

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**ECONOMIA CIRCULAR E PEGADA DE CARBONO DAS PRÁTICAS
CONSERVACIONISTAS NA CAFEICULTURA**

Daiane Pereira de Souza

DOURADOS-MS

2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**ECONOMIA CIRCULAR E PEGADA DE CARBONO DAS PRÁTICAS
CONSERVACIONISTAS NA CAFEICULTURA**

Linha de Pesquisa: Bioeconomia

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados – Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, para obtenção do Título de Doutor em Agronegócios.

Doutoranda

Daiane Pereira de Souza

Orientador

Prof. Dr. Clandio Favarini Ruviaro

Coorientadora

Profa. Dra. Carla Eloize Carducci

DOURADOS-MS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S729e Souza, Daiane Pereira De
ECONOMIA CIRCULAR E A PEGADA DE CARBONO DAS PRÁTICAS
CONSERVACIONISTAS NA CAFEICULTURA [recurso eletrônico] / Daiane Pereira De Souza. --
2023.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: CLANDIO FAVARINI RUVIARO.

Coorientador: CARLA ELOIZA CARDUCCI.

Tese (Doutorado em Agronegócios)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Simbiose Industrial. 2. Gases de Efeito Estufa. 3. Solo. 4. Agricultura Regenerativa. 5.
Avaliação do Ciclo de vida. I. Ruviaro, Clandio Favarini. II. Carducci, Carla Eloiza. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

DAIANE PEREIRA DE SOUZA

**ECONOMIA CIRCULAR E PEGADA DE CARBONO DAS PRÁTICAS
CONSERVACIONISTAS NA CAFEICULTURA**

Esta Tese foi julgada e aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Agronegócios com área de Concentração em Agronegócios e Sustentabilidade no Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal de Grande Dourados.
Dourados (MS, 23 de agosto de 2023)

Banca examinadora



Prof. Dr. Cláudio Favarini Ruviano (orientador)
Universidade Federal da Grande Dourados(UFGD)

Documento assinado digitalmente
 ANTONIO CARLOS VAZ LOPES
Data: 24/10/2023 18:40:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Carlos Vaz Lopes
Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)



Dra. Fernanda Bortolanza Pereira
GenomaA Biotech

Documento assinado digitalmente
 JAYLTON BONACINA DE ARAUJO
Data: 24/10/2023 15:07:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jaylton Bonancia de Araujo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)



Prof. Dr. Miguelangelo Gianezini
Centre of Applied Research in Management and Economics (CARME/Portugal)

AGRADECIMENTOS

Gratidão a Deus, por me permitir estar nesse no mundo e ter colocado no meu coração essa audácia de ser cientista, de gostar de estudar e de fazer o que eu gosto. E ainda me deu dois pilares que me sustentam aqui na terra, que posso chamar de pai e mãe.

Tudo começa com eles e por eles, meus pais, Sr. Evilázio Pereira de Souza e D. Josefa Pereira da Silva de Souza, principalmente minha mãe e meu irmão, Eduardo Pereira de Souza. Na vida a gente constrói laços, aprende a viver em sociedade, construímos nossa própria família e ganhamos voos fora de casa, mas quando aperta, é para eles que sempre voltamos. Dois senhores, sem quase nada de estudo, sem nem saber ao certo o que é uma pós-graduação, quí sá um doutorado, no meio de um sonho doido da filha, abraça, acolhe e não deixa a peteca nunca cair, a eles sem sombra de dúvidas minha eterna gratidão.

E na busca de construir nossa própria família conhecemos pessoas, e sonhamos, as vezes nem é nosso sonho, mas abraçamos; ao meu esposo Carlos Farid Villamayor Molas, me faltam palavras para te agradecer, por ter sido meu porto seguro, meu cais, a me ouvir, me acalmar e aprender a lidar com alguém do mundo científico, e no turbilhão de coisas ainda querer continuar mesmo sabendo que muitas vezes eu só queria meu computador e minha própria paz.

E ao mais importante, quando eu senti o real significado de vida, e do agir de Deus nela, ao meu filho, José Pedro Souza Molas, a ele meu eterno pedido de perdão, pelas inúmeras vezes que tive que me ausentar, ainda mais na fase tão pequena de descoberta do mundo dele e meu como mãe, nos seus primeiros meses de vida, em seu primeiro ano, mas eu precisava concluir um sonho. E foi por ele que consegui concluir essa etapa. Foi um ano e tanto.

Aos meus mestres e líderes: Prof Dr. Clandio Favarini Ruviano, Profa Dra. Carla Eloize Carducci, e aos amigos de estrada, Dr. Everton Vogel e Dra. Gabrielli Martinelli, sem vocês durante esses 4 anos, esse tema e essa tese, não existiria. Que Deus na sua infinita misericórdia possa sempre abençoar vocês e suas famílias, são anjos enviados para terra.

Existe sim, várias outras pessoas que me ajudaram a chegar aqui, desde a escola, faculdade e no mestrado. Ficaria dias e dias dissertando e nomeado, afinal todos que cruzam nossos caminhos fazem parte desse momento, mas por hora, esses

são os que consigo nomear e reverenciar em nome de todos os outros que passaram por minha vida e fizeram eu chegar até aqui, gratidão.

Sumário

CAPÍTULO I - APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA DE TESE	14
1. Introdução Geral	14
2. Revisão bibliográfica	18
2.1 Economia Circular.....	18
3. Objetivos	29
3.1 Objetivos Geral	29
3.2 Objetivos Específicos	29
CAPÍTULO II – REVISÃO SISTEMÁTICA DA ECONOMIA CIRCULAR NA AGRICULTURA	30
1. Introdução.....	31
2. Material e Método	33
3. Resultados	39
4. Discussões	65
5. Conclusão	69
6. Referências	70
CAPÍTULO III – A CIRCULARIDADE NA CAFEICULTURA ATRAVÉS DA PEGADA DE CARBONO	75
1. Introdução.....	76
2. Material e Método	79
2.1 Local de estudo	79
2.2 Caracterização do sistema de produção multipráticas conservacionistas ..	80
2.3 Objetivo e Escopo	83
2.4 Inventário do ciclo de vida (ICV)	83
2.4.1 Dados de <i>foreground</i>	84
2.4.1.1 Contabilização das operações mecanizadas	84
2.4.1.2 Emissão de óxido nitroso	88
2.4.1.3 Emissões de CO_2 de Calagem	88
2.4.2 Dados de <i>background</i>	89
2.5 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)	90
3. Resultados	91
3.1 Resultado do inventário (entradas e saídas)	94
4. Discussões	98
4.1 Gases de Efeito Estufa (GEE)	98
4.2 Pegada de Carbono	100
4.3 Economia Circular	102
5. Conclusão	103
6. Referências	106
CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
7. Referências gerais	111

ECONOMIA CIRCULAR E PEGADA DE CARBONO DAS PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS NA CAFEICULTURA

Resumo geral:

Evidências denotam que os sistemas de produção agrícola ainda não são ambientalmente sustentáveis e que a gestão das cadeias agroindustriais tem sido dominada por um modelo linear de produção. A fim de romper com esse modelo, a economia circular busca potencializar os fluxos de material e energia dentro de uma cadeia de produção, tendo como premissa reduzir o risco de esgotamento de recursos naturais, bem como, o aumento de preço de commodities. Neste sentido, a economia circular desenvolve e adapta produtos para que, ao invés de serem descartados, os mesmos possam ser reaproveitados e reinseridos no sistema, zerando ou reduzindo a necessidade de extração de novos insumos. No entanto, não há consenso na literatura científica em como ajustar as diferentes atividades relacionadas à economia circular implementadas pelas empresas. Assim, a fim de avaliar a circularidade de um setor ou cadeia faz-se necessário ter uma visão sistêmica do ciclo de vida dos produtos. Desta forma, esta tese tem como objetivo geral é evidenciar as características relacionadas a uma economia circular dentro de um sistema de multipráticas conservacionistas por meio da utilização da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida. Para isso serão analisadas as lavouras comerciais cafeeira da empresa AP, Piumhi –MG, que utilizam diferentes manejos para proteção do solo, denominado sistema Multipráticas conservacionistas, exemplo de prática conservacionista.

Palavras-chave: Meio Ambiente, Gestão Ambiental, Cadeias Suprimentos, Emissões, Simbiose Industrial

CIRCULAR ECONOMY AND CARBON FOOTPRINT OF CONSERVATION PRACTICES IN COFFEE FARMING

Abstract:

Evidence shows that agricultural production systems are not yet environmentally sustainable and that the management of agro-industrial chains has been dominated by a linear production model. To break with this model, the circular economy seeks to improve material and energy flows within a production chain, with the premise of reducing the risk of depletion of natural resources and the increase in commodity prices. In this sense, the circular economy develops and adapts products so that, instead of being discarded, they can be reused and reintroduced into the system, eliminating or reducing the need to extract new inputs. However, there is no consensus in the scientific literature on how to align the different circular economy activities that companies implement. Therefore, in order to assess the circularity of a sector or chain, it is necessary to have a systemic view of the product life cycle. In this way, this thesis has as general objective to highlight the characteristics related to a circular economy within a system of conservationist multipractices through the use of the methodology of Life Cycle Assessment. For this purpose, the commercial coffee crops of the company AP, Piumhi -MG, which use different management for soil protection, called conservationist multipractices system, example of conservationist practice, will be analyzed.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

Keywords: Environment, Environmental Management, Supply Chains, Emissions, Industrial Symbiosis

LISTA DE ABREVIATURAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
CO ₂	Dióxido de Carbono
EC	Economia Circular
EL	Economia Linear
EI	Ecologia Industrial
EE	Economia Ecológica
EEA	European Environment Agency
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Global Warming Potential
IIASA	International Institute for Applied System Analysis
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
MCI	Material Circularity Indicator
ODP	Ozone Depletion Potential
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Potencial de Eutrofização
POCP	Potenciais de Criação de Ozônio Fotoquímico
RAINS	Regional Air pollution Information and Simulation
SimaPro®	System for Integrated Environmental Assessment of Products
NH_3	Amônia
NO _x	Oxido de nitrogênio
SO ₂	Dióxido de Enxofre

LISTA DE TABELAS

Capítulo II

Tabela 1 - Relatório do protocolo da revisão sistemática e meta-análise	34
Tabela 2 - Consulta usada na pesquisa de banco de dados	36
Tabela 3 - Critérios de seleção dos artigos para revisão.	38
Tabela 4 - Listagem dos artigos revisados com as informações sobre objetivo, metodologia e resultados apresentados	46
Tabela 5 - Definições das principais metodologias utilizadas pelos autores na revisão	58

Capítulo III

Tabela 6 - Comparação entre o sistema convencional e multipráticas conservacionistas, fase de implantação	80
Tabela 7 - Dispersão, estatística descritiva, dos dados na fase produtiva das fazendas dos 5 anos de safra	83
Tabela 8 - Fatores de emissões para o uso de diesel	85
Tabela 9 - Parâmetros e fatores de emissão para cálculo de emissão de N ₂ O para a implantação do café 2015/2016 (IPCC, 2019).....	88
Tabela 10 - Inventário de emissões	89
Tabela 11 - Inventário com as entradas e saídas da etapa de implantação do cafezal 1ha.	89
Tabela 12 - Inventário de entradas e saídas da etapa da fase produtiva do cafezal nas fazendas para uma unidade funcional.	90
Tabela 13 - Emissão dos GEE na fase de implantação e produtiva do cafezal para 1ha	90
Tabela 14 - Emissão dos GEE na fase produtiva do café para as fazendas ao final dos 5 anos de safra	92
Tabela 15 - Emissão dos GEE do diesel na fase produtiva do café ao longo dos 5 anos das safras analisadas	92
Tabela 16 - Emissão dos GEE fase produtiva do café por ano para cada fazendas analisadas	92
Tabela 17 - Pegada de carbono das fazendas durante a fase produtiva do café para os 5 anos analisados	93
Tabela 18 - Entradas e saídas da etapa de implantação do cafezal	94
Tabela 19 - Entradas e saídas da etapa de produção do cafezal nas fazendas	95
Tabela 20 - Emissões de CO ₂ equivalente das saídas das atividades das fazendas do ano safra 2015-2016	96
Tabela 21 - Emissões de CO ₂ equivalente das saídas das atividades das fazendas do ano safra 2016-2017	96

Tabela 22 - Emissões de CO2 equivalente das saídas das atividades das fazendas do ano safra 2017-2018	97
Tabela 23 - Emissões de CO2 equivalente das saídas das atividades das fazendas do ano safra 2018-2019	97
Tabela 24 - Emissões de CO2 equivalente das saídas das atividades das fazendas do ano safra 2019-2020	98

Lista de Figuras

Capítulo I

Figura 1 - Escolas e conceitos chaves sobre EC	19
Figura 2 - ESG dividido nas ODS	21
Figura 3 - Ciclo biológico e ciclo técnico da EC.....	22
Figura 4 - Sistema de uma EC	27
Figura 5 - Sistema cradle to cradle	28

Capítulo II

Figura 6 - Etapas metodológicas do processo de pesquisa de literatura, usando o diagrama de fluxo de itens de relatório preferidos para revisões sistemáticas e meta-análises (PRISMA,2020).	37
Figura 7 - Tendência de publicação por ano: quantidade de artigos baixados nas bases de dados	40
Figura 8 - Distribuição de publicação de artigos por países, regiões	41
Figura 9 - Campos de estudos dos artigos	42
Figura 10 - Produtos e culturas abordados nos artigos revisados	43

Capítulo III

Figura 11 - Figura 11: Média de pegada de carbono para cada fazenda ao longo de 5 anos (kg CO ₂ eq./ kg café)	94
--	----

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA DE TESE

INTRODUÇÃO GERAL

Existem evidências de que os sistemas de produção agrícola e de consumo de alimentos ainda não sejam ambientalmente sustentáveis (LARAZEVIC, MIGUEL, 2020). A Economia Circular (EC) tem como base transformar bens que estão no fim de sua vida útil em recursos para novos produtos, fechando um círculo ecossistêmico e minimizando o desperdício. A fim de promover uma melhoria no sistema, a EC busca romper a sequência da economia linear; que possui conceito básico aplicado à extração do insumo, à fabricação do produto, à utilização e posterior descarte (CEBDS, 2018).

Diferentemente do modelo linear “*take-make-use-dispose*”, o modelo circular “*grow-make-use-restore*” pretende potencializar os fluxos de material e de energia dentro de uma cadeia de produção, tendo como premissa impulsionar os benefícios ambientais. A EC desenvolve e adapta produtos para que, ao invés de serem descartados, os mesmos possam ser reaproveitados e reinseridos no sistema, eliminando ou reduzindo a necessidade de extração de novos insumos (CEBDS, 2018; BARROS, 2019).

Para atingir o objetivo de uma economia mais circular, a sociedade precisa considerar a reutilização dos materiais para as gerações futuras, ricos em minérios. Segundo Velasco-Muñoz et al. (2021), avaliar o nível de circularidade na agricultura não tem apenas o intuito de fornecer orientações para tomada de decisão, mas principalmente apontar em quais etapas a circularidade está mais ou menos desenvolvida, permitindo evoluções constantes.

Parte considerável da agricultura e da gestão das cadeias agroindustriais no Brasil têm sido dominadas por um modelo linear de produção, tanto na parte econômica quanto tecnológica, ou seja, seguindo o modelo de extrair, produzir, consumir e, por fim, o de descarte. Exemplos inovadores e promissores da transição para uma EC, contudo, estão surgindo e permeando o mercado com: certificações ambientais, que adotam como primeira etapa do processo a transição para a EC; métodos regenerativos de cultivo, que estão sendo provados em escala; políticas públicas de processo de restauração de áreas degradadas; produtores, extraíndo valor adicional com o aproveitamento em cascata de produtos agrícolas; empresas e

comunidades tradicionais, cooperando na valorização de ativos da biodiversidade, sustentabilidade; e, ainda aplicação de novas tecnologias (Ellen Macarthur Foundation, 2020).

Os desafios sem precedentes da sociedade de hoje ressaltam a distribuição de um sistema alimentar inclusivo: água – segurança energética, esgotamento de recursos, adaptação às mudanças climáticas e custo de mitigação, igualdade de gênero, crise econômica, gestão de resíduos; dependência excessiva de fontes de energia não renováveis – combustível e gradual transição do carvão para fontes de energia renováveis de base biológica, como a biorrefinaria, a partir de biomassa. Nesse contexto, é preciso pensar no futuro desenvolvimento sustentável, em particular, o desenvolvimento agrícola, para lidar com as restrições de recursos, produção e consumo sustentável de alimentos, preocupação ambiental, ineficiência e sustentabilidade. A agricultura constitui-se na principal fonte de alimentos e resíduos, na produção de GEE e no fornecimento de energia da biomassa (ATINKUT et al., 2020).

A EC, porém, não significa utilizar apenas os resíduos de um setor, cadeia ou item em específico. Uma EC depende do valor dos recursos naturais maximizados indefinidamente, exigindo que praticamente nenhum resíduo irrecuperável ocorra. Dentro de uma economia considerada circular, existem pressupostos a serem seguidos pela seção/setor, com ênfase em dois princípios básicos: maximizar o serviço prestado pelos materiais incorporados nos produtos e minimizar a perda de serviços com o tempo (Sherwood, 2020). Para tanto, é importante considerar todos os fluxos de material em toda a cadeia de valor, a fim de se implementar, com sucesso, uma EC (Ellen Macarthur Foundation, 2020).

No mundo, a circularidade é de aproximadamente, 8,6% (Ellen Macarthur Foundation, 2022), ou seja, são poucas as empresas que praticam as diretrizes e formas de reutilização e sustentabilidade nas normas da EC. Existem pesquisas realizadas como de Linder *et al.* (2017), que buscam mensurar a circularidade de um setor ou cadeia, ou como a de Moraga (2019), que demonstra que a EC pode atuar em diversas etapas da cadeia de produção e de consumo, utilizando indicadores, obtidos por meio da abordagem de ferramentas, que mensurem os possíveis impactos ambientais do sistema, produto ou serviço analisados. Neste sentido, uma das ferramentas disponíveis é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) que consiste em um

método capaz de analisar produtos ou serviços ao longo dos ciclos de design, produção, consumo, uso e descarte, incluindo interações com sustentabilidade.

De mais a mais, Lu e Halog (2020) trazem uma mensuração da sustentabilidade¹ atrelada à EC, por meio da ACV, utilizando-se dessa metodologia para examinarem e aprimorarem a base teórica, dando robustez à EC, juntamente com as práticas existentes de ACV.

Os países, que possuem práticas ligadas à EC, incluem os Estados Unidos, Finlândia, Alemanha, Holanda, China, Coréia, Japão e África do Sul (ATINKUT et al., 2020). Dentre esses, a Holanda, a Alemanha e a China se destacam sobre a aplicação da EC em seus territórios. Em 2050, a Holanda, pretende ser a referência global em produção sustentável de café e possuidora de uma das principais certificadoras de café sustentável, a UTZ². Agora parte da Rainforest Alliance, prevê ter todas suas atividades econômicas, baseadas na EC (SYNGENTA, 2020). Vale ressaltar também que a China, desde 2002, promove modelos de políticas de desenvolvimento sustentável, como a EC, restauração ecológica, civilização ecológica e PIB verde (ATINKUT et al., 2020).

No escopo deste trabalho, a sustentabilidade da cafeicultura depende do aumento da rentabilidade do produtor como forma de garantir sua permanência na atividade (SERAFIM, 2011). Vários cafeicultores têm colaborado em adotar novas tecnologias ou adaptá-las e, em alguns casos, desenvolvem suas próprias tecnologias para contornarem as adversidades da atividade, como é o caso do sistema intensivo de cultivo de cafeeiros, praticado na região do Alto São Francisco, MG, em propriedades dos municípios de São Roque de Minas, Vargem Bonita e Piumhi. Além disso, outras regiões, nos estados de Minas Gerais e São Paulo, também buscaram a certificação de suas produções de café (Serafim, *et al.*, 2011), fato que atesta que o setor cafeeiro é considerado pioneiro em certificação de sustentabilidade (Reinecke, Manning, & von Hagen, 2012).

¹ O desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. Essa definição surgiu na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pelas Nações Unidas para discutir e propor meios de harmonizar dois objetivos: o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental (WWF, 2021).

² O selo UTZ significa agricultura mais sustentável e melhores oportunidades para os agricultores, suas famílias e nosso planeta. O programa de certificação UTZ permite que os agricultores usem melhores métodos agrícolas, cultivem melhores colheitas e gerem mais renda. Eles aprendem como melhorar as condições de trabalho, se adaptaram-se às mudanças climáticas e proteger o meio ambiente.

No exemplo supracitado, houve um aprimoramento ao longo do tempo e hoje é denominado de Sistema AP Romero, caracterizado pela aplicação de altas doses de gesso e cultivo de braquiária, nas entrelinhas dos cafeeiros, além de outras técnicas que visam à proteção e à melhoria do solo para cultivo. É denominado por seus precursores como Sistema AP Romero, pois é considerado um sistema multipráticas conservacionistas de manejo do solo para cultivo cafeeiro da espécie *Coffea Arábica* (Serafim, *et al.*, 2011). Esta prática propicia o desenvolvimento de pesquisas e aplicação de novas técnicas na área, de forma a construir novos conhecimentos, em relação aos aspectos ambiental, social e econômico, verificando sua viabilidade, nas diferentes esferas (SERAFIM *et al.*, 2011).

O Sistema Multipráticas conservacionistas recebe certificações de sustentabilidade como Certifica Minas e a UTZ. O Certifica Minas café comprova ao consumidor que o processo produtivo atende às boas práticas agrícolas, em todos os estágios, como segurança alimentar, preservação do meio ambiente e responsabilidade social, bem como às normas socioambientais, previstas no programa (Instituto Mineiro de Agropecuária, 2020).

Em relação à Certificação UTZ, é imperioso salientar que esse programa é de certificação mundial, estabelece normas para garantir a produção agrícola e o fornecimento responsáveis de café, cacau e chá. Os produtos certificados pela UTZ atestam o compromisso com um negócio sustentável com responsabilidade social, boa prática agrícola e também rastreabilidade. Um terço do café comercializado mundialmente, de forma sustentável, tem certificação UTZ (UTZ *Certified*, 2020).

Ademais, o sistema Multipráticas conservacionista é dinâmico, suas práticas de manejo são ajustadas para cada situação, buscando conciliar a conservação do ambiente, do solo e da água, com as altas produtividades do cultivo do café. O aspecto inovador desse sistema está em reunir boas práticas de manejo, de forma condizente e sustentável, para a cafeicultura, podendo serem adotadas por produtores de diferentes níveis tecnológicos (Serafim, *et al.*, 2011).

