (2023).

Critérios de inclusão	OI1. Estudos com os impactos causados pelos resíduos da agricultura na biodiversidade OI2. Artigos qualitativos e quantitativos OI3. Pesquisas contendo dados primários e secundários OI4. Trabalhos que trazem no título e resumo informações sobre o tema
Critérios de exclusão	OE1. Qualquer idioma que não seja o inglês ou português OE2. Pesquisas duplicados ou repetidos OE3. Estudos incompletos, resumos, slides, rascunhos, capítulos de livros, enciclopédia e revisões OE4. Estudos com dados terciários e metanálises OE5. Artigos que não estejam disponíveis para <i>download</i> nos ambientes institucionais (Periódicos/UFS)

Caso existisse alguma dúvida quanto à relevância, realizava-se a leitura da introdução e da conclusão do artigo para verificar se abordavam diretamente a questão de pesquisa.

Avaliação da qualidade

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, avaliou-se a qualidade das pesquisas. Para tanto, foram utilizadas 10 perguntas para

avaliar a qualidade das pesquisas: 1. É um trabalho que envolve pesquisa?, 2. Há uma explicação objetiva da pesquisa?, 3. Em qual situação o estudo foi realizado?, 4. O ensaio foi apropriado para atingir os objetivos do estudo?, 5. As amostras serviram aos objetivos da pesquisa?, 6. Os dados obtidos serviram para responder às questões?, 7. Houve rigor nos dados analisados?, 8. Houve relação entre os pesquisadores e o objeto de

pesquisa?, 9. Os resultados estão claros? e 10. O trabalho tem valor acadêmico ou social?

As respostas às perguntas foram tabuladas, o que evidencia a qualidade da pesquisa. O somatório de cada questão variava de 0 a 1 e era classificado em quatro níveis de qualidade, conforme a pontuação correspondente. As categorias foram: Baixa, Média, Alta e Muito Alta. Caso o nível fosse baixo, o artigo era excluído (Quadro 2); do contrário, era conduzido à fase de extração.

Quadro 2. Categorização dos artigos selecionados por nível de qualidade, com versões sobre resíduos e seus impactos no ambiente. Fonte: Dybå & Dingsøyr (2008).

Baixa	Média	Alta	Muito alta
0 ≤ N ≤ 2,9	3 ≤ N ≤ 5,9	6 ≤ N ≤ 8,9	9 ≤ N ≤ 10

Extração e sintetização das informações

A extração das informações resultantes da análise dos artigos da fase anterior consistiu na retirada dessas informações para a confecção de uma planilha. Foram extraídos detalhes da publicação (referências) e informações contextuais (tipo de estudo, métodos de pesquisa e de análise de dados).

Considerando a sintetização das informações, o primeiro passo foi a construção de uma nuvem de palavras com base nos títulos dos artigos analisados, visando evidenciar a frequência e a importância das palavras destacadas no contexto da pesquisa. Para isso, foi utilizado o programa *WordCloud*, versão 2008, desenvolvido pela © Zygomatic. O outro ponto foi a resposta à questão levantada: “O que se sabe sobre os desafios e as limitações à incorporação da EC na gestão dos

resíduos da agricultura?”. Com uma abordagem qualitativa, o estudo limitou-se à inclusão de evidências provenientes de dados primários e secundários. Para facilitar o processo de sintetização das evidências, utilizou-se o Microsoft Excel 2013.

Resultados e Discussão

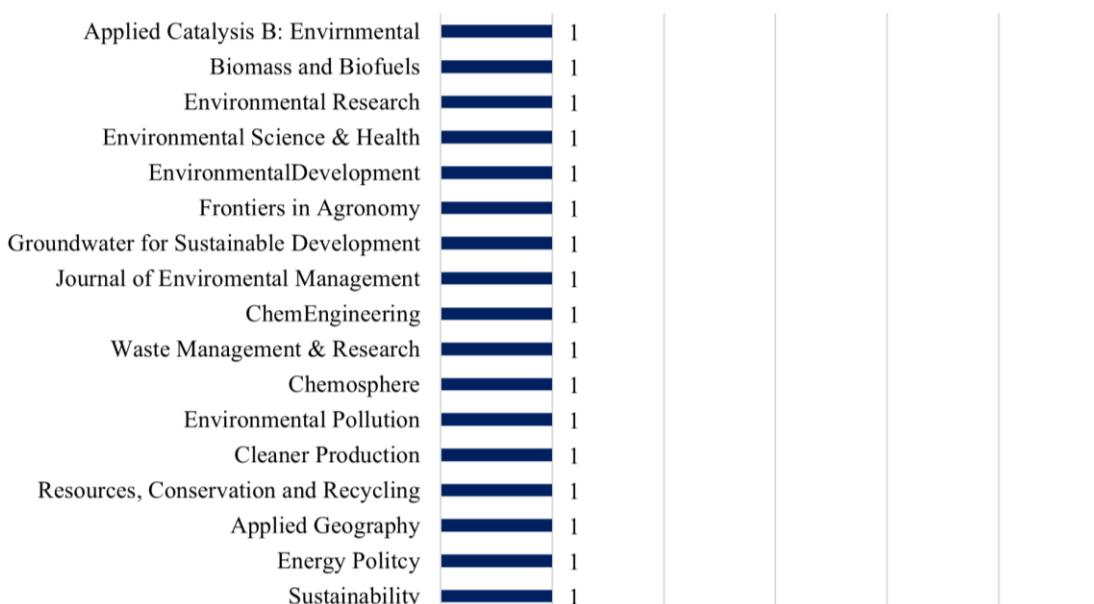
As buscas nas bases de dados (*Scopus*, *SciELO*, *ScienceDirect* e *Springer*) resultaram em 323 artigos, em comparação com a busca manual.