As razões para a mensuração deste estudo ocorrem devido à pouca disponibilidade de informações inerentes ao ciclo de vida do produto aplicado em estudos do ACV e com o viés da circularidade acerca desta atividade, bem como, dados sobre as condições de relevo e da edafoclimáticas da região, material genético envolvido e uso pretendido do produto, seu manejo, variando substancialmente e reforçando a sua importância nas análises.

Entretanto, antes de chegar ao consumidor final, o ideal e necessário, é se fazer um estudo na fase inicial, primária do produto, ou seja, na lavoura. Dentro da literatura, falando sobre economia circular no café, foi encontrado poucos artigos e, mesmo assim, não se dispõem de dados para serem usados em possíveis inventários com o foco da presente tese, pois o regime de manejo praticado varia significativamente e, conseqüentemente, variam também as intervenções ambientais provocadas.

Vale ressaltar que, quando determinada região é pobre de dados, a modelagem específica não pode ser feita sem a adoção de pressupostos e de aproximações, como por exemplo, a utilização de dados de outras regiões. Tais informações podem distorcer os reais efeitos ambientais causados, já que diferenças de clima, relevo, fatores econômicos, mix de energia, podem influenciar fortemente a análise.

Por tanto, essa tese tem, como questão de pesquisa, verificar a existência de circularidade na produção agrícola, em um sistema conservacionista de café, com o objetivo geral de estimar as características do sistema conservacionista, que expresse a economia circular da cadeia produtiva do café.

1. Revisão bibliográfica

A revisão estabelece um suporte conceitual para o estudo, destacando: Economia Circular, Avaliação do Ciclo de Vida e o objeto de estudo, o café, tendo como suporte os principais estudos empíricos sobre o tema.

1.1 Economia Circular

Inicialmente a Economia Circular (EC) atraiu a atenção e foi trazida para discussões na década de 1970. E, anos mais tarde, já em 1990, na Grã-Bretanha o conceito foi mais bem elaborado e reformulado, com a realização de custos dos riscos associados à flutuação de matérias-primas, preços internacionais e geração de resíduos de um sistema de produção linear. Posteriormente, em 1996, a Alemanha se tornou o primeiro país a projetar leis ambientais, usando princípios da EC. Hoje é definida como o princípio que busca melhorar a eficiência dos recursos, sendo adotado como estratégia para desenvolvimento sustentável de muitas indústrias e economias, incluindo a União Europeia, China e Japão (LU e HALOG, 2020).

Avançando no tema, existem linhas interligadas de pensamentos, que são consideradas escolas, conceitos-chave, intimamente relacionados à EC (BRUEL et al., 2018; MIES; GOLD, 2021), conforme a Figura 1.

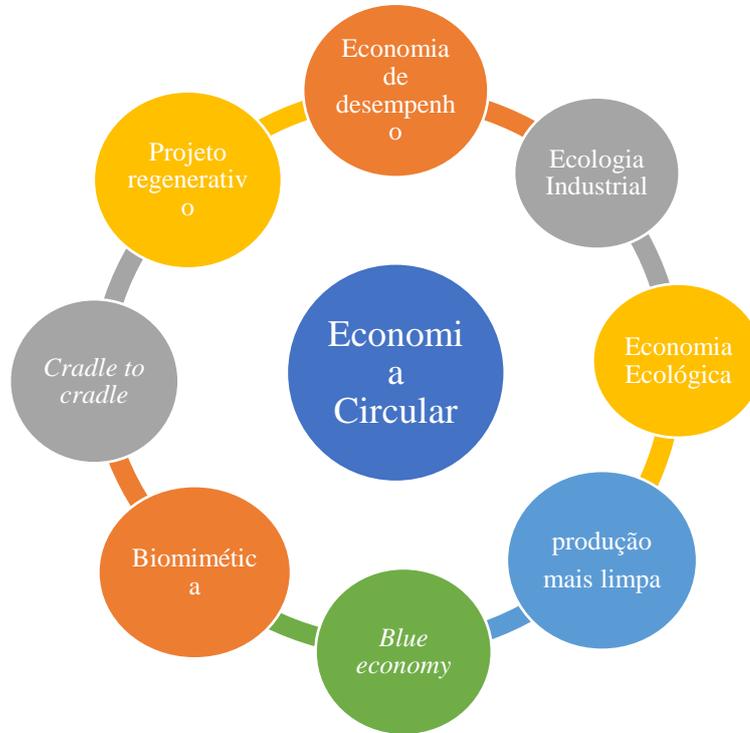


Figura 1- Escolas e conceitos chave sobre EC
 Fonte: Adaptado de (BRUEL et al., 2018) pela autora Daiane Pereira de Souza.

O conceito de EC é vagamente baseado em uma coleção fragmentada de ideias derivadas de alguns campos científicos, incluindo campos emergentes e conceitos semi-científicos. Essas fontes abrangem, por exemplo, ecologia industrial, ecossistemas industriais, simbioses industriais, produção mais limpa, revisões sobre os fluxos de materiais circulares dos sistemas de fabricação e desenvolvimento, sistemas de produto-serviço, ecoeficiência, design do berço ao berço, biomimética, a resiliência dos sistemas socioecológicos, economia do desempenho, capitalismo natural e o conceito de emissão zero (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

A Ecologia Industrial (EI), é um campo interdisciplinar de base à uma analogia programada entre sistemas industriais e ecossistemas naturais (BRUEL et al., 2018). É um campo de estudo voltado para as etapas dos processos de produção de bens e serviços do ponto de vista da natureza, tentando mimetizar um sistema natural pela conservação e reaproveitamento de recursos (CHERTOW, 2008).

É uma abordagem do sistema industrial, que visa transformar as atividades industriais em processos cíclicos, tomando os ecossistemas naturais como modelos,

fechamento de circuitos de materiais e energia, eficiência energética e desmaterialização. Isso requer a implementação de estratégias de manufatura sustentáveis e a mudança do design industrial de produtos e processos. A EI usa diferentes ferramentas ou métodos, como ACV, para avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, desde a extração da matéria-prima até o fim da vida; como também as ferramentas de eco design (BRUEL et al., 2018).

O modelo EC baseia-se em diferentes escolas de pensamento e suas origens estão principalmente enraizadas em campos como ecologia industrial (EI) e economia ecológica (EE) (BRUEL et al., 2018). A EE tende a fornecer uma estrutura geral e abrangente para estudar as interações economia-sociedade-ambiente, oferecendo, assim, percepções úteis sobre qualquer tipo de sustentabilidade ou política ambiental a seguir. Essa teoria se concentra na prevenção da poluição e do lixo, além da adoção de uma abordagem preventiva para os problemas ambientais. (BRUEL et al., 2018).

A EC pode reconciliar crescimento e desenvolvimento sustentável por meio da biomimética, ecologia industrial (KIRCHHERR, 2021) e seus conceitos-chaves, como projeto regenerativo, economia de desempenho, produção mais limpa e *Blue Economy*. A EC nasceu, portanto, da consciência de que a velocidade da produção e a exploração dos recursos naturais estão mais rápidas do que a capacidade da terra de se regenerar e, assim, precisamos conter o aumento de temperatura não somente através de tecnologias eficientes e do uso de energia renovável, mas através de uma mudança radical do processo de desenvolvimento que traz novos modelos de negócio.

Essas visões altamente idealizadas, como por exemplo, ecoeficácia, sistemas econômicos e sistemas naturais são positivamente reagrupados em um único sistema, que depende 100% de energia renovável e recicla todos os materiais. Este ideal de um sistema cíclico único, embora desejável, não é realista. A combustão libera emissões para a biosfera em formas e concentrações que a natureza não pode tolerar ou assimilar. Este é o exemplo mais óbvio da economia linear e o melhor exemplo dos limites das visões atuais da EC (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

A circularidade é um dos princípios fundamentais para se alcançarem os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), das Nações Unidas, especialmente o ODS 12, que visa “assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”. É um conceito amplo que vai além da gestão de resíduos e afeta todos os setores da economia (Ellen MacArthur Foundation, 2020), mas não é a solução para todos os

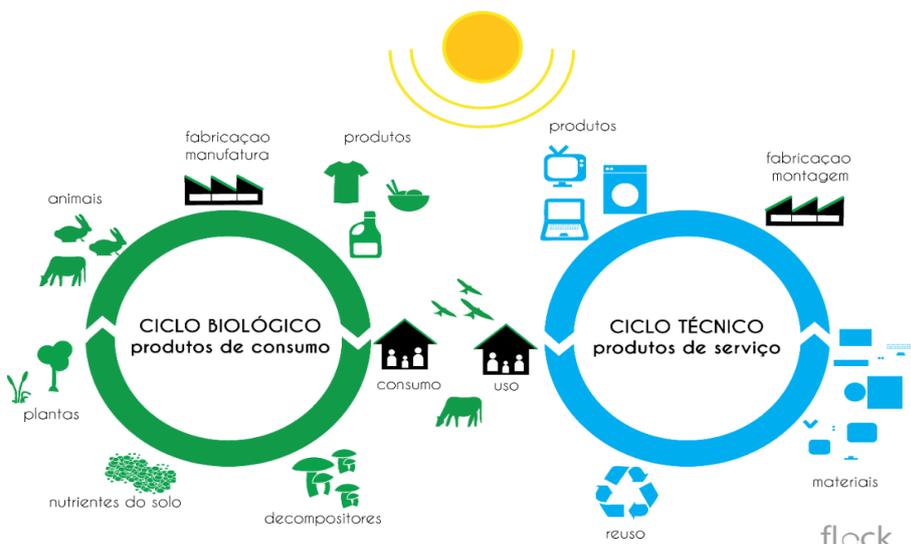
problemas ambientais. Segundo Brandão (2020), é uma, entre as várias abordagens que buscam promover a responsabilidade e o uso cíclico de recursos. Nos últimos anos, a EC vem sendo endossada como política para minimizar os encargos para o meio ambiente e estimular a economia (MORAGA et al., 2019).

Por tanto, é preciso estabelecer uma gestão circular de nutrientes, sendo necessário conectar as cadeias animal e cultural, ressaltando que a estrutura do adubo é vital para o futuro da sustentabilidade agrícola e ambiental equilibrada (FLYNN et al., 2023). Afinal uma maior circularidade pode contribuir para alguns dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) propostos pelas Nações Unidas, como os ODS 2, 7, 9, 11, 12 e 13 (BARCELOS et al., 2021), o que abraça muito a ideia da ESG, conforme a figura 2, onde podemos dividir as ODS, entre ambiental, social e governança, e ter uma ideia mais clara de como implementar a circularidade.



Figura 2 - ESG dividido nas ODS
Fonte: ONU (2023)

O modelo de EC pode ser dividida entre dois ciclos, técnico e biológico, conforme Figura 3. O termo “técnico” é baseado nos materiais, produtos e componentes que permanecem no mercado, pelo maior tempo possível, por meio de reparo, reaproveitamento, refabricação e reciclagem (ROCCHI et al., 2021). É o gerenciamento do estoque de materiais finitos. Para o ciclo biológico, os materiais são mais tóxicos e podem ser restaurados diretamente na biosfera, sendo a restauração a forma crucial nessa abordagem, pois permite que a EC, não seja apenas preventiva, mas ativa ao reparar danos anteriores (ROCCHI et al., 2021). Neste processo são considerados os alimentos e itens de base biológica, que são pensados em retornar



por meio de processos como compostagem e digestão anaeróbica.

Figura 3 - Ciclo biológico e ciclo técnico da EC
Fonte: Ideia Circular. 2021.

Podemos então dividir o enfoque de uma EC, sob duas perspectivas: o primeiro enfoque se distingue da economia linear por duas características: desaceleração e fechamento de recursos, ocorrendo através do design de bens de longa duração e extensão da vida útil do produto. Para prolongar a vida útil de um produto existe o reparo e, posteriormente, a remanufatura do bem. A utilização dos produtos é, portanto, prolongada ou intensificada. O processo se encerra quando acontece o pós-uso e a produção, fechando-se o ciclo, resultando em um fluxo circular de fontes, significando que os fluxos lineares de resíduos são transformados em recursos. Essa etapa se concentra, portanto, no ciclo tecnológico de recursos (MORAGA et al., 2019).

O segundo enfoque apresentado para a EC tem uma base mais ampla. São estratégias menos específicas, mas que existem em uma sequência que começa com planejamento e se estende em recursos, compras, produção e reprocessamento que

são projetados e gerenciados, tanto como processo quanto como resultado, para maximizar a funcionalidade do sistema e do bem-estar humano. Essa abordagem enfatiza a sustentabilidade e os efeitos das estratégias da EC dentro de uma economia, do meio ambiente e da sociedade (MURRAY 2017). Essas formas que caracterizam uma EC podem ser agrupadas, ou não, de acordo com a tentativa de se preservarem funções, produtos, componentes, materiais ou energia incorporada (MORAGA et al., 2019).

As soluções para uma EC se alteram na prática e até agora têm sido escassas. Uma das razões é a falta de indicadores quantitativos que evidenciem o que é relevante do ponto de vista ambiental e de recursos e qual processo de retenção de valor é a melhor opção em uma determinada situação (ROCCHI et al., 2021). Decisões sobre soluções circulares, no entanto, muitas vezes são baseadas, simplesmente, em crenças ou em métricas que não avaliam, explicitamente as questões de desempenho ambiental (HAUPT E HELLWEG, 2019).

Indicadores baseados em massa (aspecto físico), como taxas de reciclagem, são usados para avaliarem a circularidade de produtos individuais, empresas e até mesmo países inteiros; no entanto, esses indicadores podem falhar em abarcar a perspectiva ambiental. A maioria das métricas de circularidade visa capturar seus fluxos de recursos, embora falhe em considerar, simultaneamente, o período no qual um recurso está em uso, além de que poucos estudos se concentram em como medir, efetivamente, o nível circular de uma cadeia de suprimentos ou de serviços ecossistêmicos (HAUPT E HELLWEG, 2019; ROCCHI et al., 2021).

Haupt e Hellweg (2019) propõem um indicador complementar, baseado em impacto ambiental, valor ambiental retido (VAR), que mede os valores retidos através da reutilização, remanufatura, reparo ou reciclagem. Independente do indicador utilizado, ele deve ampliar o foco do fim da vida útil, durante todo o ciclo de vida e incluir a substituição de materiais primários, além de permitir monitorar a transição para uma EC de uma perspectiva ambiental e, possivelmente, de perspectivas econômicas e sociais. As análises e os resultados desta tese buscam avaliar não apenas a circularidade, mas também o desempenho ambiental, uma vez que a circularidade não é necessariamente equivalente à sustentabilidade ambiental.

A reciclagem dentro da EC é vista não como uma solução de um passivo ambiental³, mas como a criação de novas cadeias de valores, a partir de objetos desvalorizados. Na EC, os materiais considerados como resíduos, antes descartados, são utilizados para a produção de novos produtos, como fertilizantes, biogás e até na geração de energia elétrica. Materiais até então desprezados, em aterros sanitários, podem ser reprocessados em larga escala, a fim de serem reinseridos em novos ciclos produtivos, gerando renda e emprego.

Vale, porém, a ressalva de que não é apenas a bioenergia, celulose, papel, madeira, alimentos e biomateriais que podem fazer parte dos ciclos natureza-economia-natureza-economia, mas também outros resíduos produzidos pela sociedade podem servir como parte desses ciclos renováveis, ou seja, a EC deve utilizar os ciclos da natureza para preservar materiais, energia e nutrientes para uso econômico, ao mesmo tempo em que a natureza deve estar agregada a esse processo de tal forma que ela mesma possa se utilizar de suas próprias funções (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

Sob essa perspectiva, a reciclagem na EC pode ser classificada de duas formas, com uma vertente ligada à agregação de valor: *upcycling* e *downcycling*. A primeira é quando os materiais não são transformados e, sim, reaproveitados. É um processo de conversão de material antigo ou descartado em algo útil, podendo ser de maior valor agregado, que o do original; reduzindo assim o consumo de novas matérias-primas. O *downcycling* é quando ocorre descarte do material e é convertido em algo de menor valor econômico.

Novas oportunidades de negócios, mercado e emprego são criadas porque o valor embutido nos materiais é usado muitas vezes, mantido na circulação econômica pelo maior tempo possível, em vez de apenas uma vez, como é geralmente o caso do moderno sistema econômico global. Uma possibilidade dessa visão de negócios encontra-se espelhada na imagem aprimorada que auxilia o marketing verde de produtos e serviços (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

Portanto a EC é uma estrutura na qual empresas e consumidores estão integrados à natureza e à cultura, e a atividade econômica ocorre dentro da fronteira

³ Passivos ambientais são os danos causados ao meio ambiente, representados pelas obrigações e responsabilidades sociais das empresas, com os aspectos ambientais de suas atividades. Uma obrigação adquirida em decorrência de transações anteriores ou presentes, que provocaram ou provocam danos ao meio ambiente ou a terceiros, de forma voluntária ou involuntária, os quais deverão ser indenizados através da entrega de benefícios econômicos ou prestação de serviços, em um momento futuro.

do ecossistema e do conhecimento social, atrelada a valores e a normas. Uma estrutura circular fornece uma conceitualização capaz de se entender o ciclo de vida de um produto e sua integração com a natureza e a cultura. A EC é, pois, um ponto de partida adequado para se conceituar um modelo que permite avaliar informações sobre o trabalho de sustentabilidade, ao longo do ciclo de vida de estágios de produção, distribuição, consumo e redistribuição de produtos (INGULFSVANN, 2019).

Nessa ótica, podem ser inclusos novos conceitos de negócios como: locação e aluguel do serviço prestado pelo produto, estratégias de retomada, logística reversa e conceitos que potencializam o compartilhamento da função do produto entre vários usuários. A “economia compartilhada” pode trazer melhorias significativas de eficiência em diferentes áreas e serviços, assim como na forma de as pessoas viverem ou se organizarem, por exemplo, em suas acomodações de viagem (aluguel de apartamentos x quartos de hotel) e, ou mesmo, como as pessoas viajam ou planejam viajar (possuir um veículo x compartilhar seu uso) (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

Na economia compartilhada, os espaços de escritório são compartilhados ou quando não os espaços vazios são convertidos em habitação; os carros não são necessariamente de propriedade, mas usados por muitos indivíduos, que utilizam a economia digital para coordenarem o uso compartilhado. Os apartamentos de férias podem ser utilizados por muitas famílias beneficiando-se da economia digital e evitando-se, assim, a construção de novos espaços, que ficariam vazios durante a maior parte do ano. Apartamentos vazios devido a viagens podem ser alugados como “quartos de hotel”, reduzindo a necessidade de uso de materiais e energia para a construção de novos prédios. Os serviços de lavanderia podem ser compartilhados e os equipamentos e dispositivos domésticos, como trilos, podem ser compartilhados pelos vizinhos, em vez de cada apartamento possuir seu próprio trinado, que é usado cerca de 15 minutos, por ano. Pode-se perceber, portanto, que a nova cultura de consumo é uma parte crítica da economia circular em seu esforço para reduzir o fluxo linear de produção de materiais e energia natureza-sociedade-natureza (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

Os resíduos sólidos, biomassa, plástico e substrato, podem ser considerados materiais que não são produtos principais, dentro de uma economia linear e, portanto, dentro de um sistema com diferentes estágios de produção, consumo e uso. Não havendo uso adicional para eles, esses itens seriam descartados, mas essas saídas

do sistema de produção agrícola, sem contar a produção principal, poderiam ser consideradas, desde que esses produtos sejam reciclados ou reutilizados, no local de geração, como sendo uma abordagem de EC (ALTAMIRANO et al., 2020).

Com as mesmas características, Wainainab (2020) expõe que uma EC de base biológica considera os resíduos e os resíduos orgânicos como potenciais fontes que podem ser utilizadas para fornecerem produtos químicos, nutrientes e combustíveis necessários à humanidade, como digestão anaeróbica, biogás e outros produtos químicos (ácidos graxos voláteis), além de nitrogênio, através da compostagem.

A EC visa solucionar os desafios de recursos, resíduos e emissões que a sociedade enfrenta, criando uma cadeia de suprimentos total de consumo, restaurativa, tendo um novo começo: recomeçar, reincidir, regenerar, gerando ou produzindo novamente e, a partir dos produtos descartados, formar-se de novo e, ambientalmente, benigna (AVRAAMIDOU et al., 2020). No caso das agriculturas, os resíduos agrícolas compreendem um conjunto de recursos de biomassa inexplorados, que podem até representar encargos econômicos e ambientais. Eles podem ser convertidos em bioenergia e produtos de base biológica, por processos de conversão em cascata, dentro da EC, devendo ser considerados recursos residuais. As consequências ambientais e econômicas das cadeias de gerenciamento de resíduos agrícolas são difíceis de serem avaliadas devido à sua complexidade, sazonalidade e regionalidade (GONTARD et al., 2018).

Para melhorar ainda mais a eficiência de recursos e o gerenciamento de resíduos agrícolas na produção primária, é possível promover uma abordagem da EC. Os resíduos agrícolas são, principalmente, resíduos primários que podem ser transformados em recursos, usando processos intensificados de conversão, que podem gerar produtos potencialmente sustentáveis, como fertilizantes, energia, materiais e moléculas. A conversão desse resíduo agrícola é crucial para apoiar a dissociação do crescimento econômico ao bem-estar humano pelo uso de recursos (primários), impedindo pressão sobre a terra, causando efeitos adversos à biodiversidade e comprometendo a segurança alimentar global (PNUMA, 2011), vide Figura 4.