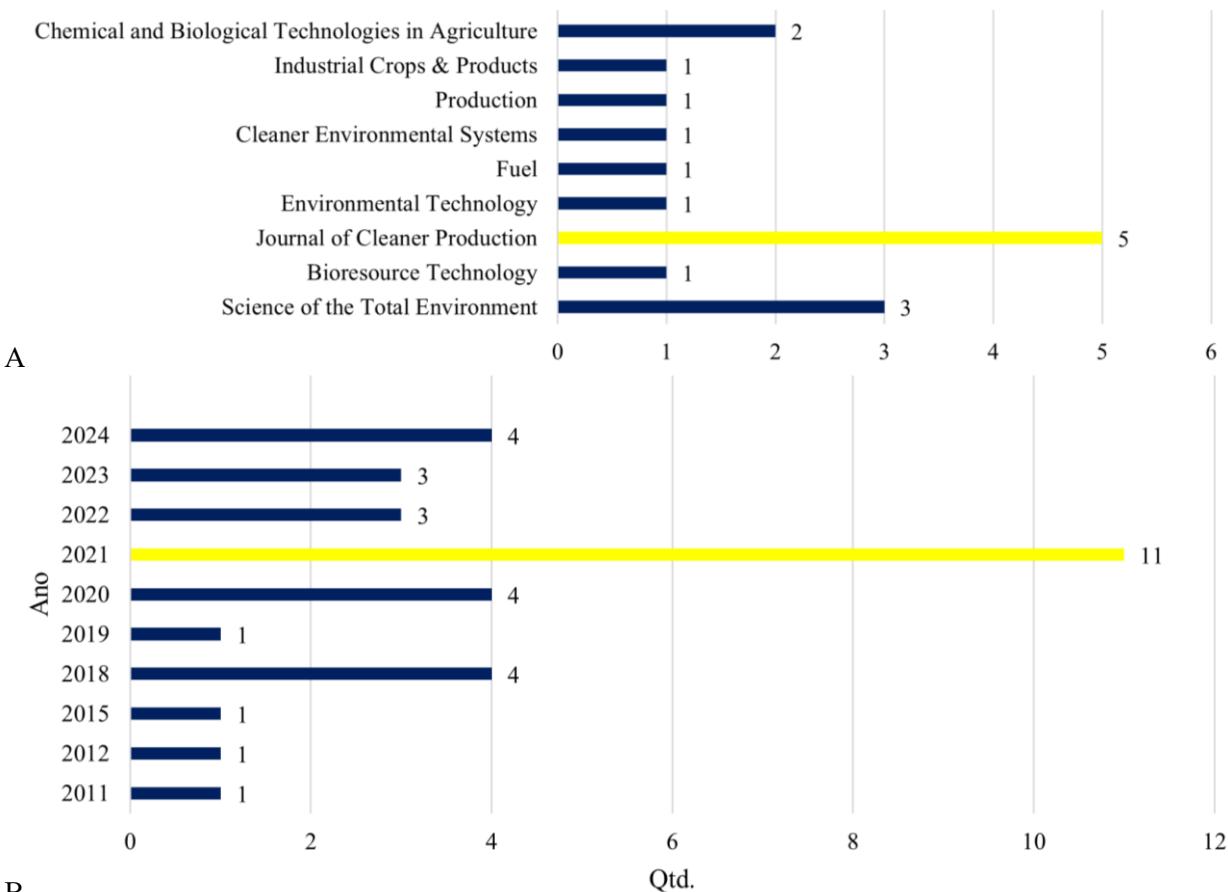
Ao final do processo, 86 artigos foram excluídos e 33 foram selecionados. A plataforma que mais apresentou artigos selecionados, em ordem de classificação, foi a *ScienceDirect* (57,6%), seguida de *Scopus* (24,2%), *Springer* (15,2%) e *Scielo* (3%). Como a busca foi realizada manualmente, os artigos duplicados foram excluídos para evitar distorções nos resultados.

A partir da análise dos 33 artigos, identificaram-se as pesquisas que trabalhavam com a agricultura familiar e os principais pontos abordados (tecnológico, econômico, governamental, social, inovador e ambiental).

A pesquisa de Zabaniotou et al. (2015) aponta que a EC pode melhorar o tecido social das zonas agrícolas e estimular a criação de novos empregos, a estabilidade financeira, a redução dos custos de eletricidade, a promoção de novas formas de rendimento ambientalmente corretas e a revitalização da produtividade agrícola, com base na preservação da biodiversidade.

A quantidade de artigos selecionados por ano e o quantitativo por revista são apresentados nas Figuras 1AB. Além disso, de acordo com os critérios de seleção, não houve artigos selecionados em 2013, 2014, 2016 e 2017.





B

Figura 1. A. Quantidade de artigos publicados sobre economia circular e agricultura sustentável identificados nas bases de dados *Scopus*, *Scielo*, *ScienceDirect* e *Springer*; B. Quantidade de publicações no período de 2011 a 2024. Fonte: Santos Jr., Souza & Wisniewski (2024).