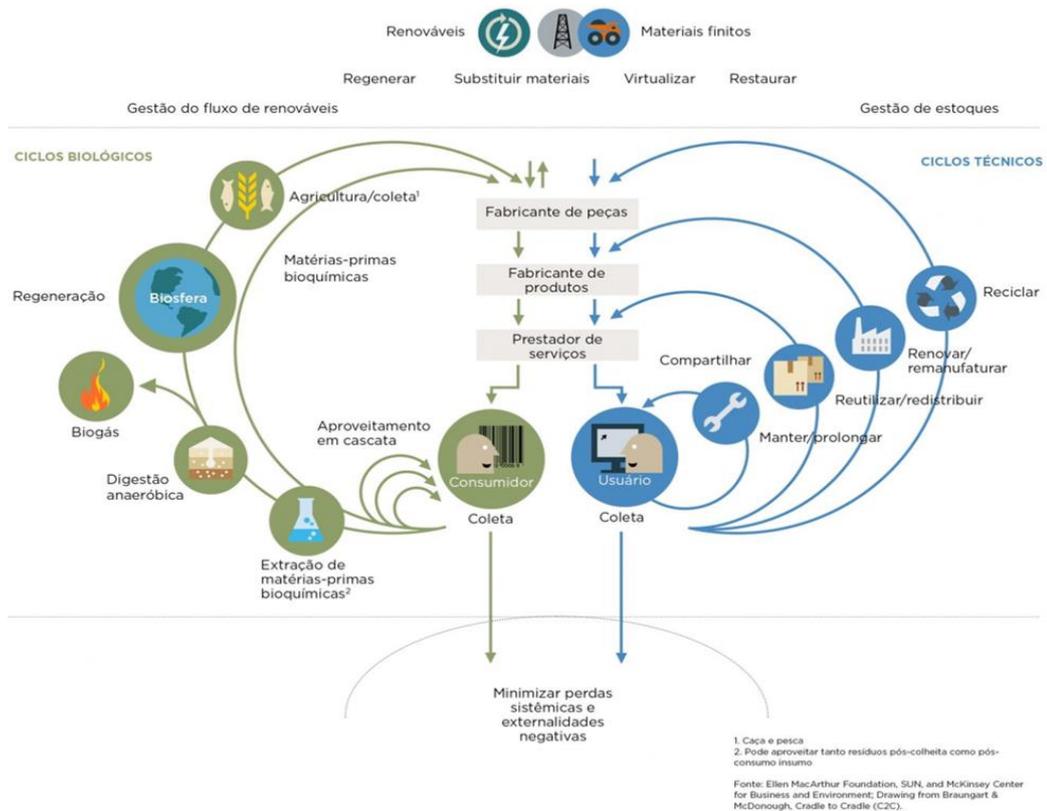


Figura 4 - Sistema de uma EC
Fonte: Ellen MacArthur Foundation, 2020.

Segundo Luz (2020), a EC não é sobre o que já se tem, é sobre o que pode ser atingido. A EC não soluciona problemas, ela modifica o sistema e busca evitar tribulações. Ser eficiente não é mais o suficiente. É um olhar ampliado para o *cradle to cradle* (do berço ao berço) (Figura 5), baseado em performances e novas relações comerciais. Esse conceito foi amoldado por Walter R. Stahel, um dos pesquisadores pioneiros que, ao final dos anos 70, cria uma das bases mais fortes da EC. Em seu trabalho, ele critica o uso intensivo de material para gerar riqueza e desenvolve um modelo de pensamento em ciclos que tem como foco a performance de produtos, que contribuem para: a redução de recursos; a prevenção de desperdícios; a competitividade econômica e a criação de empregos através da desmaterialização de produtos.

Ainda, de acordo com Luz (2020), algumas das premissas mais importantes da EC são:

1. O crescimento é desconectado do uso e da exploração de recursos naturais.
2. Ciclos fechados de produção são desenhados para não gerar resíduos.

3. O olhar sistêmico vai além do fluxo de materiais e avalia novas formas de produção e consumo.
4. A economia cresce de forma regenerativa e restauradora, com novos materiais e novas fontes de energia, tudo renovável.
5. O foco está em manter e criar valor ao longo da cadeia.

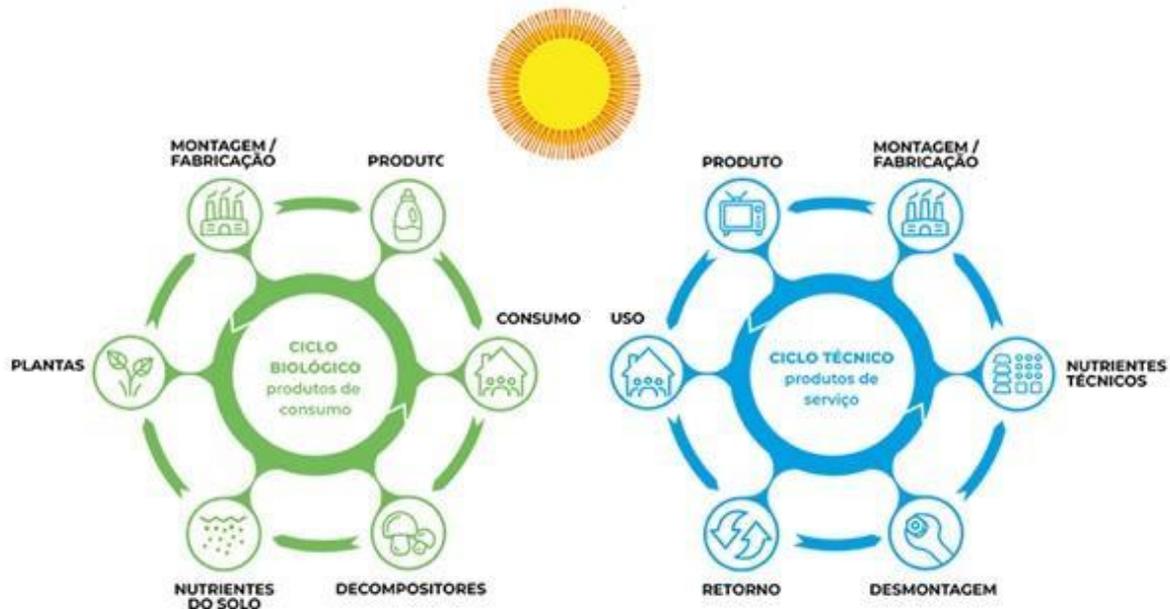


Figura 5 - Sistema cradle to cradle
Fonte: Ideia Circular (2020).

Alguns negócios priorizam o uso ou fornecem insumos renováveis que contribuem para o desenvolvimento de uma EC. Diante de toda a tendência mundial de busca e implementação de práticas de desenvolvimento econômico sustentável e de interações socioambientais responsáveis entre indústria, governo e sociedade, consolida-se, no cenário internacional, um novo modelo de crescimento que reúne várias escolas de pensamento, mecanismos e estratégias para a superação dos desafios encontrados na busca por um desenvolvimento econômico sustentável.

Quando falamos em EC, estamos comunicando não somente de inovação tecnológica, produção mais limpa ou uso eficiente de recursos, pois essas práticas irão apenas retardar o processo de desgaste ambiental. Expomos, sobretudo, sobre novas práticas de negócio, que provocam um repensar do modelo produtivo e influenciam o design e o desenvolvimento de produtos, promovendo também uma revisão de valores e atitudes, na sociedade, e um repensar no modo como consumimos.

O conceito de Ecodesign, por exemplo, baseia-se na integração de aspectos ambientais no produto desenvolvido ou em desenvolvimento. O ecodesign pode ser

usado como uma ferramenta para implementar os resultados da ACV ou pode ser uma diretriz, uma lista de verificação ou uma ferramenta analítica, que suporta um processo de desenvolvimento de produto baseado em ecoeficiência (BEAULIEU; DURME; ARPIN, 2016).

Embora cada qual apresente sua peculiaridade e visão sistêmica, a EC é uma versão de todos os elos (Figura 4, já apresentada) em uma única perspectiva e de forma mais consolidada, que abrange, atualmente, todas as visões: a econômica, a social e a ambiental.

ESTRUTURA DA TESE

A ECONOMIA CIRCULAR E A PEGADA DE CARBONO DAS PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS NA CAFEICULTURA

Questão de pesquisa: Existe circularidade na produção agrícola, através da ciclagem de nutrientes, em um sistema de multipráticas conservacionista?

Objetivo geral: Evidenciar as características relacionadas a uma economia circular dentro de um sistema de multipráticas conservacionistas por meio da utilização da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida.

Objetivos específicos:

Capítulo II

Revisar sistematicamente quais metodologias têm sido utilizadas para mensurar a economia circular na agricultura.

Capítulo III

Desenvolver o inventário do ciclo de vida e calcular a pegada de carbono dos cafezais manejados sob multipráticas conservacionistas, a luz da economia circular.

CAPÍTULO II

REVISÃO SISTEMÁTICA DA ECONOMIA CIRCULAR NA AGRICULTURA

Resumo:

A circularidade precisa ser compreendida em todas as esferas, não apenas na industrial, devendo estar associada à ideia de reciclagem dos lixos e resíduos. Preliminarmente, o mundo precisa aprender a ser circular, solucionar, antes de ser problema. Desta forma, a fim de se evidenciar como é a economia circular na agricultura e quais as ferramentas utilizadas, mapeou-se sistematicamente a literatura científica. Neste âmbito, a agricultura sustentável pode ser definida como uma forma de gerenciar a utilização do ecossistema agrícola de maneira a manter a diversidade biológica, a capacidade de regeneração, a vitalidade, a produtividade e a capacidade de cumprir importantes impactos ecológicos, econômicos, assim como as funções sociais nos níveis: local, nacional e global, sem prejudicar o ecossistema. Selecionamos as literaturas publicadas de 1995 a 2021, existentes na base de dados. Um modelo padrão com palavras-chave pré-definidas foi usado para resumir os aspectos abrangentes sobre o tema. A consulta e o estudo da literatura sistemática revelaram as inter-relações existentes com possíveis trocas ou as sinergias entre os diferentes aspectos das dimensões da economia circular. O mapeamento da literatura atual sobre economia circular, no âmbito da agricultura, pode apoiar as discussões informadas sobre lacunas de conhecimento e ajudar a priorizar pesquisas futuras em nível de agronegócios, bem como, a aplicar novas formas de ver a circularidade, nessa esfera. Ademais, as conclusões deste estudo visam assegurar um embasamento importante para a discussão e a priorização de futuras ações com o intuito de se expandir o conhecimento acerca da economia circular, apoiada no uso da Avaliação do Ciclo de Vida, no domínio da agricultura.

Palavras-chaves: Simbiose industrial, Sustentabilidade e Produção, Economia Verde, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Abstract: Circularity must be understood in all spheres, not only in the industrial sphere, and should be linked to the idea of recycling waste and residues. First, the world must learn to be circular, to solve before it becomes a problem. Therefore, a systematic review of the scientific literature was conducted to identify what circularity looks like in agriculture and what tools are used. In this context, sustainable agriculture can be defined as a way of managing the agricultural ecosystem to maintain its biodiversity, regenerative capacity, vitality, productivity, and ability to provide important ecological, economic, and social functions at local, national, and global levels, without damaging the ecosystem. Literature published between 1995 and 2021 was selected from the existing database. A standard model with predefined keywords was used to summarize broad aspects of the topic. The systematic literature review revealed existing interrelationships with possible exchanges or synergies between different dimensions of the circular economy. Mapping the current literature on circular economy in the context of agriculture can support informed discussions about knowledge gaps and help prioritize future research at the agribusiness level, as well as apply new ways of looking at circularity in this sphere. In addition, the conclusions of this study aim to

provide an important basis for discussing and prioritizing future actions to increase knowledge on circular economy, supported by the use of LCA in agriculture.

Keywords: Industrial symbiosis; Sustainability; Production; Green Economy; Life Cycle Assessment; Value chain

Introdução

A palavra “economia”, por definição, consiste no controle ou na moderação das despesas; é a poupança, sendo a Ciência que estuda os fenômenos relacionados com a obtenção e a utilização dos recursos materiais necessários ao bem-estar. Já o termo “circularidade” é o caráter ou a qualidade do que é circular. Caráter da definição defeituosa que remete para outras palavras que, por sua vez, são definidas voltando-se ao conceito inicial, não havendo, na verdade, definição. É a parte de um determinado ponto e, ao fim do percurso, retorna-se ao ponto inicial. Fazendo a junção das definições, Economia Circular (EC) torna-se, assim, o controle da utilização das matérias primas, a reutilização, o reuso e o reaproveitamento do ponto inicial ao final da alocação do produto.

Desde 2010, o termo EC vem se espalhando rapidamente no vocabulário padrão da política ambiental (Akerman, 2020), por ser uma abordagem ecológica que obedece aos princípios dos 3R (reduzir, reutilizar e reciclar) (ZHAIM, SHANGJE, 2010). A EC analisa as relações de correspondência mútua entre os seres vivos e seu meio social, econômico e/ou ambiental. Ao longo dos anos pesquisados, as citações que se pautam pela EC foram mencionadas sob várias formas de denominações, tais como: sustentabilidade, baixo carbono, energia sustentável, parques ecológicos industriais, simbiose industrial, biogás, entre outras terminologias, que se correlacionam. Pode-se dizer que não existe, ainda, somente uma definição sobre a EC, visto que ela se encontra ainda em constante construção, como arcabouço dessa ciência. Ademais, a expressão refere-se a um conceito contestado, sem definições unificadas (KORHONEN, et al. 2018; AKERMAN, et al. 2020).

Os princípios da EC, segundo Ellen MacArthur Foudation (2019), norteiam-se nos valores dos produtos, coprodutos e subprodutos que devem ser maximizados, em todas as fases da cadeia de abastecimento e entre as cadeias, com o objetivo de manter os insumos e os produtos em sua maior utilidade, em todos os momentos. O capital principal (natural) deve ser preservado e aprimorado pela substituição de

estoques finitos e de recursos renováveis. A eficácia do sistema deve ser promovida pela identificação e eliminação de externalidades negativas, como resíduos e poluição.

A EC busca, em suma, demonstrar como podemos utilizar os recursos naturais, de modo a serem infinitos, envolvendo estratégias de desenvolvimento sustentável, proteção ambiental, produção limpa, consumo ecológico, regeneração e reaproveitamento de resíduos, alinhando equidade social, qualidade ambiental e bem-estar econômico (SECCO et al, 2020).

Não obstante a relevância dos diversos setores da economia, a agricultura é uma atividade que tem por característica utilizar parte dos recursos naturais, a fim de nutrir o solo para o cultivo de vegetais úteis ao homem e/ou para a criação de animais. Ademais, apropria-se de um conjunto de técnicas, utilizadas para cultivar plantas, com o objetivo de obter alimentos, bebidas, fibras, energia, matéria-prima para roupas, construções, medicamentos, ferramentas, ou apenas para contemplação estética.

Denota-se que a EC agrícola tem os princípios básicos alicerçados em seus primeiros casos de sucesso no sistema industrial de países desenvolvidos (LI, DENG, YE, 2011; AN HAI-YAN et al, 2009), onde se combinam o desenvolvimento agrícola com a produção ambiental; com a recuperação do ambiente ecológico danificado, com a redução das entradas de recursos, diminuição dos danos dos resíduos agrícolas e com a realização da harmonia da produção agrícola (ZHAIM, SHANGJE, 2010). Deste modo, fica patente que a EC é altamente dependente do comportamento dos solos e da terra para a produção de alimentos e de outras biomassas (BREURE, LIJZEN, MARING, 2018).

A EC, nas questões agrícolas, consiste em reduzir a utilização de recursos não renováveis e as emissões de poluentes na produção, para restaurar e garantir a regeneração do solo, da água, das florestas e dos recursos de propagação, para prevenir a intrusão de espécies nocivas e, ao mesmo tempo, fazer uso máximo do material e da energia na produção agrícola (WANG JING, 2012). Todo produto residual torna-se um recurso e alguns desses podem ser retirados de um esquema de produção e usados em outros, sem serem descartados. A EC baseia-se na capacidade de recuperação de recursos do local, os quais ainda não estão em circulação, porém são provenientes de superprodução e de resíduos. Assim, em vez de importar novos produtos, estes são aproveitados, gerando uma agricultura

sustentável, preservando a fertilidade do solo, ajudando a localizar o uso adequado para os resíduos e resíduos orgânicos (DONIA, MINEO, SGROI, 2018).

Neste sentido, a EC na agricultura é vista como uma estratégia chave para produzir *commodities*, fazendo um eficiente uso dos recursos, evitando desperdícios desnecessários e gerando emissões de baixo carbono (YAZDANI, GONZALEZ, CHATTERJEE, 2019). Deste modo, é necessário projetar diferentes modos da EC, de acordo com as características locais de várias regiões, para poder ser mais eficiente e possuir diretrizes mais bem elaboradas de como mensurar a circularidade (Meng, et al, 2020). A partir de 1995, autores, como Wernick e Ausubel, evidenciam a necessidade de que para se tornarem ambientalmente compatíveis, precisa-se de melhores métodos para se analisarem as suas condições e se anteciparem mudanças futuras. Para atingir o objetivo de uma economia mais circular, a sociedade precisa considerar a reutilização dos seus materiais, como uma característica para as gerações futuras, já que eles são ricos em minério valioso.

O escopo desta revisão sistemática é entender como é mensurada a circularidade na agricultura e qual análise é útil para avaliar se as estratégias de EC são mais sustentáveis do que os modelos econômicos lineares – tradicionais, em sistemas de produção agrícolas. Assim, o objetivo deste trabalho é levantar artigos científicos e verificar quais metodologias mensuram a EC, na agricultura. Para abordar este tema, as seguintes questões de pesquisa serão respondidas: (1) quais os métodos aplicados para mensurar a circularidade; (2) como e quais métodos são combinados com outras abordagens na medição da circularidade; e (3) se os resultados de impacto foram usados para se ampliar a compreensão das implicações de sustentabilidade das estratégias de EC.

2. Material e métodos

A fim de fornecer uma visão abrangente sobre quais são as metodologias abordadas para mensurar quão circular é uma abordagem específica, na agricultura, foi realizada uma revisão sistemática e crítica da literatura científica existente.

Uma revisão crítica extrapola a mera descrição da literatura, mas deve avaliar extensivamente sua qualidade, buscando identificar os itens mais significativos, analisando os componentes expressivos e sintetizando os principais conceitos (GRANT e BOOTH, 2009).

Este estudo, sob esse aspecto, realiza uma extensa revisão, empregando a declaração de Relatório de Itens de Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA, 2020). O PRISMA foi usado como uma diretriz de revisão sistemática formal para coleta de dados, fornecendo uma metodologia padrão, aceita por pares, para contribuir com a garantia de qualidade do processo de revisão e sua replicabilidade. Um protocolo de revisão foi desenvolvido (Tabela 1 e Figura 1), descrevendo a estratégia de busca, os critérios de seleção dos artigos, a extração de dados e o procedimento de análise dos dados.

Primeiramente, seguiu-se a lista de verificação, adaptada para uso com submissões de protocolo para Revisões Sistemáticas da Tabela 3, em Moher D et al: Declaração de 2015 de itens de relatório, preferidos para protocolos de revisão sistemática e meta-análise (PRISMA-P).

Tabela 1 - Relatório do protocolo da revisão sistemática e meta-análise

Seção / tópico	Item da lista de verificação	Informação reportada	
		Sim	Não
Identificação	Identificar o relatório como um protocolo de uma revisão sistemática	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Atualizar	Se o protocolo for para uma atualização de uma revisão sistemática anterior, identifique como tal	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Cadastro	Se registrado, forneça o nome do registro (por exemplo, PROSPERO) e número de registro no Resumo	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Contato	Forneça o nome, afiliação institucional e endereço de e-mail de todos os autores do protocolo. Fornecer o endereço de correspondência físico do autor correspondente	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Contribuições	Descreva as contribuições dos autores do protocolo e identifique o fiador da revisão	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Emendas	Se o protocolo representar uma alteração de um protocolo previamente concluído ou publicado, identifique-o e liste as alterações; caso contrário, estabeleça um plano para documentar alterações importantes do protocolo.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Origem	Indicar as fontes de apoio financeiro ou outro apoio para a revisão.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Patrocinador	Fornecer o nome do financiador e / ou patrocinador da revisão.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Papel do patrocinador / financiador	Descreva as funções do (s) financiador (es), patrocinador (es) e / ou instituição (ões), se houver, no desenvolvimento do protocolo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Justificativa	Descrever a justificativa para a revisão no contexto do que já é conhecido.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Objetivos	Fornecer uma declaração explícita da (s) questão (ões) que a revisão irá abordar com referência aos participantes, intervenções, comparadores e resultados.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Critérios de elegibilidade	Especificar as características do estudo (por exemplo, PICO, desenho do estudo, cenário, prazo) e características do relatório (por exemplo, anos considerados, idioma, status da publicação) a serem	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Seção / tópico	Item da lista de verificação	Informação reportada	
		Sim	Não
	usados como critérios de elegibilidade para a revisão).		
Fontes de informação	Descrever todas as fontes de informação pretendidas (por exemplo, bancos de dados eletrônicos, contato com os autores do estudo, registros de estudos ou outras fontes de literatura cinzenta) com datas planejadas de cobertura).	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Estratégia de pesquisa	Apresentar rascunho da estratégia de busca a ser usado por pelo menos um banco de dados eletrônico, incluindo limites planejados, de forma que possa ser repetido.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gestão de dados	Descrever o (s) mecanismo (s) que será (ão) usado (s) para gerenciar registros e dados durante a revisão)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Processo de coleta de dados	Descrever o método planejado de extração de dados de relatórios (por exemplo, formulários-piloto, feitos de forma independente, em duplicata), quaisquer processos para obter e confirmar dados de investigadores).	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Itens de dados	Listar e definir todas as variáveis para as quais os dados serão buscados (por exemplo, itens PICO, fontes de financiamento), quaisquer suposições e simplificações de dados pré-planejados).	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Resultados e priorização	Listar e definir todos os resultados para os quais os dados serão buscados, incluindo a priorização dos resultados principais e adicionais, com justificativa)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Risco de viés em estudos individuais	Descrever os métodos previstos para avaliar o risco de viés de estudos individuais, incluindo se isso será feito no nível de resultado ou estudo, ou ambos; identificando como esta informação será usada na síntese de dados.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Síntese	Descrever os critérios sob os quais os dados do estudo serão sintetizados quantitativamente.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Se os dados forem apropriados para a síntese quantitativa, descreva as medidas de resumo planejadas, métodos de tratamento de dados e métodos de combinação de dados de estudos, incluindo qualquer exploração planejada de consistência (por exemplo, I 2, tau de Kendall)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Descrever quaisquer análises adicionais propostas (por exemplo, análises de sensibilidade ou subgrupo, meta-regressão)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Se a síntese quantitativa não for apropriada, descreva o tipo de resumo planejado.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Meta-viés (es)	Especificar qualquer avaliação planejada de meta-viéses (por exemplo, viés de publicação em estudos, relatórios seletivos dentro de estudos)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Confiança em evidências cumulativas	Descrever como a força do corpo de evidências será avaliada (por exemplo, GRADE)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fonte: Adaptado do autor, baseado em PRISMA, 2020.

Para selecionar e identificar os principais artigos científicos foi realizada uma pesquisa, usando as principais fontes de informação, juntamente com a combinação

de palavra-chave sobre o tema, vide Tabela 2, para obter uma amostra da literatura publicada e, assim, atingir o objetivo proposto.

Tabela 2 – Descritores utilizados para consulta as bases de dados

Base de dados	Pesquisa nos Strings ¹
Web of Science	(TI=(agric.*AND circular economy AND life cycle assessment) (TI=(agric.*AND circular economy AND livestock) (TI=(agric.*AND circular economy AND crop) (TI=(agric.*AND circular economy AND land use) (TI=(agric.*AND circular economy AND rural) (TI=(agric.*AND circular economy AND smallholder) (TI=(agric.*AND circular economy AND production) (TI=(agric.*AND circular economy AND farm) (TI=(agric.*AND circular economy)
Scopus	(TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "life cycle assessment") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "livestock") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "crop") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "rural") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "smallholder") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "production") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "farm") TITLE-ABS-KEY (agric* AND "circular economy" AND "land use")
Science Direct	Title, abstract, keywords: "agriculture" and "circular economy" Title, abstract, keywords: "agriculture" and "circular economy" and life cycle assessment" Title, abstract, keywords: "agriculture" and " livestock " Title, abstract, keywords: "agriculture" and "crop" Title, abstract, keywords: "agriculture" and "land Use" Title, abstract, keywords: "agriculture" and "rural" Title, abstract, keywords: "agriculture" and "Smallholder" Title, abstract, keywords: "agriculture" and "Production" Title, abstract, keywords: "agriculture" and "farm"

¹ Último acesso em 02 de fevereiro de 2023.

Na etapa de “identificação” do fluxograma PRISMA da Figura 6, um conjunto de palavras-chave foi selecionado, com base na formulação da pergunta, Tabela 2, ou seja, o escopo da pesquisa, que consistiu na busca de todos os documentos, que propusessem abordagens de economia circular na agricultura, para mensurar as vias circulares empíricas. A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus, Web of Science e Science Direct, por meio da combinação das principais palavras-chave, utilizando-se operadores booleanos (AND). A pesquisa foi realizada nos campos “título”, “resumo” e “palavras-chave” para as principais palavras-chave e em “todos os campos” para os demais termos, ou seja, agric*. As bases de dados foram consultadas, em outubro de 2022.

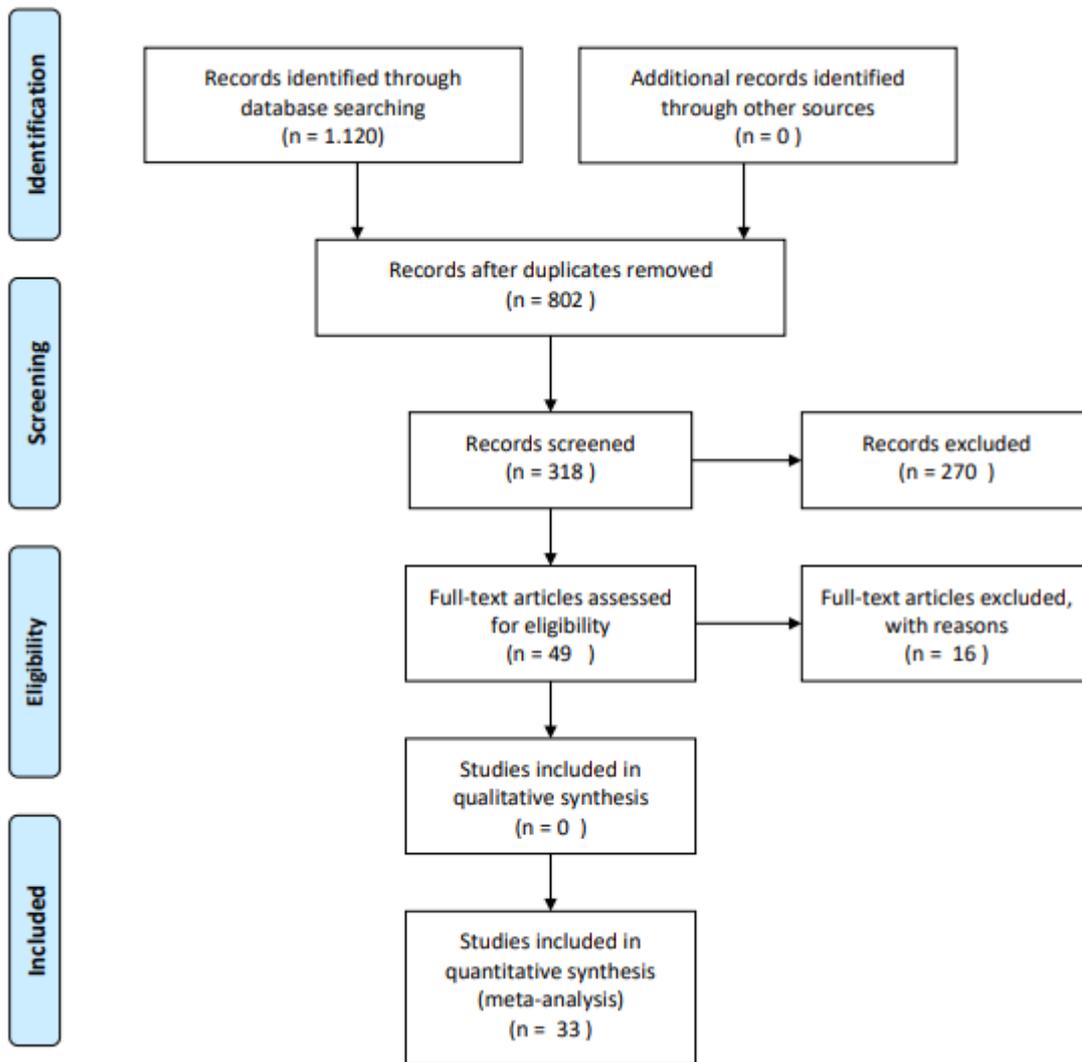


Figura 6 - Etapas metodológicas do processo de pesquisa de literatura, usando o diagrama de fluxo de itens de relatório preferidos para revisões sistemáticas e meta-análises (PRISMA,2020).

As buscas nas bases de dados Scopus, Web of Science e Science Direct resultaram em 64, 21 e 1035 artigos, respectivamente, para um total de 802 artigos, não duplicados. Foram excluídos os duplicados, resultando em 318 documentos, os quais foram submetidos a um processo de triagem. Uma primeira seleção foi feita por meio da ferramenta “Refinar Resultados” das bases de dados utilizadas para excluir revisão e material editorial e incluir apenas o idioma inglês. Em seguida, vide Tabela 3, apenas referências indexadas foram consideradas. Uma segunda triagem foi realizada com base no conteúdo dos resumos, excluindo artigos de discussão, ou fora do tópico e estudos que não enfocassem o setor agrícola ou abordagens sobre EC. Ao fazer isso, 45 artigos foram avaliados quanto à elegibilidade por meio da leitura do texto completo, em profundidade. Os estudos que não enfocavam diretamente a questão da medição quantitativa da circularidade foram descartados.

Por meio da aplicação dos critérios anteriormente especificados, o total de artigos encontrados foi reduzido a um portfólio final de 33 artigos, representativos, que integraram a síntese qualitativa. Esses artigos foram lidos na íntegra e analisados, individualmente, para fins deste estudo.

O período das pesquisas foi definido para artigos publicados no decorrer de 1995 a 2022 e as pesquisas registradas nas bases de dados com as palavras-chave, com o limite até o ano desta pesquisa. Os resultados da pesquisa foram importados para o Mendeley, onde se elaborou uma biblioteca dentro do software, com base em diferentes bancos de dados. Após a conclusão da pesquisa, todas as bibliotecas foram incorporadas a uma nova biblioteca e o número de referências encontradas, registradas.

As combinações dos termos da pesquisa foram definidas por meio de um processo iterativo entre coautores, garantindo que possíveis termos de pesquisa, normalmente usados em distintas áreas de pesquisa, fossem incluídos. Inicialmente, os títulos dos artigos foram digitalizados e os artigos, que claramente não se enquadravam no escopo deste estudo, foram removidos. Os resumos dos artigos restantes foram lidos para identificar artigos relevantes.

Tabela 3 - Critérios de seleção dos artigos para revisão.

Critérios de inclusão	
(a)	Trabalhos publicados e disponíveis para download
(b)	Trabalhos que tratam especificamente sobre economia circular, na agricultura
(c)	Trabalhos que abordam métodos de mensuração de economia circular
(d)	Trabalhos publicados em inglês
Critérios de exclusão	
(a)	Trabalhos que não foram possíveis de serem encontrados ou fazer download do PDF;
(b)	Trabalhos que não avaliam, ou não mensuram, a economia circular, na agricultura;
(c)	Trabalhos publicados como resumo expandido ou pôster;
(d)	Trabalhos publicados, em outra língua estrangeira, que não seja em inglês;
(e)	Trabalhos que apresentam avaliações sobre economia circular, sem apresentar o método utilizado;
(f)	Trabalhos que são estudos de revisão (bibliométricos, sistemáticos, entre outros).

Fonte: elaborado pela autora (2021).

Uma matriz de avaliação foi elaborada para sintetizar as evidências da pesquisa, classificando os artigos selecionados, de acordo com vários critérios integrados. Todos os artigos revisados foram categorizados por informações bibliométricas (autores, ano de publicação, título, periódico); estatística descritiva, que se refere ao local de aplicação do estudo de caso; campo de aplicação (a área de atividade agrícola); o principal produto em estudo; tópicos importantes sobre

circularidade e dados relevantes sobre métodos de avaliação de circularidade e seus indicadores (métodos usados).

Uma vez que a matriz foi concluída, os dados de entrada foram comparados e os resultados foram extraídos, qualitativa e quantitativamente, para se destacarem informações e relacionamentos significativos. Os principais destaques e conclusões dos estudos, selecionados, são relatados na seção seguinte.

3. Resultados

Baseado no Prisma (2020), a análise descritiva baseou-se na distribuição dos artigos, revisados ao longo dos anos, por país (com base no local de aplicação do estudo de caso), distribuição por periódico, área de aplicação (resultado do argumento principal ou tema de estudo), principal produto de referência (que se refere ao produto analisado, no estudo de caso) e os tópicos mais comuns que dominam a literatura de EC.

Os 33 artigos selecionados foram publicados no período de 1995 a 2022, conforme apresentado na Figura 2. Os artigos já publicados, em 2022, que se encontravam disponíveis on-line e para download em fevereiro de 2022 e que foram abarcados pelas palavras-chave, foram considerados e inclusos na refinação dos dados. Os resultados revelaram um aumento exponencial do número de publicações, relativas à aplicação de EC, na agricultura, como métricas práticas de circularidade, no setor, nos últimos 8 anos.

A abordagem dos artigos apresenta, em sua grande maioria, questões ambientais. Desde 1995, o primeiro artigo que aborda a nomenclatura de EC, traz em si uma visão de ecologia industrial, com os princípios da EC sobre prevenir a poluição, reduzir o desperdício e estimular a reutilização e a reciclagem de materiais; abordando questões sobre produtividade 'verde', avaliando a quantidade de materiais, considerados como resíduos de indústrias e desperdício de alimentos, em comparação com várias outras categorias de produtos (WERNICK; AUSUBEL, 1995).



Figura 7 - Tendência de publicação por ano: quantidade de artigos baixados nas bases de dados
 Fonte: Elaborado pela autora, acesso em 02 de fevereiro de 2021.

A partir desse estudo de 1995, as outras publicações ligadas à agricultura ocorrem entre 2009 a 2011 e os temas abordados se relacionam às questões ambientais, tais como projetos de poços de geração de metano com utilização de palha em construção, um ciclo entre o tratamento de palha e o esterco animal; agricultura familiar e sua grande escola produtiva, por meio da circularidade da agricultura, na província de Yunnan. Nos anos de 2013 a 2014 não houve publicações com foco nos itens selecionados para este estudo, retornando textos em 2015 com o tema: estudo sobre sustentabilidade das oliveiras, sequestro de carbono no solo por meio do *biochar*, *trade-off* entre sequestro de carbono e economia circular. Em 2016 não houve publicação relacionada a esta pesquisa; mas em 2017 constatou-se pesquisa, abordando a cadeia de valor da carne suína, com questões ambientais sobre como os impactos ambientais precisam ser enfrentados.

A partir dos últimos anos, mais especificamente entre 2018–2022, grandes esforços foram feitos para o desenvolvimento de estudos para medir a circularidade. Em particular, 27 documentos foram publicados, em 2021, sendo um resultado expressivo de 12 artigos. Da mesma forma, acontecimentos semelhantes ocorreram na revisão sistemática dos autores Stillitano et al. (2021), que obtiveram o mesmo período de ênfase de artigos catalogados, entretanto o enfoque dos autores recaiu sobre circularidade, com a utilização da metodologia ACV (Avaliação do Ciclo de Vida). Esses mesmos autores denotam também o fato de os artigos serem expressivos, em relação às questões ambientais.

Para tanto, até o presente momento, ainda não se encontrou na literatura, de forma consistente, um modelo único de mensuração da EC, que considere vários

aspectos: ambiental, social e econômico (SECCO et al., 2020). O que se observa é uma tendência em se fixar nas questões ambientais, por meio de outras metodologias.

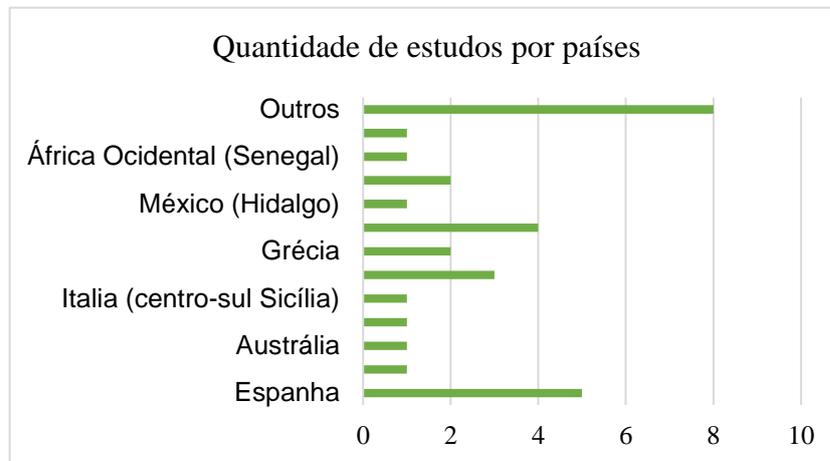


Figura 8 - Distribuição de publicação de artigos por países, regiões.
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

De acordo com o local de aplicação dos estudos de caso, as publicações variam entre países, vide Figura 8. A Espanha representa 15% das publicações, seguida da China com 12%. Essas descobertas foram consistentes com os resultados relatados por Homrich et al. (2018), que demonstraram também o grande interesse dos estudiosos europeus e chineses pelo desenvolvimento de modelos de EC particularmente, no setor da agricultura. Fora do continente europeu, a China representa o maior contribuinte na pesquisa deste tópico, corroborando com a pesquisa de Stillitano et al. (2021). Provavelmente, isso se deve a uma solicitação do governo chinês em estimular ações, em prol do meio ambiente, também via EC (GHISELLINI, et al 2016). O interesse em mensurar EC para usar como estratégia, apoio a tomadas de decisões e, até mesmo como políticas públicas, aparenta estar crescendo, no Brasil e na Inglaterra, com três e duas publicações, respectivamente.

Quanto ao tipo de contribuição, todos os 33 artigos foram publicados em periódicos científicos internacionais, com revisão por pares. Os periódicos com melhor classificação foram o Journal of Cleaner Production (5), Science of the Total Environment (4), Advanced Materials Research (1), Environmental Development Journal (1), Journal of Advanced Research (1), Materials Today: Proceedings (1), Resources Policy (1), Land Use Policy (1), Agronomy (1), Bioprocess and Biosystems Engineering (1), Catena (1), Climate Change Management (1), Energy Procedia (1), Geoderma (1), Geoforum (1), IEEE ACCESS (1), International Conference on

Management Science & Engineering (1), Resources Policy (1). Todas as revistas científicas abordaram temas de sustentabilidade e questões ambientais.

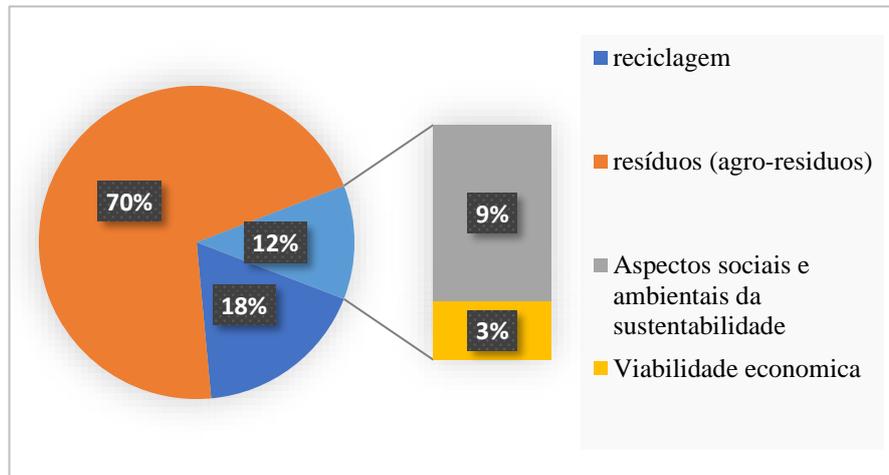


Figura 9 - Campos de estudos dos artigos
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Figura 9, apresentam-se os principais argumentos, abordados, nos estudos analisados, que norteiam três temas: resíduos (agro resíduos), reciclagem e mensuração dos aspectos sociais, ambientais e sustentabilidade. Como observado, 73% dos artigos tratam sobre a utilização dos resíduos, que variam entre utilização, realocação, reaproveitamento, na área de estudo, e, até mesmo, utilização dos resíduos para reciclagem. Seguindo as questões de reciclagem dos produtos (18%) abordavam também temas de *biochar* e pirólise. A análise dos aspectos sociais e ambientais da sustentabilidade representou apenas 9% dos estudos, que neste caso, eram casos que já utilizavam um dos princípios da EC e, em sua maioria, buscavam verificar se os estudos permaneciam sustentáveis e quais seus impactos.

Vários objetos de estudo são identificados nesta revisão, que incluem diversos segmentos da agricultura em diferentes províncias, vilarejos e regiões (Figura 10).

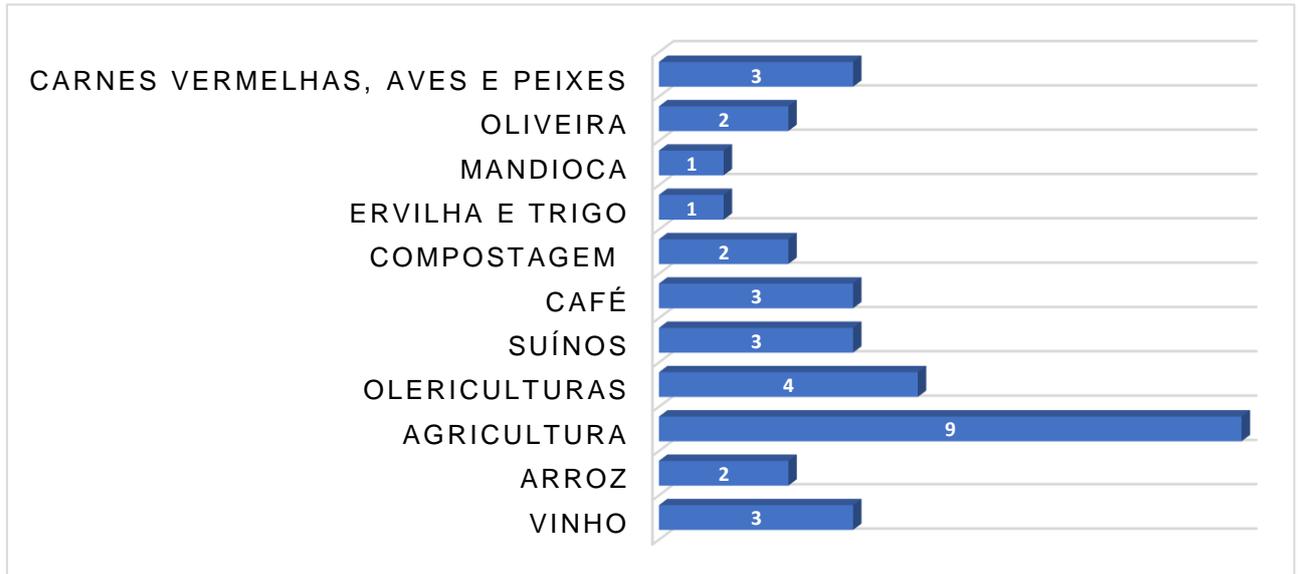


Figura 10 - Produtos e culturas abordados nos artigos revisados.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Chama atenção a utilização de compostagens e reciclagem dos produtos agrícolas, que até recentemente era algo inovador e mecanizado. A reciclagem de resíduos no setor de alimentos e bebidas, em geral, pode fornecer modelos de negócios ecossociais inovadores que podem nortear um modelo de cascata e circular. É relevante ressaltar que a inovação para sistemas de valorização, sustentáveis, baseados em resíduos, não se limita a aplicações tecnológicas dispendiosas ou elaboradas, mas precisa de soluções inovadoras sistêmicas para economias mais eficientes, em termos de otimização no uso de recursos com redução significativa de desperdício de alimentos e matérias-primas (MATRAPAZI; ZABANIOTOU, 2020). Algumas ferramentas foram utilizadas para tentar mensurar a circularidade do produto; diga-se tentar, pois ainda não existe uma única metodologia abordada que esteja consolidada, a fim de se calcular ou definir que o objeto de estudo, considerado, seja circular.

A maioria, se não todos os artigos, buscaram fundamentar ou enquadrar uma metodologia que se consolidasse em quantificar ou mensurar a circularidade do objetivo do estudo. Dos 33 artigos, 16, ou seja, 49%, buscaram, através das análises estatísticas, principalmente, a ANOVA, alcançar seus objetivos. Como Bekchanov e Mirzabaev (2018) justificam, os modelos matemáticos são ferramentas eficazes para melhorarem a tomada de decisão sobre o gerenciamento ideal de resíduos com externalidades ambientais e custos de gerenciamentos mínimos; desde avaliação de

análises multicritérios, simulações de cenários, e modelagem de otimização na programação circular, com em torno do objetivo dos artigos.

Outra metodologia, bastante usada e consolidada para avaliar os vários fatores sustentáveis, é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que representou 15% dos artigos estudados, em que autores como Stillitano et al. (2021) e Colley et al. (2020) salientam que a ACV tem sido usada para analisar os impactos ambientais das cadeias de abastecimento, além de ser uma ferramenta útil para selecionar as opções de EC e identificar o melhor cenário futuro. A ACV foi considerada por todos os autores como a metodologia mais adequada para avaliar produtos, serviços e tecnologias, na perspectiva da EC, incluindo estudos sobre biomassa para fins energéticos, produtos alimentares, produtos bioquímicos e biocompósitos, redução de resíduos e valorização de resíduos, também, para recuperação de energia e fabricação de produtos, a partir de matérias-primas (renováveis ou não renováveis).