Ao observar o número de publicações por ano, 2021 se destacou com 11 artigos. Uma possibilidade para o elevado número de publicações neste ano, em específico, seria devida à pandemia de COVID-19, em que as questões ambientais se tornaram mais evidentes e os impactos ambientais causados pela humanidade foram mais discutidos na biodiversidade. Para exemplificar, Sánchez et al. (2023) afirmam que a situação causada pela pandemia de COVID-19 evidencia a necessidade de restaurar as economias, especialmente nos países em crescimento; logo, a EC deve indicar formas de alcançar esses objetivos socioambientais, econômicos e, principalmente, de redução das emissões de poluentes. Outro motivo seria o foco em pesquisas sobre a gestão de resíduos em diversas áreas, como a industrial, a construção civil e a urbana, fortalecido pela ideia de logística reversa. No setor agrícola, o estímulo é dado apenas pela devolução de embalagens de agrotóxicos; todavia, o setor é responsável por 24% dos GEEs (Yrjälä et al., 2022), o que evidencia a necessidade de medidas para o tratamento da biomassa descartada no processo de colheita e beneficiamento. Devido à escassez de pesquisas sobre EC e agricultura sustentável, com foco na

produção de biocombustíveis de 2^a geração, é preciso mais estudos nessa área, dado o impacto do descarte desses resíduos na biodiversidade.

Na análise das revistas, o destaque das publicações foi identificado no *Journal of Cleaner Production* (5). Foram analisadas as seguintes publicações: construção de um ecossistema circular na agricultura de comunidades rurais (Aguinaga, 2018), no estudo de Antoniou (2019) foi realizada uma proposta de gestão para os resíduos agrícolas mistos, por meio da abordagem sistêmica, no estudo de Rentzelas (2018) foi analisada a viabilidade financeira da pirólise dos resíduos plásticos da agricultura, na pesquisa de Rashid & Shahad, (2021) foram utilizados indicadores da EC na gestão dos resíduos alimentares, e foi analisado o potencial com o sequestro de carbono pela produção de biocarvão no estudo de Forfara et al. (2024). Nesse sentido, o *Journal of Cleaner Production* tem como escopo apresentar soluções voltadas a tecnologias limpas de produção que geram benefícios ao meio ambiente.

No Brasil, a principal fonte de incentivo à EC é a Lei 12.305 (2010), que dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos e reforça a

necessidade de reutilização, reaproveitamento e reciclagem, com o objetivo de maximizar os ganhos ambientais, econômicos e sociais decorrentes dos resíduos sólidos. Outro ponto identificado foi a necessidade de aproximação com a agricultura familiar, comunidades, associações e cooperativas que, muitas vezes, não têm acesso a essas tecnologias ou a suporte financeiro para a introdução delas. Entretanto, a EC possui ferramentas acessíveis que podem ser utilizadas no planejamento de modelos sustentáveis de produção, considerando as limitações e buscando tecnologias a serem adotadas em cada localidade.

Considerando a localidade dos estudos, destacam-se os países onde as pesquisas foram realizadas, como Índia (6), China (4), Brasil (3), EUA (3), Europa (3), Coreia do Sul (2), Itália (2), Singapura (2), Arábia Saudita (1), Canadá (1), Escócia (1), Grécia (1), México (1), Paquistão (1), Portugal (1) e Qatar (1).

Considerando o Brasil, foram identificadas com modelos de negócios que trabalham com a EC: no setor de design e recuperação de materiais, com engenharia reversa, reciclagem, reuso e manufatura, no setor eletrônico, com a transformação de materiais em novos produtos e serviços; na construção civil, com a redução e reaproveitamento de materiais, no setor têxtil e de confecções, com a criação de uma cadeia de valor circular e no setor agropecuário, com técnicas de reuso de água e utilização de energias renováveis, como solar, biogás, eólica e biomassa (Brasil, 2022c).

No aspecto metodológico, foram 16 artigos com características qualitativas, seis quantitativas e 11 qualiquantitativas. Em relação aos procedimentos e técnicas, foram considerados estudos bibliográficos (18), estudos de caso (9), experimentais (3), documentais (2) e de pesquisação (1). Os estudos revelaram uma tendência para análises mais técnicas de produtos como biochar, gás de pirólise e bio-óleo, com a verificação de suas características físicas e químicas. Vale ressaltar que esses pontos são de fundamental importância para alcançar modelos de produção sustentáveis; contudo, não se pode excluir os aspectos sociais e ambientais. Uma alternativa promissora na construção da EC é o "sequestro de carbono". Nesse contexto, estudos como os de Resende et al. (2011) exploram as aplicações do biocarvão como solução para reduzir as emissões de gases de efeito

estufa, incluindo o CO₂. O biocarvão, ao ser incorporado a processos produtivos e ao solo, não apenas retira o carbono da atmosfera, mas também melhora a fertilidade do solo e promove a sustentabilidade agrícola, alinhando-se aos princípios da EC. Corroborando essa visão econômica, em 2015, o PNUD elaborou novos objetivos e metas a serem cumpridos até 2030, entre os quais destacam-se os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Neste documento (Agenda 2030) estão elencados 17 objetivos e 169 metas específicas para alcançar o desenvolvimento sustentável. Integrando os ODS à discussão sobre os resíduos da agricultura/agroindústria, houve maior ênfase no objetivo 2, que trata da "fome zero e a agricultura sustentável", e no objetivo 12, que trata de "garantir padrões de produção e consumo sustentáveis" (ONU, 2020).