Embora o uso de métodos clássicos de avaliação de impacto, como já mencionado, possam fornecer uma avaliação mais robusta do uso de recursos, eles não permitem uma avaliação completa de estratégias circulares, que muitas vezes são baseadas em outros fatores fundamentais, como a vida útil do produto ou a unidade funcional, entendida também como a unidade de medida de uso do produto. Pode-se elaborar o mesmo produto, usando o mesmo número de recursos, mas, ao aumentar a eficiência desses recursos, ao prolongar a vida útil do produto, podemos contribuir positivamente para aumentar a circularidade do processo (STILLITANO et al., 2021).

Dentre os estudos avaliados, também se obtiveram 21% deles distribuídos em abordagens metodológicas, acerca de ensaios de laboratórios (9%), análise de pirólise (6%) e Survey (6%). Os ensaios de laboratório foram estudos de casos nos quais se construía um cenário teste, ou em laboratórios com todo o ambiente controlado, mesmo se trabalhando com resíduos ou reciclagem de produtos. Um dos artigos que abordou pirólise foi o estudo de Ktori; Kamaterou; Zabaniotou (2018), em que a pirólise do pó de café foi realizada em um reator do tipo amostra cativa de malha de arame em escala de laboratório, com cenários pré-montados e controlados. Essa observação é relevante, pois, na agricultura, em geral, não se têm esses cenários controlados, afinal eventos climáticos e ambientais não são controlados.

Outro ponto, foram os estudos sobre viabilidades econômicas (9%) que abordaram principalmente questões sobre reciclagem dos resíduos, por meio de

biogás, ou compostagens. Embora a reciclagem seja muitas vezes considerada como um fator que conduz automaticamente a um benefício ambiental, o benefício real depende do impacto da matéria-prima, do processo de reciclagem e da retenção de valor (RV) após o processo. Os indicadores de desempenho existentes de uma economia circular falham em capturar a dimensão da sustentabilidade de vários processos de RV (STUCKI et al., 2021).

Os autores como Bekchanov; Mirzabaev (2018) utilizaram, em seus estudos, a modelagem, por meio da viabilidade, para calcularem a recuperação de nutrientes, desenvolvendo um modelo de otimização econômica para analisarem e compararem os custos de despejo a céu aberto e produção de composto, a partir de resíduos orgânicos com sua subsequente comercialização interprovincial, no Sri Lanka. Já no caso dos autores Donia; Mineo; Sgroi, (2018), estes analisaram um projeto de viabilidade para a realização de uma usina de biogás em uma empresa do setor vitivinícola, localizada no centro-sul da Sicília.

Em ambos os casos os resultados foram positivos do ponto de vista econômico e até mesmo ambiental, vide Tabela 4, desde que levados, em consideração, pontos importantes como: planejamento no sistema de gestão, maior consciência pública sobre a poluição ambiental, derivada de resíduos e melhores condições de trabalho, bem como de segurança no setor. A implementação bem-sucedida de projetos de compostagem, em larga escala, exigirá melhor contabilidade e planejamento de resíduos, embora esses estudos demonstrem que as instalações de compostagem, para reciclarem resíduos orgânicos, diminuirão os custos totais de gerenciamento de resíduos, além de fertilizantes.

Tabela 4 - Listagem dos artigos revisados com as informações sobre objetivo, metodologia e resultados apresentados

Autores	Título	Revista	Objetivo	Metodologia	Resultado
(WERNICK; AUSUBEL, 1995)	National material metrics for industrial ecology	Resources Policy	Iniciar uma estrutura para avaliar o uso nacional de materiais que ajudam a prevenir a poluição, reduzir o desperdício e encorajar o uso eficiente de recursos.	Propõem oito classes gerais de métricas para indicarem o status atual da época e as tendências salientes no uso de materiais nacionais, que influenciam o desempenho ambiental.	Os fluxos de materiais futuros, incluindo produtos e subprodutos, podem até exceder os contemporâneos em tamanho. Para torná-los ambientalmente compatíveis, precisamos de melhores métodos para se analisar sua condição atual e se anteciparem mudanças futuras. Para atingir o objetivo de uma economia mais circular, a sociedade precisa considerar seu legado de materiais como um dote para as gerações futuras, rico em minério valioso. Capitalizando nas 'minas acima do solo' ou pilhas de sucata materiais, resíduos da extração.
(AN; LI, 2009)	Synthetic Evaluation on the Development of Agricultural Circular Economy Based on the Principal Component Analysis: A Case of Tailai County in Heilongjiang Province	International Conference on Management Science & Engineering	Realizar uma avaliação abrangente de qualidade para o nível de desenvolvimento da economia circular agrícola no condado de Tailai, na província de Heilongjiang, de 1990 a 2007.	SPSS - (Produto estatístico e solução de serviços).	A redução de recursos, insumos e reciclagem de recursos são os principais fatores de obstáculo que restringem o desenvolvimento da economia circular agrícola no condado de Tailai, na província de Heilongjiang, e as recomendações e políticas são apresentadas para desenvolverem a economia circular agrícola, nesta base.
(ZHAI; SHANGJIE, 2010a)	Integrated Evaluation PPC Model of Agricultural Circular Economy in the Perspective of Ecological Restoration	Advanced Materials Research	Avaliar os fatores que afirmam a economia circular agrícola em 31 províncias (por meio do modelo PPC).	Modelo PPC.	O modelo se provou prático e pode avaliar melhor o desenvolvimento da economia agrícola circular da China, de forma objetiva, de modo que pode ser aplicado a muitas avaliações abrangentes, em outros campos. Podendo fornecer estratégia diferenciada da economia circular agrícola, com base teórica e fornecer a avaliação integrada da economia circular agrícola, com novo método, e de valor prático.
(XI, 2011)	Models of Circular Economy on Agriculture in Yunnan Province	Energy Procedia	Analisar a capacidade abrangente da agricultura e a poluição ambiental	Modelagem sobre economia circular na agricultura: reciclagem em família, reciclagem em aldeias e	Ainda faltam alguns padrões que sejam adequados para o ciclo econômico regional, em todas as áreas, sendo necessário pesquisar como estabelecer e melhorar o mecanismo de simbiose industrial e a

			agrícola na província de Yunnan.	parques ecológicos. agrícolas	integração ecológica regional, bem como realizar o equilíbrio entre o crescimento econômico e a proteção ecológica, como um todo, de acordo com os princípios de otimização do layout regional.
(ZABANIOTOU et al., 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 Development journal	Estudar um sistema de pirólise-biochar aplicado a uma oliveira em simbiose industrial com um lagar de duas fases.	Analizador elementar Thermofinnigan, CHNS, EA 1112 foi usado para a análise, enquanto a análise aproximada foi realizada por um analisador termogravimétrico Perkin Elmer.	A valorização de 70,0 t de resíduos sólidos e semissólidos provenientes tanto do olival de 10ha quanto do processo de moagem pode ser convertida via pirólise em 13, 11, 12 t de combustível líquido, biochar e gás combustível, respectivamente. Uma análise SWOT mostra que a pirólise de agro resíduos, visando ao biochar, pode cumprir o objetivo de fechar o ciclo na agricultura e nos objetivos da economia circular.
(NOYA et al., 2017)	Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia – A strategy to work towards Circular Economy	Science of the Total Environment journal	Avaliar até que ponto a implementação da abordagem emergente de EC poderia ser ambientalmente favorável para o setor de carne suína da Catalunha.	Metodologia ACV, com software SimaPro v8.2	Os resultados da análise mostraram que as atividades de produção e transporte de forragem foram identificadas como as etapas críticas do sistema. Os resultados comparativos destacaram as vantagens de avançar para um sistema de fechamento de ciclo de produção, em que a eficiência dos recursos e a valorização dos resíduos foram priorizadas sobre as opções de disposição final. Os cenários alternativos, baseados na perspectiva de EC, foram propostos para explorar os benefícios potenciais desta nova abordagem em relação ao caso base, evidenciando as vantagens ambientais de se moverem para sistemas produtivos de ciclo fechado, em relação à situação de base (sistema linear tradicional).
(BEKCHANOV; MIRZABAEV, 2018)	Circular economy of composting in Sri Lanka: Opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health	Journal of Cleaner Production	Desenvolver um modelo de otimização econômica para avaliar o impacto e a viabilidade financeira da produção e comercialização de composto, no Sri Lanka.	Modelagem da recuperação de nutrientes. Desenvolvimento de um modelo de otimização econômica para analisar e comparar os custos de despejo a céu aberto (cenário business-as-usual) e produção de composto, a partir de resíduos orgânicos,	O estabelecimento de instalações de compostagem para reciclar resíduos orgânicos no Sri Lanka diminuirá os custos totais de gerenciamento de resíduos e uso de fertilizantes químicos em US \$ 191 milhões. Facilitará o comércio interprovincial de composto e irá expandir ainda mais o potencial de compostagem no país, reduzindo a gestão de resíduos e os custos de uso de fertilizantes químicos em US \$ 357 milhões. A implementação bem-sucedida de projetos de compostagem em larga escala exigirá melhor

				com sua subsequente comercialização interprovincial no Siri Lanka.	contabilidade e planejamento no sistema de gestão de resíduos, maior consciência pública sobre a poluição ambiental, derivada de resíduos e melhores condições de trabalho e segurança no setor. O aumento do uso de composto na produção agrícola depende de mecanismos para monitorar e certificar a qualidade do composto.
(DONIA; MINEO; SGROI, 2018)	A methodological approach for assessing business investments in renewable resources from a circular economy perspective	Land Use Policy	Analisar um projeto de viabilidade para a realização de uma usina de biogás em uma empresa do setor vitivinícola localizada no centro-sul da Sicília.	Construção de uma usina, que é alimentada com biogás (resíduos da vinícola). Ela seria movida a subprodutos de origem biológica. Para avaliar a viabilidade econômica da planta, uma análise de custo-benefício da planta foi realizada.	Os resultados do investimento mostram como a eficiência da planta pode ter um impacto significativo na lucratividade do vinhedo. Com foco no aspecto econômico, vimos como o investimento traria fluxos de caixa, consistentes para a empresa. A partir do 7º ano recuperaria todo valor investido; haveria a primeira margem de lucro quando os custos financeiros incorridos para a construção da usina diminuíssem.
(KTORI; KAMATEROU; ZABANIOTOU, 2018)	Spent coffee grounds valorization through pyrolysis for energy and materials production in the concept of circular economy	Materials Today: Proceedings	Investigar a recuperação de material útil e energia, a partir de resíduos da pirólise da borra de café.	Pirólise do pó de café gasto foi realizada em um reator do tipo amostra cativa de malha de arame em escala de laboratório.	Os resultados mostraram que um rendimento máximo de bio-óleo pode ser alcançado a 540 ° C (36% em peso), em que o gás atingiu um rendimento de 9% em peso e o carvão vegetal atingiu 29% em peso. A 700 ° C, temperatura em que as reações de oxidação ocorrem, principalmente contra o craqueamento (gaseificação), o rendimento do gás atingiu 29% em peso, enquanto o bio-óleo e o carvão vegetal atingiram 20% em peso e 26% em peso, respectivamente. Esses dados preliminares podem desafiar a tomada de decisão na introdução de estratégias sustentáveis de gestão de resíduos alimentares, em que a pirólise pode ser o caminho de conversão.
(CASAREJOS et al., 2018)	Rethinking packaging production and consumption vis-à-vis circular economy: A case study of compostable	Journal of Cleaner Production	Examinar a produção e o consumo de embalagens vis-à-vis como modelo de economia circular.	Análise de inventário do ciclo de vida da embalagem do produto foi modelado, de acordo com a perspectiva da circularidade e do pensamento de design do berço ao berço.	A embalagem compostável de amido de mandioca tem resultados sociais e ambientais muito melhores do que a embalagem à base de petróleo.

	cassava starch-based material				
(XUE et al., 2019)	Environmental and economic benefits of carbon emission reduction in animal husbandry via the circular economy: Case study of pig farming in Liaoning, China	Journal of Cleaner Production	Comparar as pegadas de carbono de dois cenários - o modelo linear tradicional e um modelo circular, usando biogás como núcleo para analisar o impacto das reduções de emissão de carbono, como núcleo para identificar o elo chave neste ciclo, em termos de redução de carbono.	Utilização de microdados, na metodologia ACV, emissão de carbono e os benefícios econômicos internos com base no comércio de carbono realizado pelo modelo circular.	O modelo econômico circular pode efetivamente reduzir o potencial de aquecimento global da suinocultura em grande escala, 3.091.891,8 toneladas equivalentes de dióxido de carbono, desviando excrementos suínos acumulados para a geração de biogás. No comércio de carbono, a redução das emissões de carbono no modelo circular poderia gerar um benefício econômico de US \$ 30,92 milhões. Portanto, as reduções de emissão de carbono deste modelo podem trazer grandes benefícios ambientais e econômicos.
(CHEN et al., 2019)	The socio-economic impacts of introducing circular economy into Mediterranean rice production	Journal of Cleaner Production	Avaliar, no contexto da aplicação da avaliação do ciclo de vida à bioeconomia circular, uma nova tecnologia de biofertilizante que utiliza resíduos de arroz irrigado (farelo e casca) por meio da compostagem.	Um modelo híbrido de avaliação do ciclo de vida foi desenvolvido para estimar o impacto socioeconômico. O modelo híbrido ACV e ACV-S foi criado no MATLAB.	O sistema circular tem o potencial de aumentar o valor agregado bruto e o emprego na produção de arroz convencional, mas o sistema circular de arroz não poderia melhorar os impactos econômicos e sociais, ao mesmo tempo. O sistema circular não necessariamente alcançou impactos socioeconômicos mais positivos do que o sistema linear convencional, considerando a circularidade e o uso eficiente de recursos, a tecnologia de biofertilizante não deve ser descartada. Para obter um melhor desempenho socioeconômico da cadeia de abastecimento circular do arroz, novos desenvolvimentos são necessários, como o desenvolvimento de tecnologia para reduzir o custo de produção da unidade e o desenvolvimento de infraestrutura para apoiar a produção de biofertilizante.
(OZCARIZ-FERMOSELLE et al., 2019)	Promoting Circular Economy Through Sustainable Agriculture in Hidalgo: Recycling of Agro-Industrial	Climate Change Management	Avaliar o potencial de aproveitamento de resíduos do agronegócio como substrato para o cultivo de Pleurotus.	Foram testados os pressupostos de independência, normalidade e homocedasticidade, ANOVA e teste t de Student.	Os resíduos estudados podem ser considerados como alternativas sustentáveis para serem utilizados como aditivos de meio de crescimento para Pleurotus spp produção, visto que este gênero de cogumelo de alto valor nutricional tem alta adaptabilidade para crescer em materiais lignocelulósicos. A utilização de resíduos

	Waste for Production of High Nutritional Native Mushrooms				lignocelulósicos, neste tipo de produção de micélio, portanto, pode evitar as emissões de GEE que serão produzidos pela incineração desse tipo de resíduo. Além disso, a retirada de resíduos do ambiente natural permite que outras espécies de plantas cresçam, aumentando a fixação de CO ₂ e aumentando a biodiversidade dos microrganismos.
(YAZDANI; GONZALEZ; CHATTERJEE, 2019)	A multi-criteria decision-making framework for agriculture supply chain risk management under a circular economy context	Management Decision	Identificar as causas do risco de inundação e seus efeitos na sustentabilidade de uma cadeia de abastecimento agrícola, em conexão com uma estratégia de economia circular.	Análise de Razão de Avaliação de Peso Passo a Passo combinado com uma análise de decisão multicritério, posteriormente, uma Avaliação de Dados, baseada no método Assessment médio.	A análise de sensibilidade indicou que o modelo desenvolvido apresenta resultados bastante promissores e bastante robustez. A metodologia multicritério proposta substancia uma aplicação bem-sucedida, para classificar diferentes zonas de cultivo agrícola, que pretendem mitigar os riscos de inundação e seus impactos nas zonas / áreas de cultivo e na cadeia de abastecimento agrícola relacionada. Organizações e empresas no negócio agrícola podem usar esta metodologia para identificarem os fatores de risco e zonas adequadas para racionalizar os maiores impactos dos riscos de inundação, em uma perspectiva de economia circular.
(ALOBWEDE; LEAKE; PANDHAL, 2019)	Circular economy fertilization: Testing micro and macro algal species as soil improvers and nutrient sources for crop production in greenhouse and field conditions	Geoderma	Investigar o uso de tipos quimicamente contrastantes (diferença na composição elementar) da biomassa de espécies de algas na estabilidade de agregados do solo, nutrientes e, finalmente, no crescimento e produtividade das culturas.	Experimentos de bioensaio em estufa e de campo. As análises estatísticas foram realizadas com o software RStudio versão 3.1.0 e Graphpad Prism. Teste de Anderson-Darling também foi usado. O impacto dos tratamentos foi testado, usando ANOVA de uma via e análise post-hoc de Tukey.	As algas tiveram um impacto significativo nos solos agrícolas, por meio da adição de nutrientes ao solo. Os experimentos destacam a importância da composição química das algas no fornecimento de nutrientes disponíveis para as plantas, fornecendo informações sobre a seleção de espécies apropriadas para estratégias de manejo de nutrientes do solo arável. Os resultados, em geral, mostram os benefícios e o potencial do uso de algas como fertilizante orgânico sustentável com o objetivo de aumentar o teor de N total do solo e, em particular, melhorar as taxas de mineralização de N no solo.
(MOSQUERA-LOSADA et al., 2019)	Circular economy: Using lime stabilized bio-waste based fertilisers to improve soil fertility	Catena	Avaliar o efeito de diferentes doses de dois fertilizantes à base de biorresíduos sobre as propriedades químicas do solo, produção da pastagem e sua	Experimento que seguiu uma distribuição normal e foram analisados com medidas repetidas de análise de variância (ANOVA) (procedimento PROC GLM), e o critério de	As altas doses de fertilizantes à base de biorresíduos melhoraram a fertilidade do solo e, portanto, aumentaram a produção da pastagem e modificaram sua composição botânica que era mais sensível à variação da fertilidade do solo do que a produção. Esses resultados indicam que a composição botânica pode ser considerada um bom bioindicador de

	in acidic grasslands		composição botânica em comparação com o controle convencional de tratamentos (sem fertilização e fertilização mineral) combinados com calcário e sem calcário em pastagens estabelecidas em solos ácidos galegos.	Mauchly para testar a esfericidade.	mudanças na fertilidade do solo quando os fertilizantes à base de biorresíduos são usados na agricultura. Além disso, os resultados de solo e pasto associados às correções de biorresíduos foram semelhantes aos resultados obtidos nas práticas convencionais da área. Portanto, a substituição parcial ou total de fertilizantes minerais por fertilizantes à base de biorresíduos pode ser uma alternativa viável para a adoção do conceito de economia circular, nas fazendas.
(LORD; SAKRABANI, 2019)	Ten-year legacy of organic carbon in non-agricultural (brownfield) soils restored using green waste compost exceeds 4 per mille per annum: Benefits and trade-offs of a circular economy approach.	Science of the Total Environment	Testar a hipótese de que a adição de composto de lixo verde a locais "brownfield" durante a restauração ou para estabelecer plantações de energia poderia trazer benefícios a longo prazo, incluindo aumentos de Carbono orgânico do solo (COS) de 4 por mil.	Os ensaios foram rodados em NE-SW. A análise estatística foi realizada, usando IBM SPSS Statistics versão 25, incluindo uma análise de variância multivariada unilateral (MANOVA).	Os resultados mostram aumentos diferenciais estatisticamente significativos no carbono orgânico do solo (SOC), as taxas de composto de 500 ou 750 t · ha ⁻¹ , os incrementos SOC nos 10-15 cm superiores foram de 0,85% ou 1,6% sobre os 4,9% desenvolvidos, a partir de uma linha de base de 1,8% em áreas de controle, por uma década de regeneração natural. Essa longevidade da adição de COS, anteriormente não reconhecida em solos brownfields, pode ser inferida para outras áreas em que o cultivo adicional é impedido, como é típico após a restauração da paisagem ou sob culturas energéticas perenes para a produção de biomassa. Esse resultado sem precedentes tem implicações mais amplas para o uso marginal da terra para bioenergia e para a gestão COS, usando resíduos orgânicos antropogênicos para mitigarem as emissões de GEE.
(ASTOLFI et al., 2019)	Cellulolytic enzyme production from agricultural residues for biofuel purpose on circular economy approach.	BIOPROCESS AND BIOSYSTEMS ENGINEERING	Avaliar a produção de enzimas celulolíticas, a partir de diferentes resíduos agrícolas.	Projeto rotacional composto central (CCRD). A análise estatística foi feita por meio do software on-line Protimiza Experimental Design (http://experiment.al-designprotimiza.com.br/). Realizaram a análise de variância (ANOVA), de efeitos e teste de comparação de médias (Tukey).	Todas as atividades enzimáticas foram altamente estáveis a 40 ° C, em uma faixa de pH de 4,5–5,5. Dentre os substratos lignocelulolíticos, a casca de soja foi a mais efetiva na produção de xilanase e FPase. A maior produção de CMCase foi observada, usando uma cultura mista de casca de soja e erva-mate de palito em pó.

<p>(SÁNCHEZ-SÁNCHEZ et al., 2020)</p>	<p>Two-phase Olive mill waste: A circular economy solution to an imminent problem in Southern Europe.</p>	<p>Journal of Cleaner Production</p>	<p>Implementar uma tecnologia limpa e renovável que permita extrair valor lucrativo de um resíduo altamente contaminante, o Resíduo de Azeite de Duas Fases</p>	<p>Testes laboratoriais (i) diluição, mistura formada por 30% de TPOMW e 70% de água; (ii) um pré-tratamento de aeração de 5 dias (iii) monitoramento do pH e ajuste para 7 pela adição de uma solução de hidróxido de cálcio a 10%, após essas ações.</p>	<p>O estudo de viabilidade econômica mostrou que não é rentável economicamente porque a tecnologia é emergente e é necessária para melhorar o desempenho do processo e reduzir os custos de instalação, operação e manutenção. A análise econômica mostrou que a construção da planta de AD não seria economicamente viável, uma vez que o período de retorno (PRI) é muito alto e a TIR é muito baixa. Para atingir a viabilidade econômica, é necessário melhorar o desempenho do processo e reduzir os custos de instalação, operação e manutenção. O projeto apresentado, no entanto, é ambientalmente viável, uma vez que as emissões de dióxido de carbono, que seriam lançadas na atmosfera, se o TPOMW se decompuser, naturalmente, serão reduzidas por um fator de 7 vezes.</p>
<p>(WEBER; TRIERWEILER; TRIERWEILER, 2020)</p>	<p>Food waste biorefinery advocating circular economy: Bioethanol and distilled beverage from sweet potato.</p>	<p>Journal of Cleaner Production</p>	<p>Avaliar a viabilidade técnica e econômica de uma biorrefinaria de resíduos de batata-doce para a produção de bioetanol e bebida destilada, com base nos resultados experimentais.</p>	<p>Utilização de leveduras, para construção dos fermentados. As análises de investimento foram: o payback descontado, o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR).</p>	<p>Cinco cenários diferentes, variando a porcentagem de produção de cada produto foram avaliados, quanto maior a produção da bebida destilada, mais lucrativos os cenários são. Os resultados econômicos começam a ser positivos quando a produção para comercialização de cada produto chega a 40%, mais 20% de etanol para consumo interno. O cenário com 80% da produção de bebidas apresentou VPL de US \$ 1.078.500,18, TIR de 51% e payback descontado de 1,06 anos. A biorrefinaria de resíduos de batata-doce é um modelo sustentável e contribui para o desenvolvimento do setor agrícola e alimentar ao proporcionar novos negócios e consequente criação de empregos. Também leva à redução das emissões de GEE, ao produzir recursos renováveis e 2 produtos comercializáveis, atingindo, assim, os objetivos da economia circular.</p>

(FERRI et al., 2020)	From winery waste to bioactive compounds and new polymeric biocomposites: A contribution to the circular economy concept.	Journal of Advanced Research	Otimizar e validar possíveis caminhos para a valorização plena dos agrorresíduos da uva para a produção de moléculas bioativas e novos materiais.	Procedimentos de extração de polifenóis (SE e PLE). Ensaio espectrofotométrico e análises de HPLC-DAD. Os dados foram analisados por meio do teste ANOVA de uma via, seguido pelo teste t-student de duas caudas.	A utilização de resíduos de bagaço em biocompósitos poderá contribuir tanto para a redução do custo do material final, quanto menor a quantidade de caro PHBV é utilizada, bem como para a plena valorização dos principais agrossistemas da uva. Em conclusão, o bagaço Merlot pode ser valorizado tanto como extrato fenólico quanto como resíduo fibroso e explorado na área de alimentos, nutracêuticos, cosméticos e embalagens / materiais.
(MENG et al., 2020)	Fuzzy Min-Max Neural Network With Fuzzy Lattice Inclusion Measure for Agricultural Circular Economy Region Division in Heilongjiang Province in China.	IEEE ACCESS	Projetar diferentes modos de economia circular, de acordo com as características locais de várias regiões, para poder ser mais eficiente.	Utilização da medida de inclusão de lattice fuzzy, por meio dos índices de dosagem de recursos, índices de desenvolvimento econômico e social, índice de área, índice de população e trabalho.	Os resultados da divisão regional têm um papel orientador para o desenvolvimento sustentável na província de Heilongjiang. São propostas de políticas detalhadas que fornecem ideias para o governo local. As políticas regionais são muito necessárias para o desenvolvimento eficiente da economia circular agrícola. As políticas regionais podem aproveitar plenamente as vantagens de cada região, que pode aproveitar ao máximo os recursos locais. Se aplicar uma política uniforme em diferentes regiões, não apenas não se obterá nenhum lucro, mas também se destruirá o meio ambiente natural local e causará grandes prejuízos. Apoiar a inovação de tecnologias avançadas e a generalização dessas tecnologias também devem ser levadas em consideração.
(MARTINEZ URREAGA et al., 2020)	Tube shelters from agricultural plastic waste: An example of circular economy	Journal of Cleaner Production	Investigar a viabilidade do uso de plásticos agrícolas reciclados na fabricação de abrigos tubulares para mudas de plantas, que podem ser utilizados na restauração florestal e em outros plantios.	Análise termogravimétrica. Os espectros FTIR-ATR foram corrigidos, usando o software fornecido com o espectrofotômetro. Os testes de tração foram realizados em uma máquina de teste Metrotec Hounsfield H10KT.	O uso de plásticos reciclados não alterou a estabilidade das misturas, mas houve diminuições no alongamento na ruptura e na transmissão da luz UV e azul, com pequenas diminuições na transmissão da luz vermelha e sem mudanças significativas na proporção do vermelho-vermelho. Os resultados indicam que quantidades significativas de plásticos agrícolas, reciclados, podem ser utilizadas na fabricação de abrigos tubulares, com vantagens econômicas e ambientais. A adição de plástico reciclado não reduz significativamente a resistência à ruptura do polietileno, mas o alongamento à ruptura é reduzido em até 30%, devido à presença de impurezas.

<p>(MATRAPAZI; ZABANIOTOU, 2020)</p>	<p>Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution</p>	<p>Science of the Total Environment</p>	<p>Trazer insights e dados de pirólise lenta, em larga escala de borra de café, usada para aproveitar novas oportunidades de soluções ecoinovadoras na economia circular, por meio da identificação de oportunidades de upcycling para recuperação de recursos desses resíduos.</p>	<p>O estudo limitou-se à pirólise de SCG, submetido à extração e avaliou o benefício econômico da pirólise apenas de SCG.</p>	<p>Os indicadores econômicos ROI e POT (ROI = 0,24 anos, POT = 2,6 anos) são muito positivos, sugerindo a pirólise dos grãos de café sólidos (SCG), como uma solução eficiente de gestão da economia circular, proporcionando um negócio de inovação ecossocial, no setor de cafeterias, envolvendo também os consumidores na economia circular. O estudo mostrou que o SCG, resíduo da extração do café, contém nutrientes que, via pirólise, irão para o produto sólido, o carvão, para ser usado como biochar, permitindo o crescimento da planta. O estudo forneceu também uma solução de inovação social, pois fornece um caminho e um piloto em um processo participativo, com o objetivo de promover a transição da sustentabilidade, bem como interligar as questões ambientais e humanas. A pirólise do forno rotativo é uma opção de economia circular, que pode ser utilizada para a gestão do valor agregado SCG, com benefícios ecossocioeconômicos.</p>
<p>(ÅKERMAN; HUMALISTO; PITZEN, 2020)</p>	<p>Material politics in the circular economy: The complicated journey from manure surplus to resource</p>	<p>Geoforum</p>	<p>Investigar a política material da EC por meio de um estudo de caso aprofundado de como uma empresa de biogás, pioneira na Finlândia, lutou para desfazer um excedente regional de estrume, transformando-o em um recurso, na produção de energia e fertilizantes.</p>	<p>Estudo de caso etnográfico. A análise dos dados iniciou-se com uma análise qualitativa de conteúdo das entrevistas.</p>	<p>A Biovakka não só teve problemas para desfazer o excedente de adubo regional, mas, paradoxalmente acabou agravando-o, pois, a produção de biogás e fertilizantes, economicamente viável e competitiva exigia a importação de biomassa rica, em nutrientes para a área.</p>

(COLLEY et al., 2020)	Using a gate-to-gate LCA to apply circular economy principles to a food processing SME	Journal of Cleaner Production	Avaliar quais são as oportunidades de economia circular para pequenas e médias empresas (PME), no setor de processamento de carne, para reduzir seus impactos ambientais.	O uso de avaliações de risco e custo (@risk) no estágio de inventário do ciclo de vida para a ACV porta a porta.	Os dados de inventário e os resultados de ACV para este PME foram significativamente diferentes dos ACVs anteriores. O local consumiu um volume significativamente menor de água, em comparação com os dados de benchmarking da indústria australiana. A diferença entre os números da indústria australiana e da indústria internacional nas Declarações Ambientais de Produto (EPDs) (eef) da COOP pode refletir a importância dada à redução do consumo de água, na Austrália, devido a questões de escassez.
(BORTOLINI et al., 2020)	Hermetia illucens (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy	Journal of Cleaner Production	Identificar as condições operacionais para o manejo sustentável e valorização de dejetos animais, em escala pré-industrial.	Análises químicas dos dejetos foram realizadas com espectrômetro dispersivo de fluorescência de raios X Philips PW 1480 (XRF). Análise de dados agrônômicos O software GenStat 17.0th edition foi usado para realizar uma ANOVA unilateral nos dados agrônômicos. As médias dos fatores foram comparadas usando o teste de intervalo múltiplo de Duncan.	De modo geral, as larvas de H. illucens têm se mostrado uma ferramenta útil para favorecer um manejo mais sustentável do esterco de galinha, reduzindo fortemente sua quantidade e encerrando seu ciclo de recuperação, obtendo produtos de alto valor, para fins agrícolas. O ensaio agrônômico, realizado com o LF, obtido, a partir da mistura ótima mostrou propriedades melhoradoras do solo, na alface-bebê, demonstrando a possibilidade de utilização desse substrato, devidamente diluído, tanto na produção em vasos quanto na sem solo, na agricultura ou em viveiro.
(MANRIQUEZ-ALTAMIRANO et al., 2020)	Analysis of urban agriculture solid waste in the frame of circular economy: Case study of tomato crop in integrated rooftop greenhouse	Science of the Total Environment	Identificar que tipo de estufas de telhado integradas (i-RTG) de resíduo sólido (Sw) tem potencial para ser utilizado na perspectiva da economia circular (EC) e propor uma forma de gestão para sua valorização material.	O fluxo dos resíduos sólidos foi calculado com base na compilação de dados do inventário de materiais, juntamente com dados de cultivo, produção e quantificação de biomassa no final da safra (2015 e 2017). Toda biomassa foi colocada no solo para secagem natural por 2 meses em área coberta. Uma vez que os caules estão secos, eles são	Os resultados do estudo de caso mostram que, dos resíduos sólidos (SW), gerados nas estufas de telhado (RTG) integradas, a biomassa tem o maior potencial para ser utilizada, localmente, como ecomaterial, principalmente, o caule do tomate. Os resultados mostram que os tomatóides apresentam melhor rendimento como substrato, após um tratamento de pré-lavagem, uma vez que, a princípio, os valores de condutividade elétrica são muito elevados, em relação ao substrato de controle, que é a perlita expandida. Concluindo, pode-se dizer que é possível aumentar os benefícios ambientais do tipo de estufas de telhado integradas (i-RTG), aproveitando sua biomassa, localmente, ajudando a prever um possível problema

				medidos e pesados, para identificar a porcentagem de umidade perdida.	futuro, no gerenciamento da biomassa residual do i-RTG, dentro das cidades.
(SECCO et al., 2020)	Circular economy in the pig farming chain: Proposing a model for measurement	Journal of Cleaner Production	Propor um modelo de mensuração da economia circular, na cadeia da suinocultura.	Análise e seleção de indicadores GRI, tendo como referência o Modelo Pressão-Estado-Resposta (PSR). Formulação de um questionário. Aplicação de métodos estatísticos de normalidade Shapiro-Wilk, utilizando a ferramenta do software SPSS.	O estudo considerou apenas aspectos isolados para medir a economia circular, tais como indicadores, baseados no fluxo de materiais, no consumo de energia, relacionados ao uso e consumo do solo e avaliação do próprio ciclo de vida. A forma de gerenciamento de resíduos adotada pelos suinocultores pode contribuir de forma eficiente para a redução dos impactos ambientais. Na economia circular, os resíduos e efluentes são tratados por meio de tecnologia de proteção ambiental avançada, que pode não só reduzir a poluição, na cadeia da suinocultura, mas também realizar o reaproveitamento de recursos, proporcionando assim um importante meio para o desenvolvimento sustentável.
(DUQUE-ACEVEDO et al., 2020)	The Management of Agricultural Waste Biomass in the Framework of Circular Economy and Bioeconomy: An Opportunity for Greenhouse Agriculture in Southeast Spain	Agronomy	Caracterizar plantações hortícolas protegidas na província e estimar a produção de biomassa residual de estufas.	Análises estatísticas e representação gráfica de dados (Excel, ArGics 10.3.1), por meio de mapas. Dados obtidos em entrevistas presenciais e telefônicas com funcionários do MALFSD (DAPL e EPS), AEA, ETH e PWMC. Páginas da Web de autoridades públicas oficiais (FAO, ONU, UE, MAFF).	Os resíduos de biomassa, gerados, apresentavam forte potencial de aproveitamento. Os resultados da avaliação econômica demonstraram que a alternativa de autogestão de resíduos de biomassa é rentável, especificamente na cultura do tomate. A produção de composto e fertilizantes verdes também provou ser uma estratégia chave na transição para um modelo de produção agrícola mais circular e sustentável. Relativamente a esta transição, o apoio governamental é fundamental para a realização de campanhas de sensibilização e de formação, e também de financiamento de Investigação e Desenvolvimento (I&D).
(VAN KEULEN; KIRCHHERR, 2021)	The Implementation of the Circular Economy: Barriers and Enablers in the Coffee Value Chain	Journal of Cleaner Production	Identificar barreiras e facilitadores que dificultam a implementação de iniciativas de EC, em uma cadeia de valor de produtos ativa à do setor cafeeiro.	Experimentação do Modelo de Negócios por meio da ACV.	Os experimentos observados mostraram que a causa raiz de uma certa barreira e, ao mesmo tempo facilitadora, pode variar de cultural (hábito de copos descartáveis), a falta de conhecimento (borra de café é um bom fertilizante), a amplitude social (um relojoeiro quase nunca fala com um torrador de café) e mais além. Isso pode levar a uma reação em cadeia, mas se observou que a empresa pode mudar o curso disso.

					A influência da visita dos pesquisadores aos locais de implementação, em todas as partes da cadeia de valor, aumenta moderadamente o sucesso da implementação de um EC.
(MAHROOF et al., 2021)	Drone as a Service (DaaS) in promoting Cleaner Agricultural Production and Circular Economy for Ethical Sustainable Supply Chain Development	Journal of Cleaner Production	Explorar os principais desafios associados às cadeias de abastecimento agrícola.	Por meio da metodologia ISM, foram gerados modelos. Criação de uma matriz de autointeração estrutural (SSIM). A matriz de alcançabilidade inicial (IRM) é desenvolvida usando o SSIM. O IRM é então traduzido na matriz de alcançabilidade final (FRM) testando a transitividade no IRM. Construção do processo ISM como um modelo.	O modelo hierárquico ISM elucida proposições de pesquisa e um modelo parcimonioso para pesquisas futuras. Com base na estrutura ReSOLVE, a aplicação de drones oferece muitas oportunidades para superar os desafios agrícolas, oferecendo soluções sustentáveis e promovendo práticas agrícolas mais éticas, abordando as questões de "estrutura agrícola", "segurança alimentar" e "impacto ambiental". Com base no princípio de mudança para recursos renováveis, facilitados pelos ciclos biológicos, "regenerar" insiste na conservação e reabilitação do sistema agrícola, fortalecendo a vitalidade do solo agrícola e a regeneração do solo superficial. Isso é possível por meio do uso da tecnologia I4.0, disponível em drones, como sensor, para automatizar sistemas de irrigação, baseados em clima, em tempo real.
(CARELLA et al., 2021)	Thermal conversion of fish bones into fertilizers and biostimulants for plant growth – A low tech valorization process for the development of circular economy in least developed countries	Journal of Environmental Chemical Engineering	Exploramos o potencial de uma abordagem de economia circular de baixa tecnologia para os problemas de baixa capacidade adaptativa e escassez de fósforo, nos países menos desenvolvidos (LDCs), que poderiam ser implementados, no nível da comunidade.	Os ossos da filetagem são separados manualmente. A morfologia das amostras foi analisada por microscopia eletrônica de varredura, com um microscópio de emissão de campo (FEG-SEM, mod. SIGMA, ZEISS NTS GmbH, Oberkochen, Alemanha). A Análise Gravimétrica Térmica (TGA) foi realizada, usando o aparelho STA 449 Júpiter (Netzsch GmbH, Selb, Alemanha).	É possível converter espinha de peixe - um subproduto, frequentemente negligenciado, por processos de valorização - em materiais com valor potencial, no mercado agrícola, por um processo térmico simples e facilmente escalável que poderia ser aplicado no nível da comunidade nos PMDs. Os autores apontaram que a aplicação em larga escala deste processo pode gerar uma série de efeitos positivos, nesses países, como: (i) fortalecerá os sistemas locais de produção de alimentos e promoverá o desenvolvimento de uma economia circular de fósforo, (ii) diminuirá a dependência da agricultura dos PMDs da importação de fosfato e (iii) aumentará a capacidade de adaptação das comunidades locais dos PMDs, aumentando sua renda econômica.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 5 - Definições das principais metodologias utilizadas pelos autores na revisão

Autores	Metodologia proposta	
(WERNICK; AUSUBEL, 1995)	Oito métricas para indicar o desempenho ambiental, sendo elas: (1) Total per capita inputs, (2) Input consumption, (3) Input intensities, (4) Recycling índices, (5) Output intensities, (6) Leak índices, (7) Environment trade index, (8) Mining efficiency	(1) Benchmarking national resource use; (2) CO 2 emissions, cleanliness of the energy system Petrochemical pollution, character of solid waste Gross shifts in material use, materials efficiency and cyclicity, mining and processing waste, energy use Land use, methane emissions, nitrogen fixation rates; (3) Relationship of resource use to economic activity Materials efficiency, eutrophication of water bodies, topsoil erosion, chemical dissipation Relationship of carbon emissions to economic activity; (4) Materials efficiency and cyclicity, mining and processing waste, energy use Materials efficiency and cyclicity, Global carbon balance of sources and sinks, land use, ecosystem disruption; (5) Quantity of solid wastes/quantity of total solid physical outputs Generation quantity for selected material waste streams/GDP in constant dollars; (6) Quantity of materials dissipated into the environment/total material outputs Concentrations of pollutants in water bodies, and land deposition of nutrients and heavy metals/defined metals/defined área; (7) Net mass value of waste and emissions generated from foreign trade in manufactured products and raw resources; (8) Quantity of wastes generated/tonne of finished product Total byproduct recovery/total output.
(AN; LI, 2009)	Principal component analysis method with SPSS (Statistical Product and Service Solutions) software	To calculate the comprehensive development level of various of type target; SPSS it's used by various kinds of researchers for complex statistical data analysis. The SPSS software package was created for the management and statistical analysis of social science data.
(ZHAI; SHANGJIE, 2010a)	Projection Pursuit model	Classificação de busca de projeção baseada em algoritmo genético acelerado com código real aplicada à avaliação abrangente da economia agrícola circular. The PPC model for comprehensive evaluation of circular agricultural economy mentioned is to restore the ecosystem.

(XI, 2011)	(1) Recycle economy mode in family; (2) Recycle economy mode in villages Now; (3) Recycle economy mode in ecological agriculture parks.	(1) A família rural é objeto de implementação circular; o biogás nesse sistema é o principal produto; (2) double-chamber heap decomposed manure system (DCHDS), this mode harness rural environment with a village as a unit, organic fertilizers; (3) It realizes energy and materials recycle by using the link in the agricultural industry module relationship. In this mode, the main body may be a company, a few companies, or companies plus farmers.
(ZABANIOTOU et al., 2015)	Pyrolysis experimental procedure	O aparato experimental de pirólise inclui um reator aquecido por um circuito elétrico, uma serpentina de resfriamento de água, uma armadilha para umidade, dois filtros para coleta de alcatrão e hidrocarbonetos líquidos, um sistema para coleta de gás e um sistema para análises de gases (GC).
(NOYA et al., 2017)	ACV	Uma abordagem para analisar os aspectos ambientais de sistemas alimentares complexos, incluindo reciclagem e esquemas circulares. A ACV avalia o desempenho ambiental de um produto ou serviço identificando etapas críticas em uma cadeia de suprimentos em que as emissões devem ser reduzidas. Assim, por meio da ACV, as compensações viáveis entre as diversas categorias de impacto podem ser documentadas ao se analisarem diferentes soluções para sistemas mais amigáveis ao meio ambiente.

(BEKCHANOV; MIRZABAEV, 2018)	viabilidade econômica financeira	Desenvolvimento de um modelo de otimização econômica para avaliar o impacto e a viabilidade financeira da produção e comercialização de composto de resíduos orgânicos. O modelo dos autores considera a disponibilidade de resíduos orgânicos e as porções que vão para lixões, aterros sanitários ou usinas de compostagem. O modelo também rastreia os usos e a distribuição do composto produzido, dependendo da demanda de nutrientes das culturas. A análise não trata a produção de composto como um setor isolado, mas traça a relação combinada entre as aplicações de composto e fertilizantes químicos para a produção agrícola sustentável. O principal objetivo do modelo é minimizar os custos de gestão de resíduos orgânicos (despejo a céu aberto, coleta de resíduos e aterro sanitário), compostagem (produção de composto, transporte de composto e aplicação de composto) e fornecimento de fertilizantes químicos.
(DONIA; MINEO; SGROI, 2018)	Viabilidade econômica	Analisar um projeto de viabilidade para a realização de uma planta de biogás em uma empresa do setor de viticultura; através do uso de fórmulas de engenharia, identificamos a energia elétrica que a planta poderia produzir usando os resíduos vitícolas criados pela própria vinha. A viabilidade econômica do investimento é avaliada, considerando um esquema de investimento de autofinanciamento de capital completo.
(KTORI; KAMATEROU; ZABANIOTOU, 2018)	Pirólise	Por meio do pó de café gasto foi realizada em um reator do tipo amostra cativa de malha de arame em escala de laboratório.
(CASAREJOS et al., 2018)	ACV	Análise de inventário, do ciclo de vida da embalagem do produto através de modelagem, de acordo com a perspectiva da circularidade e do pensamento de design do berço ao berço.
(XUE et al., 2019)	ACV	Utilização de microdados, emissão de carbono e os benefícios econômicos internos com base no comércio de carbono, realizado pelo modelo circular.

(CHEN et al., 2019)	ACV	Um modelo híbrido de avaliação do ciclo de vida foi desenvolvido para estimar o impacto socioeconômico. Os modelos híbridos ACV e ACV-S foram criados no MATLAB.
(OZCARIZ-FERMOSELLE et al., 2019)	Testes laboratoriais com dez cepas nativas de Pleurotus	Avaliar o potencial de aproveitamento de resíduos agroindustriais como substrato para cultivo de Pleurotus spp., a fim de contribuir para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e, ao mesmo tempo, promover o desenvolvimento local. Foram testados os pressupostos de independência, normalidade e homocedasticidade, ANOVA e teste t de Student
(YAZDANI; GONZALEZ; CHATTERJEE, 2019)	Análise de Razão de Avaliação de Peso Passo a Passo	Combinado com uma análise de decisão multicritério, posteriormente uma avaliação de Dados, baseada no método Assessment médio.
(ALOBWEDE; LEAKE; PANDHAL, 2019)	Bioensaio em estufa e de campo, com a utilização de softwares estatísticos.	Utilização de softwares estatísticos, como, RStudio versão 3.1.0 e Graphpad Prism. Teste de Anderson-Darling também foi usado. O impacto dos tratamentos foi testado usando ANOVA de uma via e análise post-hoc de Tukey.
(MOSQUERA-LOSADA et al., 2019)	Experimento de fertilizantes à base de biorresíduos	As altas doses dos fertilizantes à base de biorresíduos melhoraram a fertilidade do solo e, portanto, aumentaram a produção da pastagem e modificaram sua composição botânica que foi mais sensível à variação da fertilidade do solo do que a produção.
(LORD; SAKRABANI, 2019)	Ensaio rodados em NE-SW.	A análise estatística foi realizada usando IBM SPSS Statistics versão 25, incluindo uma análise de variância multivariada unilateral (MANOVA)
(ASTOLFI et al., 2019)	Projeto rotacional composto central (CCRD).	A análise estatística foi feita por meio do software online Protimiza Experimental Design (http://experimental-design-protimiza.com.br/). Realizaram a análise de variância (ANOVA), de efeitos e teste de comparação de médias (Tukey).
(SÁNCHEZ-SÁNCHEZ et al., 2020)	Testes laboratoriais	(i) diluição, mistura formada por 30% de TPOMW e 70% de água; (ii) um pré-tratamento de aeração de 5 dias (iii) monitoramento do pH e ajuste para 7 pela adição de uma solução de hidróxido de cálcio a 10%, após essas ações.