O apoio aos ODS 2 e 12 na agricultura se daria pela produção de biocombustíveis de segunda geração (biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise), permitindo o cultivo em áreas com grande deficiência hídrica e solo pobre em nutrientes, aumentando a oferta de alimentos para consumo e venda pelos agricultores. Igualmente, isso asseguraria um padrão de produção e consumo sustentável por meio do aproveitamento dos resíduos gerados pelos processos de colheita e beneficiamento, criando uma agricultura circular. Além disso, o uso do biocarvão promove o sequestro de carbono, impedindo que ele seja liberado na atmosfera.

Em suma, as pesquisas evidenciam a importância da construção da EC aplicada aos resíduos agrícolas e do incentivo à sustentabilidade e à adoção de tecnologias na produção de biocombustíveis de segunda geração.

Na etapa seguinte, realizou-se o mapeamento das evidências com base nos títulos dos artigos selecionados. O mapeamento respondeu a uma questão central para o desenvolvimento deste estudo: O que é conhecido sobre os desafios e limitações para a introdução da EC na gestão dos resíduos da agroindústria/agricultura? O mapeamento das evidências resultou na seleção de 33 estudos, que permitiram a construção de uma nuvem de palavras, com base nos títulos dos artigos selecionados (Figura 2).

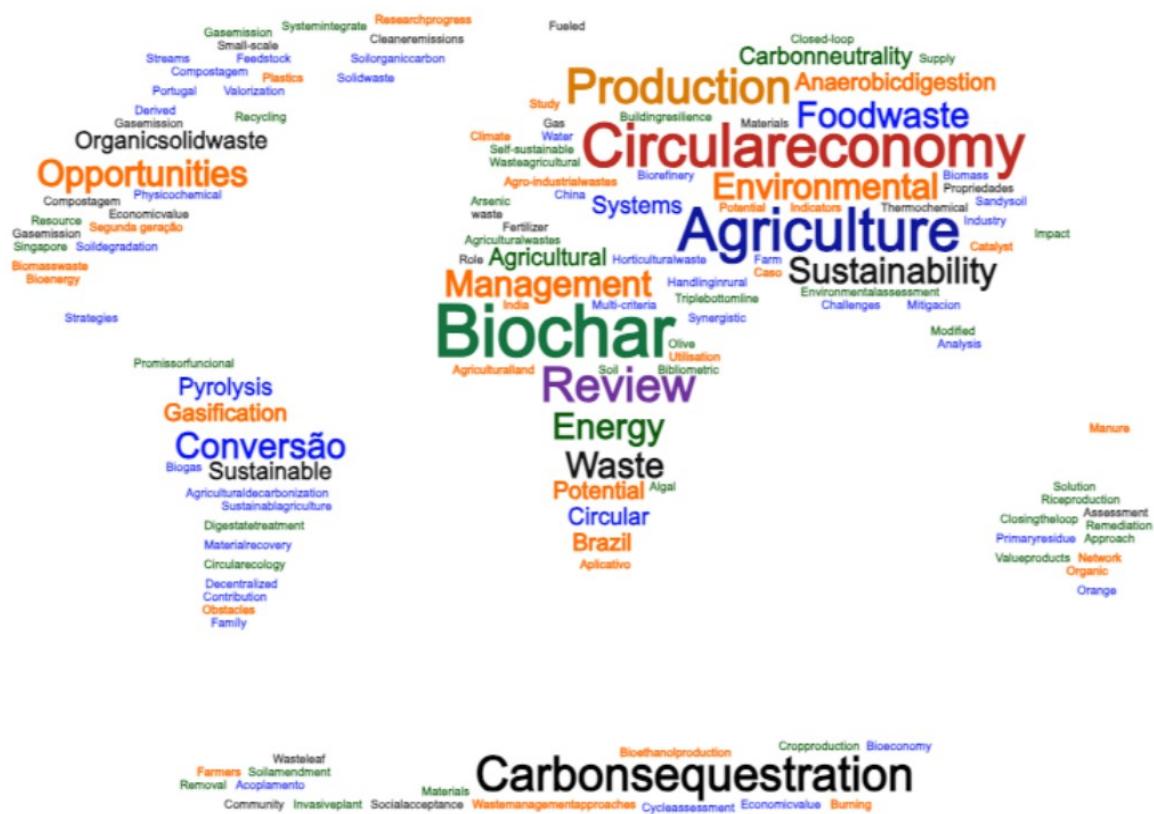


Figura 2. Nuvem de palavras com informações contidas nos títulos de artigos selecionados, envolvendo economia circular e agricultura sustentável, depositados nas bases de dados *Scopus*, *Scielo*, *ScienceDirect* e *Springer*, no período de 2011 a 2024. Fonte: <https://classic.wordclouds.com/>.