(WEBER; TRIERWEILER; TRIERWEILER, 2020)	Viabilidade econômica	Utilização de leveduras, para construção de fermentados e dados para as análises de investimento, como o payback descontado, valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR).
(FERRI et al., 2020)	Ensaio espectrofotométrico e análises de HPLC-DAD.	Procedimentos de extração de polifenóis (SE e PLE). Os dados foram analisados por meio do teste ANOVA de uma via, seguido pelo teste t-student de duas caudas.
(MENG et al., 2020)	Lattice Fuzzy	Utilização da medida de inclusão de lattice fuzzy, por meio dos índices de dosagem de recursos, índices de desenvolvimento econômico e social, índice de área, índice de população e trabalho.
(MARTINEZ URREAGA et al., 2020)	Análise termogravimétrica.	Os espectros FTIR-ATR foram corrigidos, usando o software fornecido com o espectrofotômetro. Os testes de tração foram realizados em uma máquina de teste Metrotec Hounsfield H10KT.
(MATRAPAZI; ZABANIOTOU, 2020)	Benefício econômico da pirólise de SCG.	O estudo limitou-se à pirólise de SCG, submetido à extração e avaliou seu benefício econômico.
(ÅKERMAN; HUMALISTO; PITZEN, 2020)	Estudo de caso etnográfico.	Acompanhar a evolução das soluções de economia circular (tecnologias, modelos de negócios, políticas e padrões de influência) em que os atores se engajaram para reorganizarem as relações metabólicas de forma a permitir a qualificação do estercor em um recurso nutricional. Uma série de experimentos e ensaios, em que novas conexões foram criadas por novas tecnologias de economia circular e modelos de negócios que colidem com relações, normas e práticas naturalizadas que permitem soluções dentro da cadeia.
(COLLEY et al., 2020)	Análise de risco de um ACV	O uso de avaliações de risco e custo (@risk) no estágio de inventário do ciclo de vida para a ACV porta a porta.

(BORTOLINI et al., 2020)	Ensaio laboratoriais	Ensaio laboratorial permitiram definir as condições básicas de criação em termos de temperatura e componentes do substrato. Um modelo cúbico especial permitiu identificar a melhor mistura para o crescimento das larvas de <i>H. illucens</i> , que é eficiente bioconversora de resíduos orgânicos em proteínas e gorduras, com a vantagem de que o excremento larval supostamente possui propriedades semelhantes ao composto. As análises químicas dos dejetos foram realizadas com espectrômetro dispersivo de fluorescência de raios X Philips PW 1480 (XRF). Análise de dados agrônômicos, o software GenStat 17.0th edition foi usado para realizar uma ANOVA unilateral nos dados agrônômicos. As médias dos fatores foram comparadas, usando o teste de intervalo múltiplo de Duncan.
(MANRIQUEZ-ALTAMIRANO et al., 2020)	Quantificação do lixo orgânico na agricultura urbana.	O fluxo dos resíduos sólidos foi calculado com base na compilação de dados do inventário de materiais, juntamente com dados de cultivo, produção e quantificação de biomassa no final da safra (2015 e 2017). Toda biomassa foi colocada no solo para secagem natural por 2 meses, em área coberta. Uma vez que os caules estão secos, eles são medidos e pesados, para se identificar a porcentagem de umidade perdida.
(SECCO et al., 2020)	GRI	Análise e seleção de indicadores GRI (global reporting initiative), tendo como referência o Modelo Pressão-Estado-Resposta (PSR). Formulação de um questionário. Aplicação de métodos estatísticos de normalidade Shapiro-Wilk, utilizando a ferramenta do software SPSS. É um conjunto de indicadores com base na avaliação qualitativa e descrição quantitativa dos riscos e impactos relacionados às dimensões: econômica, social e ambiental. As diretrizes da GRI fornecem indicadores padronizados internacionalmente para medirem a redução de resíduos, por meio de diferentes métodos.

(DUQUE-ACEVEDO et al., 2020)	Entrevistas	As entrevistas ocorreram de forma presencial e telefônicas a alguns responsáveis de departamentos de entidades públicas regionais e locais, que forneceram informação essencial ao questionário semiestruturado. Análises estatísticas e representação gráfica de dados foram tabuladas no Excel, ArGics 10.3.1, por meio de mapas.
(VAN KEULEN; KIRCHHERR, 2021)	Business Model Experimentation	É uma abordagem deliberada para testar uma hipótese sobre uma abordagem de negócios em potencial e suas suposições. Embora seus impactos diretos de EC possam ser limitados, a experimentação do modelo de negócios pode ter uma série de vantagens para as empresas envolvidas na inovação do modelo de negócios circulares: as empresas podem obter uma melhor compreensão dos impactos gerais de um sistema; podendo identificar oportunidades de redução de emissões, além de poderem acompanhar o desempenho e estimular colaborações na cadeia de suprimentos.
(MAHROOF et al., 2021)	Interpretive structural modelling (ISM)	É um método metódico e cooperativo de análise de inter-relações entre variáveis com a criação de modelos, gerando uma matriz de autointeração estrutural (SSIM). A matriz de alcançabilidade inicial (IRM) é desenvolvida usando o SSIM. O IRM é então traduzido na matriz de alcançabilidade final (FRM), testando a transitividade no IRM. Construção como do processo ISM um modelo.
(CARELLA et al., 2021)	Ensaios em laboratório	Os ossos da filetagem são separados manualmente, onde foram analisadas amostras de morfologia por microscopia eletrônica de varredura, com um microscópio de emissão de campo (FEG-SEM, mod. SIGMA, ZEISS NTS GmbH, Oberkochen, Alemanha). Houve Análise Gravimétrica Térmica (TGA) que foi realizada, usando o aparelho STA 449 Júpiter (Netzsch GmbH, Selb, Alemanha).

Fonte: Elaborado pelos diferentes autores mencionados.

4. Discussões

Enquanto, os primeiros casos de sucessos da EC foram no sistema industrial de países desenvolvidos, a matéria prima é oriunda, em grande parte da agricultura, ao implementar um modelo de desenvolvimento de uma economia agro circular, cujos padrões de reprodução ecológica, utilização abrangente e o ecoturismo agrícola (XUAN; BAOTONG; HUA 2011) vêm ganhando cada vez mais destaque, evidenciando que a EC, na agricultura, enfrenta dificuldades que ainda precisam ser enfrentadas e solucionadas, por meio das metodologias de mensuração, sem se esquecer da base biológica da agricultura ecológica.

A economia agrícola, como ramo integral da economia global, cobrindo toda a cadeia de abastecimento da produção agrícola, incluindo cultivo, processamento, distribuição e consumo, é de grande importância para a realização de uma EC e do desenvolvimento ecológico (XIA; RUAN, 2020). A utilização de plásticos reciclados, em aplicações semelhantes às do plástico original, é de interesse dos objetivos da EC e, no caso da agricultura, é uma das principais aplicações, visto que cerca de 3,4% de todo plástico, produzido, vai para a agricultura europeia (MARTÍNEZ URREAGA et al., 2020). No caso do Brasil, segundo dados do Banco Mundial (2019), ele é apontado como o 4º maior produtor de lixo plástico, no mundo.

Embora a EC prediga uma alternativa ao modelo econômico de “fazer e descartar” de alto consumo de energia e produção de resíduos (VAN KEULEN; KIRCHHERR, 2021), esta revisão apresenta alguns exemplos de implementação da EC na agricultura, embora poucos se concentrem em cadeias de valor de produtos complexos, conforme Tabela 5. A EC tem, como um dos seus principais pontos, a valorização dos resíduos agroalimentares, ainda que as cadeias de abastecimento circulares sejam amplamente percebidas como um salto em direção a uma economia mais ecológica. O impacto ambiental nas cadeias circulares de abastecimento se difere, afinal não se trata apenas de se utilizarem resíduos, mas, sim de que esses possam ser utilizados, impactando positivamente a cadeia agroalimentar. O esgotamento crescente dos recursos naturais, finitos e dos problemas ambientais e sociais é vital para a sociedade

compreender os impulsionadores da demanda de recursos e buscar desenvolver estratégias para se reduzirem seus impactos negativos.

Fazer a transformação de subprodutos em recursos por meio de estudos empíricos é essencial; porém se faz necessário ter uma ferramenta capaz de mensurar essa abordagem, em virtude de haver métodos, diretrizes e ISOs escritos sobre como fazer estudos ambientais. A metodologia da avaliação do ciclo de vida (NOYA et al., 2017) (CHEN et al., 2019) (COLLEY et al., 2020) (VAN KEULEN; KIRCHHERR, 2021) tem obtido êxito em evidenciar resultados de sustentabilidade, porém, em alguns estudos, é possível denotar apenas possíveis mudanças em suas fases, em virtude de que a EC não se limita somente a apontamentos, mas, sim, demonstrar quais os caminhos que se devem seguir para uma circularidade, para a utilização infinita de produtos e subprodutos.

Nesse sentido, a EC tem sido amplamente aplicada no contexto de produtos, ao invés de no contexto de serviços, ainda sendo escassos os estudos que investigam as relações dos desafios, existentes na agricultura (MAHROOF et al., 2021). Entre os apontamentos como um dos principais motores dos desafios agrícolas, estão os trabalhos improdutivos das pessoas e as questões sociais, afetando os custos de manejo do produtor, além também da existência dos perigos no uso de pesticidas. A aplicação de pesticidas influencia outros fatores na cadeia de abastecimento, o que, em última análise, impede a produção agrícola mais limpa, dentro dessa cadeia (MAHROOF et al., 2021).

A Avaliação do Ciclo de Vida, com sua abordagem holística integrada, pode ser considerada um método de referência para analisar o impacto ambiental da produção agrícola (SALA, CASRELLANI, 2019). Mudar as características intermitentes ou lineares dos fluxos de recursos para fluxos mais contínuos e circulares constitui-se em enorme desafio no ecossistema, não só industrial, mas também na gestão sustentável dos resíduos. Conseqüentemente, não possuímos um único indicador de circularidade existente, até este momento; assim, pode-se dizer que o “indicador de circularidade” mais adequado para mensurar a EC foi a ACV, como uma das ferramentas mais robustas de avaliação da circularidade.

Uma "ACV circular" pode levar em conta uma análise mais detalhada do inventário do ciclo de vida, ponto importante da construção da metodologia, por

considerar o "uso de recursos" como um indicador de impacto obrigatório, ou usar metodologias de apoio específicas, como análise de fluxo de material, que leva em consideração os fluxos e os estoques de materiais e de substâncias que entram e saem de um sistema definido (Stillitano et al., 2021). Como apontado nos resultados deste artigo, a maioria dos estudos utilizam a ACV e corroboram com outra metodologia de suporte, de base estatística.

Como um dos pontos necessários de investigação dentro da agricultura, poderíamos destacar, por exemplo, o biogás, pois aparenta ser um centro de construção de uma rede de ciclos circulares entre a lavoura e a pecuária, tornando-se assim uma vantagem para o aproveitamento entre ambos, formando uma agricultura de alto rendimento, qualidade e eficiência. Outros pontos que podem ser abordados dizem respeito ao sequestro de carbono e à melhoria da qualidade do solo, juntamente com a geração de bioenergia, que são questões importantes a serem investigadas e mensuradas, de forma adequada, na mitigação das mudanças climáticas globais (XUAN; BAOTONG; HUA (2011); (GUOHUI; YUNFENG, 2012), já que culturas perenes possuem maior potencial de sequestrar ou armazenar carbono, em suas partes aéreas, raízes, serapilheira e solos. Vale lembrar que serapilheira é a camada formada pelo acúmulo de matéria orgânica, em diferentes etapas de decomposição, que reveste o solo das florestas, agricultura e pecuária.

É relevante salientar, portanto, que a modelagem da recuperação de nutrientes, sua distribuição e uso no setor agrícola, requerem a compreensão de como os nutrientes fluem ao longo das cadeias de gestão de alimentos e resíduos (BEKCHANOV; MIRZABAEV, 2018). A recuperação de recursos locais, que ainda podem estar em circulação, como a serapilheira, cria uma agricultura sustentável, preserva a fertilidade do solo, graças à biodiversidade reconstruída e também ajuda a localização de usos adequados para os resíduos, que podem ser reutilizados de forma orgânica (JØRGENSEN; REMMEN, 2018).

É necessário ponderar, também, que os modelos matemáticos podem contribuir, como grandes e eficazes aliados para melhorarem a tomada de decisão sobre o gerenciamento ideal dos resíduos com externalidades ambientais e custos de gerenciamento mínimos (BEKCHANOV; MIRZABAEV, 2018), tanto que, 49% dos estudos desta revisão, utilizaram métricas estatísticas, como base metodológica, para atenderem a seus objetivos

propostos. Para tanto, mensurar o nível de desenvolvimento que abrangesse vários objetivos, na agricultura, como: energia agrícola, renda líquida e per capita do agricultor, taxa de recursos, gerados pelo gado e pelas aves, análises multicritérios, simulações, por meio de modelagens e programação (AN; LI, 2009) (ZHAI; SHANGJIE, 2010b), (BEKCHANOV; MIRZABAEV, 2018); (XUE et al., 2019) são pontos abordados que, por meio da utilização de softwares estatísticos como: ANOVA, teste t-student de duas caudas, SPSS, entre outros, foram capazes de provar através dos números as hipóteses de sustentabilidade testadas.

As demais metodologias, como laboratoriais e estudos etnográficos, foram ferramentas específicas e pontuais para certos estudos de casos, como dos autores ÅKERMAN; HUMALISTO; PITZEN, (2020), em que se investigou a política material da EC, por meio de um estudo de caso de como uma empresa de biogás, pioneira na Finlândia, fez para se desfazer de um excedente regional de estrume, transformando-o em um recurso na produção de energia e fertilizantes. Foi um estudo que procurou compreender e retratar a particularidade e a complexidade desse grupo da Finlândia, a partir dos significados subjetivos de seus atores, em seu contexto ecológico, dados estes coletados por meio de observação participante, entrevistas e narrativas escritas.

Os estudos laboratoriais não trazem luz a uma considerável gama de problemas que a EC visa evitar, pois estes são perspectivas reais, práticas e de interesse ao agricultor, não servindo somente como meio de simulações estatísticas para dimensionarem a não ocorrência de um sistema proposto (ZABANIOTOU et al., 2015) (LORD; SAKRABANI, 2019) (MANRÍQUEZ-ALTAMIRANO et al., 2020). As amostras, através de estudos sintéticos laboratoriais, também foram capazes de mostrar que a viabilidade econômica não é rentável economicamente, pois a necessidade é emergente, assim para melhorar o desempenho dos processos é preciso reduzir os custos de instalação, de operação e de manutenção; no entanto, os projetos são ambientalmente viáveis (SÁNCHEZ-SÁNCHEZ et al., 2020).

Vale ressaltar que pode existir uma influência nos resultados das circularidades, quando há visitas dos pesquisadores aos locais de implementação, podendo entusiasmar o sucesso da implementação de uma EC, porém é difícil se chegar a uma conclusão sobre o “grau de circularidade” já que

não pode ser medido “quão circular” uma empresa ou sistema é, visto que as iniciativas da EC são frequentemente percebidas como “um trabalho extra” para as empresas próximas aos seus negócios do dia-a-dia, e para se fazerem os experimentos funcionarem é necessário percebê-los como sendo os mais fáceis possíveis (VAN KEULEN; KIRCHHERR, 2021).

2. Conclusão

Esta revisão do estado da arte forneceu uma imagem das aplicações das metodologias propostas para circularidade de processos e produtos na agricultura. Surgiram luzes e sombras em relação entre a medição da circularidade e as métricas da EC, embora os aspectos sejam complementares. As metodologias de medição se assemelham muito quando colocadas ao lado da metodologia da avaliação do ciclo de vida, juntamente com uma métrica estatística.

As questões de pesquisa, que nortearam este estudo, foram as seguintes: (1) quais os métodos aplicados para mensurar a circularidade; (2) como e quais métodos são combinados com outras abordagens na medição da circularidade; e (3) se os resultados de impacto foram usados para aumentarem a compreensão das implicações de sustentabilidade das estratégias de EC.

Em resposta à primeira questão, os pesquisadores não exploram plenamente as possibilidades oferecidas pelas metodologias, limitando sua aplicação a uma avaliação de impacto clássica, desconsiderando a quantificação material da circularidade. Da mesma forma, em relação à segunda questão, em sua grande maioria, é aplicado o uso conjunto de indicadores de impacto e indicadores de circularidade, por meio de métricas estáticas, mas existem estudos que se limitaram a serem utilizados sozinhos. Sobre a terceira questão, a avaliação da EC exige uma extensão dos limites das metodologias propostas. Apesar das limitações, ficou evidente como as metodologias permitem uma melhor compreensão das implicações de sustentabilidade das estratégias de EC, principalmente a da ACV, por ainda não terem sido totalmente implementadas ou exploradas para fornecerem uma medida de circularidade em uma perspectiva de ciclo de vida; entretanto, permitem avaliar os impactos ambientais, econômicos e sociais das estratégias circulares.

O desenvolvimento metodológico, nesta área, está em constante evolução e novas ferramentas são cada vez mais testadas pela comunidade científica para se identificarem as mais eficazes, fornecendo uma medida de circularidade que leve em consideração questões de sustentabilidade. O desenvolvimento metodológico, no entanto, deverá se basear no que vem sendo construído.

3. Referências

ADA, E. et al. Analysis of barriers to circularity for agricultural cooperatives in the digitalization era. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2021.

ÅKERMAN, M.; HUMALISTO, N.; PITZEN, S. Material politics in the circular economy: The complicated journey from manure surplus to resource. **Geoforum**, v. 116, n. May, p. 73–80, 2020.

ALOBWEDE, E.; LEAKE, J. R.; PANDHAL, J. Circular economy fertilization: Testing micro and macro algal species as soil improvers and nutrient sources for crop production in greenhouse and field conditions. **Geoderma**, v. 334, p. 113–123, 2019.

AN, H.-Y. H. Y.; LI, C.-X. C. X. C.-X. Synthetic evaluation on the development of agricultural circular economy based on the principal component analysis: A case of Tailai County in Heilongjiang Province. **2009 International Conference on Management Science and Engineering - 16th Annual Conference Proceedings, ICMSE 2009**, p. 998–1003, 2009.

ASTOLFI, V. et al. Cellulolytic enzyme production from agricultural residues for biofuel purpose on circular economy approach. **BIOPROCESS AND BIOSYSTEMS ENGINEERING**, v. 42, n. 5, p. 677–685, 2019.

ATINKUT, H. B. et al. Cognition of agriculture waste and payments for a circular agriculture model in Central China. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–15, 2020.

AYER, J. E. B. et al. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 45, n. 2, p. 180–191, 2015.

BARRANTES, L. D. E. S. Biomassa Florestal Com Finalidades Energéticas No Brasil: Caso De Itapeva Brasil: Caso De Itapeva. **Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba**, 2016.

BEKCHANOV, M.; MIRZABAEV, A. Circular economy of composting in Sri Lanka: Opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 1107–1119, 2018.

BORTOLINI, S. et al. *Hermetia illucens* (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121289, 2020.

BRUEL, A. et al. Linking Industrial Ecology and Ecological Economics: A

Theoretical and Empirical Foundation for the Circular Economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 12–21, 2018.

CARELLA, F. et al. Thermal conversion of fish bones into fertilizers and biostimulants for plant growth-A low tech valorization process for the development of circular economy in least developed countries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104815, 2021.

CASAREJOS, F. et al. Rethinking packaging production and consumption vis-à-vis circular economy: A case study of compostable cassava starch-based material. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1019–1028, 2018.

CHEN, W. et al. The socio-economic impacts of introducing circular economy into Mediterranean rice production. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 273–283, 2019.

CHENG, K. et al. Carbon footprint of crop production in China: An analysis of National Statistics data. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 422–431, 2015.

COLLEY, T. A. et al. Using a gate-to-gate LCA to apply circular economy principles to a food processing SME. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119566, 2020.

COLTRO, L. et al. Environmental profile of Brazilian green coffee. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 1, p. 16–21, 2006.

CORVELLEC, H.; STOWELL, A. F.; JOHANSSON, N. Critiques of the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, p. 1–12, 2021.

DONIA, E.; MINEO, A. M.; SGROI, F. A methodological approach for assessing business investments in renewable resources from a circular economy perspective. **Land Use Policy**, v. 76, p. 823–827, 2018.

DUQUE-ACEVEDO, M. et al. The Management of Agricultural Waste Biomass in the Framework of Circular Economy and Bioeconomy: An Opportunity for Greenhouse Agriculture in Southeast Spain. **AGRONOMY-BASEL**, v. 10, n. 4, 2020.

EMBRAPA. **CONTROLE BIOLÓGICO DE PRAGAS DA AGRICULTURA**. [s.l.: s.n.].

FERREIRA, J. V. R. *Análise De Ciclo De Vida De Produtos*. p. 80, 2004.

FERRI, M. et al. From winery waste to bioactive compounds and new polymeric biocomposites: A contribution to the circular economy concept. **Journal of Advanced Research**, v. 24, p. 1–11, 2020.

GUOHUI, S.; YUNFENG, L. The Effect of Reinforcing the Concept of Circular Economy in West China Environmental Protection and Economic Development. **Procedia Environmental Sciences**, v. 12, p. 785–792, 2012.

HOMRICH, A. S. et al. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 525–543, 2018.

JØRGENSEN, M. S.; REMMEN, A. A Methodological Approach to Development of Circular Economy Options in Businesses. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 816–821, 2018.

KIRCHHERR, J. Resources, Conservation & Recycling Circular economy and growth: A critical review of “post-growth” circularity and a plea for a circular economy that grows. **Resources, Conservation & Recycling**, n. November, p. 106033, 2021.