Nesse sentido, as palavras mais frequentes nos títulos foram *biochar* (23), *circular economy* (15), *agriculture* (5), *carbon sequestration* (4) e *production* (4). Nas pesquisas, ficou nítido que, para alcançar a EC, foram necessários o gerenciamento e a conversão dos resíduos produzidos por meio de reaproveitamento, reutilização ou reciclagem, com o objetivo de aumentar os ganhos ambientais, econômicos e sociais. Kurniawan et al. (2023) apontam que, anualmente, 5 bilhões de toneladas de resíduos de biomassa são gerados pelo setor agrícola. Esses recursos estão presentes em forma de caules,

folhas, raízes e sementes. Dessa maneira, a falta de gestão resulta em graves problemas ambientais e de saúde pública, e a produção do biocarvão aplicada às práticas agrícolas poderia sequestrar 2,5 Gt de CO₂. Logo, essa medida poderia reduzir as emissões de CO₂ em 6,25% do total. Seguindo esse pensamento, Enaime, Wichern e Lübken (2023) mostram que o uso do biocarvão poderia estabilizar, aproximadamente, 600 quilotons de dióxido de carbono equivalente no mundo. O Quadro 3 apresenta as evidências extraídas das análises dos artigos.

Quadro 3. Panorama dos desafios e limitações à introdução da Economia Circular (EC) na agricultura sustentável, em artigos depositados nas bases de dados *Scopus*, *Scielo*, *ScienceDirect* e *Springer*, no período de 2011 a 2024. Fonte: Santos Junior, Souza & Wisniewski Jr. (2024).

Artigos	Evidências extraídas por ocorrência													
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14
A2	x	x	x	x	x									
A3					x						x			
A5			x			x	x	x				x		
A8							x	x						
A9			x		x									
A10								x				x		
A11						x						x		
A12			x		x				x			x		
A14			x											
A15			x							x				

A17				x			x	x		x			
A19	x			x	x					x			
A22				x		x	x						
A23					x		x		x				
A43	x						x				x		
A44				x		x	x		x	x		x	
A46	x		x		x			x				x	
A47	x		x					x		x			
A48	x		x										
A49	x		x				x						
A50	x												
A51	x												
A54	x			x			x				x		
A61	x	x					x						
A62					x		x					x	
A63			x			x					x		
A64		x				x	x			x			
A66	x	x									x		
A67	x	x	x	x		x	x						
A68					x		x				x		
A69	x	x				x							
A70			x	x									
A71				x		x	x		x				

E1 = Falta de padrão para regularização; E2 = Emissão de poluentes CO₂, CH₄; E3 = Necessidade de documentos na literatura; E4 = Adoção de pesquisas em inovação e tecnologia; E5 = Explorar os resultados nas diversas aplicações; E6 = Ausência de políticas públicas; E7 = Aplicação em comunidades carentes; E8 = Aspecto financeiro; E9 = Dimensão territorial e transporte; E10 = Modificação dos resíduos; E11 = Consciência sociocultural; E12 = Necessidade de aproveitamento energético; E13 = Sustentar a quantidade de produção; E14 = Compreender o potencial dos solos. A2 (Hu et al., 2020); A3 (Lee, 2021); A5 (Aguinaga, 2018); A8 (Van Der Velden et al., 2022); A9 (Antoniou et al., 2019); A10 (Sridhar et al., 2021); A11 (Rentzelas et al., 2018); A12 (Lima et al., 2021); A14 (Arora et al., 2021); A15 (Fontes et al., 2021); A17 (Duan et al., 2020); A19 (Jindo et al., 2020); A22 (Adami & Schiavon, 2021); A23 (Rashid & Shahad, 2021); A43 (Galinato et al., 2011); A44 (Barrow, 2012); A46 (Sroufe & Watts, 2022); A47 (Ravindra et al., 2019); A48 (Gross et al., 2022); A49 (Shin et al., 2021); A50 (Mona et al., 2021) A51 (Abdelaal et al. 2020); A54 (Forfora et al., 2024); A61 (Kumar et al., 2024); A62 (Lyu et al., 2024); A63 (Singh & Verna, 2022); A64 (Yrjala et al., 2022); A66 (Zabaniotou et al., 2015); A67 (Kurniawan et al., 2023); A68 (Ngoc-Dan Cao et al., 2022); A69 (Enaime; Wichern; Lubken, 2023); A70 (Jindo et al., 2020); A71 (Fytilli & Zabaniotou, 2018).

Observando os desafios e as limitações à adoção da EC na gestão da massa residual da agroindústria/agricultura, alguns se destacaram. Dentre eles, temos a adoção de pesquisas em inovação e tecnologias (E4), o aspecto financeiro (E8), a ausência de políticas públicas (E6) e a transformação de poluentes (E2).

Nesse cenário, o resultado do Quadro 4 indica que a evidência extraída (E4) corrobora a ausência de pesquisas no âmbito da inovação (2%). No mais, apesar do aspecto tecnológico aparecer em 1º lugar, o principal desafio evidenciado é a introdução de tecnologias sustentáveis, além do aspecto financeiro (E8), que constitui barreira à compra de equipamentos e a investimentos em pesquisa.

A resposta à evidência (E6) seria a introdução de tecnologias para a transformação da

biomassa em biocombustíveis de 2^a geração, com incentivos financeiros por parte dos governos, por meio de políticas públicas que visem ao beneficiamento de pequenos(as) agricultores(as) organizados(as) em cooperativas ou associações.

Outro ponto crucial, evidenciado por Enaime et al. (2023), foi a necessidade de ampliar as pesquisas sobre biocarvão para além do ambiente laboratorial. A aplicação em campo é fundamental para avaliar o desempenho e a viabilidade do biocarvão em diferentes condições agrícolas.

Nesse panorama, no Brasil, até o momento, existe apenas uma fábrica em funcionamento na cidade de Lajinha, no estado de Minas Gerais, cujo gerenciamento é realizado pela empresa francesa NetZero. Além do Brasil, a empresa possui mais duas fábricas em Nkongsamba, em Camarões. A

NetZero busca reduzir a pegada de carbono por meio do uso de biocarvão na agricultura sustentável. A biomassa utilizada na produção de biocarvão é proveniente da cultura do café, produzida pelos agricultores da Cooperativa de Cafeicultores da Região de Lajinha – COOCAFÉ (NetZero, 2023).

Considerando a questão ambiental, o desafio é evitar a emissão de poluentes (E2) na atmosfera, gerados pelas atividades antrópicas, em específico, pelos resíduos da agricultura/agroindústria. No Quadro 4, a emissão de poluentes (E2) ficou na 4^a posição; na visão de Adami & Schiavon (2021), a questão ambiental foi colocada em segundo plano, ficando, em um primeiro momento, visível a busca por soluções voltadas ao aspecto financeiro, com lucros para empresas e governos. Kurniawan et al. (2023) sugerem que o sequestro de CO₂ pode ajudar na meta de redução da temperatura do planeta em 1,5°C.

A introdução da EC passa pelos desafios e limitações apresentados no Quadro 3. Dentre as 14 evidências extraídas, destacaram-se a adoção de pesquisas em inovação e tecnologia, o apoio financeiro, o incentivo a políticas públicas e a emissão de poluentes decorrente das práticas agrícolas. Nesse cenário, a resposta à questão levantada seria o fortalecimento, o incentivo e a regulamentação dos biocombustíveis de 2^a geração para a construção da agricultura sustentável.

Conclusão

É difícil introduzir a EC na agricultura. A agricultura sustentável se destaca pela reutilização de resíduos agrícolas na produção de biocombustíveis de segunda geração. A abordagem tecnológica na produção de biocombustíveis predominou.

Nessa vertente, as pesquisas utilizadas na revisão sistemática forneceram uma visão dos desafios e das limitações à introdução da EC na gestão dos resíduos agrícolas. Conseguindo traçar quais são os aspectos mais abordados em pesquisas que trabalharam com agricultura sustentável, EC, biocombustíveis de 2^a geração e sequestro de carbono. Sendo o aspecto tecnológico o foco das pesquisas sobre a produção de biocombustíveis.

Os estudos apontaram a necessidade de participação dos pequenos(as) agricultores(as) em pesquisas que trabalhem a EC na gestão dos resíduos da colheita e do beneficiamento das culturas. Os(as) pequenos(as) agricultores(as) são responsáveis pelo maior número de estabelecimentos com finalidade de produção e, consequentemente, de geração de resíduos, o que demonstra a necessidade de trabalhos voltados ao

aspecto tecnológico, destinados aos(as) pequenos(as) agricultores(as).

Além disso, as pesquisas, em sua maioria, ainda ocorrem em escala experimental, com resultados em escala reduzida, o que evidencia a necessidade de ações práticas, como a implantação de indústrias de transformação da biomassa em biocombustíveis de 2^a geração. Para tanto, é preciso promover políticas públicas que facilitem a instalação de indústrias desse tipo, reforçando a necessidade de modelos de produção e de consumo sustentáveis.

Ademais, a adoção de biocombustíveis surge como uma estratégia promissora para alcançar os ODS 2 e 12, impulsionando o combate à fome, a agricultura sustentável e a produção e o consumo responsáveis de resíduos agrícolas.

À luz disto, a implementação da EC enfrenta desafios e limitações, conforme evidenciado. Entre eles, destacam-se a necessidade de pesquisa em inovação e tecnologia, o apoio financeiro, as políticas públicas eficazes e a mitigação da poluição agrícola. Nesse contexto, o fortalecimento, o incentivo e a regulamentação dos biocombustíveis de 2^a geração surgem como uma resposta promissora para a construção de uma agricultura sustentável.

Agradecimentos

Agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado para Robério Satyro dos Santos Jr.

Referências

- Abdelaal, A.; Pradhan, S.; Alnouss, A.; Tong, Y.; Al-Ansari, T.; McKay, G.; Mackey, H. R. 2021. The impact of pyrolysis conditions on orange peel biochar physicochemical properties for sandy soil. *Waste Management & Research*, 39, (7), 995-1004. <https://doi.org/10.1177/0734242X20978456>
- Adami, L.; Schiavon, M. 2021. From circular economy to circular ecology: a review on the solution of environmental problems through circular waste management approaches. *Sustainability*, 13, (2), 925. <https://doi.org/10.3390/su13020925>
- Aguiñaga, E.; Henriques, I.; Scheel, C.; Scheel, A. 2018. Construindo resiliência: uma abordagem comunitária autossustentável para o triple bottom line. *Journal of Cleaner Production*, 173, 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.094>
- Antoniou, N.; Monlau, F.; Sambusiti, C.; Ficara, E.; Barakat, A.; Zabaniotou, A. 2019. Contribution to Circular Economy options of

- mixed agricultural wastes management: Coupling anaerobic digestion with gasification for enhanced energy and material recovery. *Journal of Cleaner Production*, 209, 505-514.
- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.055>
- Arora, S.; Jung, J.; Liu, M.; Li, X.; Goel, A.; Chen, J.; Wang, C. H. 2021. Gasification biochar from horticultural waste: An exemplar of the circular economy in Singapore. *Science of the Total Environment*, 781, 146573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146573>
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. 2019. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo. [file:///C:/Users/Win10/Downloads/Panorama_Abrelpe_2018_2019%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Win10/Downloads/Panorama_Abrelpe_2018_2019%20(1).pdf)
- Azevedo, J. L. 2015. A Economia Circular Aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. In: XI Congresso Nacional de Excelência em gestão, V. 13. pp. 1984-9354.
- Barrow, C. J. 2012. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Geografia Aplicada*, 34, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.008>
- Brasil. 2010. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União.
- Brasil. 2022a. Ministério da Integração do Desenvolvimento Regional. Rota da Economia Circular. Brasília. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-regional/rotas-de-integracao-nacional/rota-da-economia-circular>. Acesso em: 3 de abril de 2023.
- Brasil. 2022b. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília. <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>.
- Brasil. 2022c. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Agricultura Familiar. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em: 18 de outubro de 2022.
- Construcía. 2020. Que países lideram a mudança na economia circular. Disponível em: <https://www.construcia.com/pt/noticias/que-paises-lideram-a-mudanca-na-economia-circular/>. Acesso em: 10/02/2023.
- Duan, Y.; Pandey, A.; Zhang, Z.; Awasthi, M. K.; Bhatia, S. K.; Taherzadeh, M. J. 2020. Organic solid waste biorefinery: Sustainable strategy for emerging circular bioeconomy in China. *Culturas e produtos industriais*, 153, 112568. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112568>
- Dybå, T.; Dingsøyr, T. 2008. Empirical studies of agile software development: a systematic review. *Information and Software Technology*, 50, (9), 833-859. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.01.006>
- Enaime, G.; Wichern, M. E.; Lübken, M. 2023. Contribution of biochar application to the promotion of circular economy in agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1214012. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1214012>
- Fytilli, D. E.; Zabaniotou, A. 2018. Circular economy synergistic opportunities of decentralized thermochemical systems for bioenergy and biochar production fueled with agro-industrial wastes with environmental sustainability and social acceptance: a review. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 5, 150-155. <https://doi.org/10.1007/s40518-018-0109-5>
- Fontes, A. V.; João, I. M.; Silva, J. M. 2021. Multicriteria evaluation of biomass residues in Portugal to second generation bioethanol production. *Produção*, 31e20210060, 2001. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210060>
- Forfora, N.; Azuaje, I.; Vivas, K. A.; Vera, R. E.; Brito, A.; Venditti, R.; Gonzalez, R. 2024. Evaluating biomass sustainability: Why below-ground carbon sequestration matters. *Journal of Cleaner Production*, 439, 140677. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140677>
- Foster, A.; Roberto, S. S.; Igari, A. T. 2016. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. *Anais do Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*. São Paulo. <https://engemausp.submissao.com.br/18/anais/arquivos/115.pdf>
- Galinato, S. P.; Yoder, J. K.; Granatstein, D. 2011. The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. *Política energética*, 39, (10), 6344-6350. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.035>
- Gross, C. D.; Bork, E. W.; Carlyle, C. N.; Chang, S. X. 2022. Biochar and its manure-based feedstock have divergent effects on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in croplands. *Science of the Total Environment*, 806, 151337.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151337>
- Hu, Q.; Jung, J.; Chen, D.; Leong, K.; Song, S.; Li, F.; Wang, C. H. 2021. Biochar industry to circular economy. *Science of The Total Environment*, 757, 143820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>
- Jindo, K.; Audette, Y.; Higashikawa, F. S.; Silva, C. A.; Akashi, K., Mastrolonardo, G.; Mondini, C. 2020. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. *Tecnologias Químicas e Biológicas na Agricultura*, 7, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>
- Jindo, K.; Audette, Y.; Higashikawa, F. S.; Silva, C. A.; Akashi, K., Mastrolonardo, G.; Mondini, C. 2020. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: A review of the functions of biochar in growing media, composting and as a soil improver. *Tecnologias Químicas e Biológicas na Agricultura*, 7, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>
- Kumar, A.; Bhattacharya, T.; Shaikh, W. A.; Biswas, J. K. 2024. Valorization of invasive plant and leaf litter wastes into biochar: Production, properties and potential for arsenic removal. *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101066. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101066>
- Kurniawan, T. A.; Othman, M. H. D.; Liang, X.; Goh, H. H.; Gikas, P.; Chong, K. K.; Chew, K. W. 2023. Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *Journal of Environmental Management*, 332, 117429. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117429>
- Lee, J. T.; Ok, Y. S.; Song, S.; Dissanayake, P. D.; Tian, H.; Tio, Z. K.; Tong, Y. W. 2021. Biochar utilisation in the anaerobic digestion of food waste for the creation of a circular economy via biogas upgrading and digestate treatment. *Bioresource Technology*, 333, 125190. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125190>
- Lyu, H.; Lim, J. Y.; Zhang, Q.; Senadheera, S.; Zhang, C.; Huang, Q.; Ok, Y. S. 2023. Conversion of organic solid waste into energy and functional materials using biochar catalyst: Bibliometric analysis, research progress, and directions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 340, 123223. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123223>
- Lima, T.; Dias, A. 2023. Os países e as questões alimentares na COP 27: uma análise das declarações oficiais na Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) em Sharm El-Sheik. *Segurança Alimentar e Nutricional*, 30, e023030-e023030. <https://doi.org/10.20396/san.v30i00.8674039>
- Lima, P.; Moraes, M. F.; Constantino, M. A.; Paulo, P. L.; Magalhães Filho, F. J. C. 2021. Environmental assessment of waste handling in rural Brazil: Improvements towards circular economy. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100013. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100013>
- Mona, S.; Malyan, S. K.; Saini, N.; Deepak, B.; Pugazhendhi, A.; Kumar, S. S. 2021. Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar. *Chemosphere*, 275, 129856. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856>
- Microsoft Project for Windows. 2013. Versão 4.1. [S. I.]: Microsoft Corporation.
- Netzero. 2023. Você sabe quem é a NetZero? Disponível em: <https://www.instagram.com/p/CpP2yAGu9kL/?igsh=cmM4anNwcWtnncF2>. Acesso em: 22/02/2024.
- Ngoc-Dan Cao, T.; Mukhtar, H.; Yu, C. P.; Bui, X. T.; Pan, S. Y. 2022. Agricultural waste-derived biochar in microbial fuel cells towards a carbon-negative circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112965>
- Oliveira, G. F.; Kalid, R. A.; Souza, M. E. 2017. O Conceito Enade no Âmbito das Pesquisas Acadêmicas sobre os Cursos de Engenharia de Produção. XXXVII ENEGEP. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_247_428_32794.pdf. Acesso em: 2 de janeiro de 2023.
- ONU. Organizações das Nações Unidas. 2020. Transformando Nossa Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 59p. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf. Acesso em: 10/02/2023.
- Rashid, M. I.; Shahzad, K. 2021. Food waste recycling for compost production and its economic and environmental assessment as

- circulares economy indicators of solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128467>
- Ravindra, K.; Singh, T.; Mor, S. 2019. Emissions of air pollutants from primary crop residue burning in India and their mitigation strategies for cleaner emissions. *Journal of Cleaner Production*, 208, 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.031>
- Rentzelas, A.; Shpakova, A.; Mašek, O. 2018. Designing an optimized supply network for the sustainable conversion of agricultural plastic waste into higher-value products. *Journal of Cleaner Production*, 189, 683-700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.104>
- Rex, P.; Ismail, K. R.; Meenakshisundaram, N.; Barmavatu, P.; Bharadwaj, A. V. S. L. 2023. Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy. *ChemEngineering*, 7, (3), 50. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>
- Rezende, E. I.; Angelo, L. C.; Santos, S. S.; Mangrich, A. S. 2011. Biocarvão (biochar) e sequestro de carbono. *Revista virtual de química*, 3, (5), 426-433. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20110046>
- Rueangsan, K.; Kraisoda, P.; Heman, A.; Tasarod, H.; Wangkulangkool, M.; Trisupakitti, S.; Morris, J. 2021. Bio-oil and char obtained from cassava rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis. *Heliyon*, 7, (11), e08291. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08291>
- Suárez, Y.; García, L.; Hernández Nariño, A.; Saiz, L.; Cossío, N.; León, M. 2023. Una aproximación a la economía circular y su contribución en el contexto de la pandemia. <http://scielo.sld.cu/pdf/infd/n40/1996-3521-infd-40-e1336.pdf>
- Sandoval, V. P.; Jaca, C.; Ormazabal, M. 2017. Economía circular. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, 15, 85-95. <https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/308>
- Santos Jr., R. S.; Souza, R. R. 2023. Panorama dos impactos causados pelo descarte inadequado dos resíduos sólidos na biodiversidade. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 8, (2), 062-069. <https://doi.org/10.24221/jeap.8.2.2023.5284.062-069>
- Shin, J.; Park, D.; Hong, S.; Jeong, C.; Kim, H.; Chung, W. 2021. Influence of activated biochar pellet fertilizer application on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in rice (*Oryza sativa* L.) production. *Poluição Ambiental*, 285, 117457. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117457>
- Silva, C. 2020. Por que as empresas adotam a economia circular. *Retomada Verde*. Estadão. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/infograficos/economia-por-que-mais-empresas-apostam-na-economia-circular,1117170>. Acesso em: 20 de out. de 2023.
- Singh, J.; Verma, M. 2023. Waste derived modified biochar as promising functional material for enhanced water remediation potential. *Environmental Research*, 117999. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117999>
- Sridhar, A.; Kapoor, A.; Kumar, P. S.; Ponnuchamy, M.; Balasubramanian, S.; Prabhakar, S. 2021. Conversion of food waste to energy: a focus on sustainability and life cycle assessment. *Fuel*, 302, 121069. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121069>
- Sroufe, R.; Watts, A. 2022 Pathways to agricultural decarbonization: Climate change obstacles and opportunities in the US. *Recursos, Conservação e Reciclagem*, 182, 106276. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106276>
- Van Der Velden, R.; Fonseca-Zang, W.; Zang, J.; Clyde-Smith, D.; Leandro, W. M.; Parikh, P.; Campos, L. C. 2022. Closed-loop organic waste management systems for family farmers in Brazil. *Tecnologia Ambiental*, 43, (15), 2252-2269. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1871660>
- Wordcloud. 2024. Versão 2008. Zygomatic. Disponível em: <https://classic.wordclouds.com>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2024.
- Yrjälä, K.; Ramakrishnan, M.; Salo, E. 2022. Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality. *Current opinion in environmental science & health*, 26, 100339. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100339>
- Zabaniotou, A.; Rovas, D.; Libutti, A.; Monteleone, M. 2015. Boosting circular economy and closing the loop in agriculture: Case study of a small-scale pyrolysis-biochar based system integrated in an olive farm in symbiosis with an olive mill. *Environmental*