KOODUVALLI, K.; VAIDYA, U. K.; OZCAN, S. Life Cycle Assessment of Compostable Coffee Pods: A US University Based Case Study. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–24, 2020.

KTORI, R.; KAMATEROU, P.; ZABANIOTOU, A. Spent coffee grounds valorization through pyrolysis for energy and materials production in the concept of circular economy. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 14, Part 1, p. 27582–27588, 2018.

LORD, R.; SAKRABANI, R. Ten-year legacy of organic carbon in non-agricultural (brownfield) soils restored using green waste compost exceeds 4 per mille per annum: Benefits and trade-offs of a circular economy approach. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 1057–1068, 2019.

MAHROOF, K. et al. Drone as a Service (DaaS) in promoting cleaner agricultural production and Circular Economy for ethical Sustainable Supply Chain development. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125522, 2021.

MANRIQUEZ-ALTAMIRANO, A. et al. Analysis of urban agriculture solid waste in the frame of circular economy: Case study of tomato crop in integrated rooftop greenhouse. **SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT**, v. 734, 2020.

MANRÍQUEZ-ALTAMIRANO, A. et al. Analysis of urban agriculture solid waste in the frame of circular economy: Case study of tomato crop in integrated rooftop greenhouse. **Science of The Total Environment**, v. 734, p. 139375, 2020.

MARTINEZ URREAGA, J. et al. Tube shelters from agricultural plastic waste: An example of circular economy. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 268, 2020.

MARTÍNEZ URREAGA, J. et al. Tube shelters from agricultural plastic waste: An example of circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122401, 2020.

MATRAPAZI, V. K.; ZABANIOTOU, A. Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. **Science of The Total Environment**, v. 718, p. 137316, 2020.

MENDES, N. C. Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. **Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.**, p. 149, 2013.

MENG, X. et al. Fuzzy Min-Max Neural Network With Fuzzy Lattice Inclusion Measure for Agricultural Circular Economy Region Division in Heilongjiang Province in China. **IEEE ACCESS**, v. 8, p. 36120–36130, 2020.

MIES, A.; GOLD, S. Mapping the social dimension of the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, n. November 2020, p. 128960, 2021.

MOLIN, S. J. D. DESEMPENHO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NA VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA, NA LIXIVIAÇÃO E NO RENDIMENTO DO

FEIJOEIRO. **Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias**, 2016.

MOSQUERA-LOSADA, M. R. et al. Circular economy: Using lime stabilized bio-waste based fertilisers to improve soil fertility in acidic grasslands. **CATENA**, v. 179, p. 119–128, 2019.

MUSCAT, A. et al. Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. **Nature Food**, v. 2, n. 8, p. 561–566, 2021.

NAB, C.; MASLIN, M. Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam conventional and sustainable coffee production and export to the United Kingdom. **Geo: Geography and Environment**, n. November, p. 1–19, 2020.

NEMECEK, T.; KÄGI, T. Life cycle inventories of Agricultural Production Systems. **Ecoinvent**, n. 15, p. 1–360, 2007.

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, n. December 2020, p. 127973, 2021.

NOYA, I. et al. Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia – A strategy to work towards Circular Economy. **Science of The Total Environment**, v. 589, p. 122–129, 2017.

OZCARIZ-FERMOSELLE, M. V et al. Promoting Circular Economy Through Sustainable Agriculture in Hidalgo: Recycling of Agro-Industrial Waste for Production of High Nutritional Native Mushrooms. **Climate Change Management**, p. 455–469, 2019.

ROCCHI, L. et al. Measuring circularity: an application of modified Material Circularity Indicator to agricultural systems. **Agricultural and Food Economics**, v. 9, n. 1, 2021.

SALINAS, B. Life Cycle Assessment of Coffee Production. -, p. 6, 2008.

SALOMONE, R. Life cycle assessment applied to coffee production: investigating environmental impacts to aid decision making for improvements at company level. **Journal of Food Agriculture and Environment**, v. 1, n. 2, p. 295–300, 2003.

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, C. et al. Two-phase Olive mill waste: A circular economy solution to an imminent problem in Southern Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122789, 2020.

SANTANA, D. B. et al. Estimate of water erosion in coffee growing areas in serra da mantiqueira, Minas Gerais state, brazil. **Agriculture and Forestry**, v. 67, n. 2, p. 75–88, 2021.

SECCO, C. et al. Circular economy in the pig farming chain: Proposing a model for measurement. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121003, 2020.

SERAFIM, M. E. Sistema conservacionista e de manejo intensivo na melhoria de atributos do solo para a cultura do cafeeiro. **Tese de Doutorado da Universidade Federal de Lavras, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.**, p. 120, 2011.

STILLITANO, T. et al. Sustainable agri-food processes and circular economy pathways in a life cycle perspective: State of the art of applicative research. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 5, p. 1–29, 2021.

STUCKI, M. et al. How life cycle–based science and practice support the transition towards a sustainable economy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2021.

VAN KEULEN, M.; KIRCHHERR, J. The implementation of the Circular Economy: Barriers and enablers in the coffee value chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 125033, 2021.

VELASCO-MUÑOZ, J. F. et al. Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, n. January, 2021.

WEBER, C. T.; TRIERWEILER, L. F.; TRIERWEILER, J. O. Food waste biorefinery advocating circular economy: Bioethanol and distilled beverage from sweet potato. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 121788, 2020.

WERNICK, I. K.; AUSUBEL, J. H. National material metrics for industrial ecology. **Resources Policy**, v. 21, n. 3, p. 189–198, 1995.

XI, H. Models of Circular Economy on Agriculture in Yunnan Province. **Energy Procedia**, v. 5, p. 1078–1083, 2011.

XIA, X.; RUAN, J. Analyzing Barriers for Developing a Sustainable Circular Economy in Agriculture in China Using Grey-DEMATEL Approach. **SUSTAINABILITY**, v. 12, n. 16, 2020.

XUAN, L. I.; BAOTONG, D.; HUA, Y. E. The Research Based on the 3-R Principle of Agro-circular Economy Model-The Erhai Lake Basin as an Example. **Energy Procedia**, v. 5, p. 1399–1404, 2011.

XUE, Y. NAN et al. Environmental and economic benefits of carbon emission reduction in animal husbandry via the circular economy: Case study of pig farming in Liaoning, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117968, 2019.

YAZDANI, M.; GONZALEZ, E. D. R. S.; CHATTERJEE, P. A multi-criteria decision-making framework for agriculture supply chain risk management under a circular economy context. **Management Decision**, 2019.

ZABANIOTOU, A. et al. 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 Development**, v. 14, p. 22–36, 2015.

ZHAI, X.; SHANGJIE. Integrated evaluation PPC model of agricultural circular economy in the perspective of ecological restoration. **Advanced Materials Research**, v. 113–116, p. 750–756, 2010a.

ZHAI, X.; SHANGJIE. Integrated evaluation PPC model of agricultural circular economy in the perspective of ecological restoration. **Advanced Materials Research**, v. 113–116, p. 750–756, 2010b.

CAPÍTULO III

A PEGADA DE CARBONO COMO BASE PARA A CIRCULARIDADE NA CAFEICULTURA

Resumo:

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café. O país tem mais de 1,8 milhões de hectares com cafezais, correspondendo a aproximadamente 3,2% do território nacional. Em, 2022 exportou cerca de 2,2 milhões de toneladas, o equivalente a 39,4 milhões de sacas de café, gerando trabalho e renda para milhões de brasileiros. No entanto, a produção de café é intensiva na utilização de recursos e, normalmente, atribui-se impactos ambientais negativos ao seu processo produtivo. O uso racional e a reutilização desses recursos tem sido cada vez mais demandados, tanto para redução de custos da produção agrícola, como pela exigência dos clientes, que estão cada vez mais preocupados com a origem e a sustentabilidade dos produtos que consomem. As práticas agrícolas conservacionistas, baseadas na economia circular, vêm sendo cada vez mais adotadas, porém ainda são escassos os estudos. Desta forma, objetivou-se elaborar o inventário do ciclo de vida e calcular a pegada de carbono de cafezais manejados sob práticas conservacionistas, à luz da economia circular. Utilizou-se o método de Avaliação do Ciclo de Vida para realização do inventário onde foram consideradas as principais práticas de cultivo e manejo desenvolvidas nas propriedades avaliadas. As unidades funcionais consideradas foram de 1 hectare de café e 1 kg de café verde. O potencial de aquecimento global das fazendas foi de 106,54 kg de CO₂ eq. ha⁻¹. A média geral para todas as fazendas por kg de café produzido foi 4,13 kg CO₂ eq. Assim, esse estudo contribuiu para entender melhor a avaliação dos impactos de sistemas de práticas conservacionistas a fim de evidenciar a redução das emissões de gases de efeito estufa e a circularidade do processo produtivo.

Palavras-chaves: Gases de Efeito Estufa, solo, Economia Circular, Agricultura Regenerativa.

Abstract:

Brazil is the world's largest producer and exporter of coffee. The country has more than 1.8 million hectares with coffee plantations, corresponding to approximately 3.2% of the national territory. In 2022, it exported about 2.2 million tons, equivalent to 39.4 million bags of coffee, generating work and income for millions of Brazilians. However, coffee production is resource-intensive and negative environmental impacts are usually attributed to its production process. The rational use and reuse of these resources has been increasingly demanded, both to reduce agricultural production costs and due to the demands of customers, who are increasingly concerned about the origin and sustainability of the products they consume. Conservationist agricultural practices, based on the circular economy, have been increasingly adopted, but studies are still scarce. Thus, the objective was to elaborate the life cycle inventory and calculate the carbon

footprint of coffee plantations managed under conservation practices, in the light of the circular economy. The Life Cycle Assessment method was used to carry out the inventory where the main cultivation and management practices developed on the evaluated properties were considered. The functional units considered were 1 hectare of coffee and 1 kg of green coffee. The global warming potential of the farms was 106.54 kg CO₂ eq. ha⁻¹. The overall average for all farms per kg of coffee produced was 4.13 kg CO₂ eq. Thus, this study contributed to better understand the evaluation of the impacts of conservation practices systems in order to highlight the reduction of greenhouse gas emissions and the circularity of the production process.

Keywords: Greenhouse Gases, Soil, Circular Economy, Regenerative Agriculture

Introdução

O café é a segunda bebida mais consumida no mundo, atrás apenas da água (DIEESE, 2022; OIC, 2022). Segundo a Organização Internacional do Café (OIC, 2023), o mundo produziu entre outubro de 2021 e setembro de 2022, 170,83 milhões de sacas de 60 quilos e consumiu 164,9 milhões de sacas. Para a safra 2022-2023 existe uma perspectiva de produção mundial de café estimada em 171,3 milhões de sacas de 60kg. A área ocupada por cafezais no Brasil chega a 1.82 milhões de ha, aproximadamente 3,2% do território nacional.

Da produção agrícola até o consumidor final, o café passa por diversas etapas dentro do seu Sistema Agroindustrial, envolvendo diversos agentes, como os fornecedores de insumos, máquinas e equipamentos, o produtor rural, cooperativas, empresas processadoras, exportadoras, assistência técnica, compradores internacionais e consumidores internos (CHAIN et al., 2016).

Os sistemas de produção alimentar até 2015 foram responsáveis por emitir anualmente 18 Gt (gigatonelada) de CO₂ equivalente, contribuindo para a propagação do aquecimento global (IPCC, 2023), o aumento do excesso de oferta de nitrogênio reativo, eutrofização de terras e corpos d'água, emissões de GEE e perdas de biodiversidade, até mesmo essas consequências motivadas pelos sistemas de produção tendem a ser irreversíveis (SMITH et al., 2013; STEFFEN et al., 2015; IPCC, 2019). Porém, essa degradação ainda pode acentuar-se na medida em que a demanda por alimentos aumenta, principalmente quando está associada a grandes *commodities* agrícolas, como, por exemplo, a produção de café (MARTINELLI, 2023).

Atualmente no Brasil, existem poucas informações científicas sobre GEE na cafeicultura, principalmente para fluxos de óxido nitroso (N_2O) no solo sob irrigação e fertilização com altas doses de nitrogênio (N) aplicadas - entre 200 e 600 kg/ha/ano (EMBRAPA, 2023).

O atual modelo linear de produção, que é quando as matérias primas são retiradas da natureza e transformadas em produtos finais, apresenta-se cada vez mais fragilizado, devido a disponibilidade limitada de recursos naturais (PEREIRA, 2020) surgindo, assim, uma busca da Economia Circular (EC), que embora pouco conhecida como na atualidade, já é abordada por pesquisadores desde o século XX (BOUZON, 2021). A EC é tanto regenerativa quanto restaurativa (BARCELOS et al., 2021). Para o uso adequado dos recursos naturais limitados, a EC pode ser uma abordagem eficaz e alternativa para muitos sistemas de produção que visam proteger o meio ambiente natural (KHAN et al., 2023a).

Neste sentido, se faz necessário uma ferramenta para avaliar os potenciais impactos ambientais no intuito de buscar melhorias de produtos e processos em cada etapa do produto seu ciclo de vida, levando-se em conta todas as etapas de produção, desde a extração de matérias-primas até a disposição dos resíduos (BARRANTES, 2016). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é cada vez mais vista como uma ferramenta útil para avaliar os impactos ambientais do setor agroalimentar e é considerada uma abordagem interessante e objetiva para definir e quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do processo produtivo (LAZZERINI et al., 2022).

A metodologia ACV, pode contribuir ao viés da EC, que é permitir avaliar os impactos ambientais, econômicos ou sociais das estratégias circulares. A EC é um conceito que busca um melhor desenvolvimento dos recursos naturais, e procura uma melhor compreensão das implicações de sustentabilidade das estratégias de sustentabilidade, a qual ainda não foram totalmente implementadas ou exploradas para fornecerem uma medida de circularidade em uma perspectiva de ciclo de vida.

A utilização dos conceitos de EC para a sustentabilidade é uma tendência mundial (DO et al., 2023). E para avaliar os vários fatores sustentáveis, a ACV tem grande significância nos artigos estudados, em que autores como Stillitano et al. (2021) e Colley et al. (2020) demonstram que a sua utilização tem sido

usada para analisar os impactos ambientais das cadeias de abastecimento, além de ser uma ferramenta útil para selecionar as opções de EC e identificar o melhor cenário futuro, incluindo estudos sobre biomassa para fins energéticos, produtos alimentares, produtos bioquímicos e biocompósitos, redução de resíduos e valorização de resíduos, também, para recuperação de energia e fabricação de produtos, a partir de matérias-primas (renováveis ou não renováveis) (NOYA et al., 2017; CASAREJOS et al., 2018; CHEN et al., 2019; XUE et al., 2019).

Observa-se, ainda, que existem diversas barreiras a serem transpostas para se alcançar a circularidade nas culturas e na produção animal, além de buscar uma mudança na infraestrutura existente bem como as abordagens de gestão. Exigirá, na grande maioria das fazendas, mudanças em suas transações, pois essa transformação, proposta pela EC, impactará, metodologicamente, tanto para quantificar o campo agrícola, numericamente e proporcionalmente, quanto para quantificar tudo aquilo que se pode retirar do campo agrícola e, com isso permitir que se evidenciem os pontos fracos e fortes das atividades agrícolas, com possibilidades de ganhos, em prol de uma agricultura circular (FLYNN et al., 2023; VELASCO-MUÑOZ et al. 2021).

Autores como Russell et al. (2008), Hong et al. (2013), Hong et al. (2017), McCrackin et al. (2018) e Flynn et al. (2023), apontam para um desafio que requer intervenções na agricultura tal como a necessidade de redistribuir os nutrientes, oriundos de estrume ou de folhas (resíduos agrícolas, em geral), a fim de atender às demandas das culturas, especialmente quando à aplicação de fertilizantes sintéticos poder ser substituída.

Nas buscas realizadas na literatura, encontraram-se, até o presente momento, alguns poucos artigos abordando a temática da EC no café, tais como: de Ktori; Kamaterou; Zabaniotou, (2018); Matrapazi; Zabaniotou, (2020); Kooduvalli, Vaidya, Ozcan (2020) e Van; Keulen; Kirchherr (2021). Mesmo assim, nesses estudos não se dispõem de dados suficientes para se compor um inventário que contemple o foco da presente tese. Vale ressaltar que, dentre esses autores, nem todos abordam apenas a agricultura cafeeira, muitos contemplam, também, a matéria prima acabada, o café como bebida.

Vale destacar que apesar de existirem na literatura muitos trabalhos desenvolvidos com a ACV, sua aplicação ao café é bastante limitada e, ao se aplicar a EC, delimita-se esse contexto ainda mais, sendo este trabalho pioneiro

para uma análise dos GEE à luz da circularidade, portanto, neste capítulo final da tese, objetiva-se em desenvolver o inventário do ciclo de vida e calcular a pegada de carbono dos cafezais manejados sob multipráticas conservacionistas, a luz da economia circular.

2. Materiais e métodos

Para desenvolver o inventário do ciclo de vida e calcular a pegada de carbono dos cafezais manejados sob práticas conservacionistas, à luz da economia circular, foi utilizado o método de ACV. A metodologia foi estruturada em quatro frases: objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação, seguindo as normas da ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006a, 2006b).

Os resultados obtidos, a partir do ICV e AICV, são apresentados na forma de tabelas e figuras, posteriormente, classificados, analisados e discutidos, servindo de base para conclusões, recomendações, proposição de melhorias e tomada de decisão, tudo em conformidade com o objetivo e o escopo da ACV e, assim, aplicados e mensurados para a verificação da sua circularidade.

2.1 Local do estudo

No presente estudo, foram avaliados os cafezais pertencentes à empresa Agropecuária Piumhi (AP) que estão localizados na Serra da Canastra, Bioma Cerrado, situada na região do Alto São Francisco, no município de Piumhi, estado de Minas Gerais (MG). O Clima da região é classificado pelo método de Köppen tipo (Cwa) de clima semi-úmido, que corresponde a 5 meses secos, de abril a agosto, e os demais meses clima úmido, referente aos meses de setembro a março; com precipitação média anual de 1.344 mm. A temperatura média anual é de 20,7° C, com umidade relativamente média de 60% e a altitude média de 900 m (MENEGASSE et al., 2002).

Este estudo, compreende cinco fazendas pertencentes a Agropecuária Piumhi (AP) que contemplou uma área total de 345,31 ha, os quais foram inventariados e avaliadas no decorrer de 5 anos de produção (2015/2016 a 2019/2020). As respectivas fazendas conservacionistas foram; API que corresponde a 81,55 ha, APII com 86,37 ha, APIII de 73,91 ha, AP Curimba com

41,24 ha e AP Família que possui 62,24 ha. O tipo de solo predominante nas fazendas é o Latossolo Vermelho Distrófico (RAMOS et al., 2013).

Seguindo as seguintes coordenadas as fazendas são localizadas da seguinte forma: API 20°18'36.60"S 46°21'10.76"O, APII 20°21'56.36"S 46°23'17.41"S 46°23'17.41"O, APIII 20°19'43.60"S 46°18'38.56"O, AP Curimba 20°11'32.46"S 46°22'16.41"O, AP Família 20°15'51.04"S 46°18'17.84"O.

2.2 Caracterização do sistema de produção multipráticas conservacionistas

O sistema multipráticas conservacionista destaca-se por tornar viável boas práticas de manejo, normalmente não adotadas, em razão da dificuldade que o produtor encontra para executá-las de forma rotineira, além das atividades normalmente requeridas pela cafeicultura (SERAFIM, 2011).

Nas fazendas avaliadas são realizados monitoramento do estado nutricional das plantas e manejo das adubações baseando se em análises foliares periódicas, com o intuito de promover um elevado aporte de matéria orgânica na superfície do solo; cobertura permanente do solo; melhor reciclagem de nutrientes; aumento da capacidade de infiltração de água no solo; redução de erosão; melhoria química do ambiente radicular pela aplicação de doses de gesso, calcário e adubação, o que propicia um singular crescimento radicular em profundidade e rápido estabelecimento das mudas, favorecido também pela maior profundidade do sulco de plantio.

As diferenças entre os sistemas convencional e conservacionista já se dá na implantação do cafezal. A Tabela 6 apresenta características do sistema adotado na fazenda AP e sistema convencional de produção de café

Tabela 6 – Comparação entre o sistema convencional e multipráticas conservacionistas, fase de implantação

	Unidade	Multipráticas conservacionistas	Convencional
Densidade de plantio	plantas ha ⁻¹	6153	4800
Calcário	t ha ⁻¹	8	15,5
Gesso na superfície	t ha ⁻¹	22	Não utiliza
Forragem		<i>Brachiaria decumbens</i>	Não utiliza

Fonte: Elaborada pela autora.

A implantação de um novo cafezal inicia-se com a limpeza ou reforma da área, o que normalmente ocorre entre os meses de julho a agosto. Essa etapa é

similar à preparação do sistema convencional. Após a subsolagem, aração e gradagem, quando necessário pode ocorrer destoca, ocorre o preparo com revolvimento e correção da fertilidade do solo e finalmente com a construção dos sulcos de plantio com até 60 cm de profundidade. A primeira diferença significativa do sistema conservacionista está na aplicação de gesso agrícola para a correção do solo. Enquanto no plantio convencional são aplicados em média 15,5 t ha⁻¹ de calcário, no sistema conservacionista são aplicados 8 t ha⁻¹, com a adição de 5 t ha⁻¹ de gesso.

Após o preparo do solo segue o plantio, que pode ser mecanizado ou manual dependendo da topografia dos talhões. O espaçamento mais comum encontrado nas fazendas analisadas foi o 2,5 m x 0,65 m, o que resulta em uma densidade de 8.000 plantas por ha. No entanto, fatores como declividade e práticas de manejo influenciam a densidade de plantio. A densidade média nos talhões analisados foi de 6.153 plantas por hectare com desvio padrão de 1.222. O uso do sistema adensado no sistema conservacionista tem como vantagens a otimização do uso da terra e recursos, permitindo maior produtividade. Nos sistemas convencionais o espaçamento mais comum é 3,2 m x 0,65 m, constituindo um estande de 4.800 plantas por hectare.

Outra característica do sistema conservacionista aplicado nas fazendas, é a implantação de *Brachiaria decumbens* nas entrelinhas dos cafezais para cobertura do solo da área e ciclagem de nutrientes. Para implantar a braquiária é feita a semeadura de uma linha na entrelinha. Nas lavouras em fase de formação, o manejo da braquiária é feito com roçadeira tratorizada, sendo o primeiro corte feito logo após o pendoamento, fase reprodutiva. No período chuvoso, a gramínea é cortada a intervalos de 35 a 45 dias e no início do período de seca a braquiária é roçada, visando a redução da concorrência com o cafeeiro, principalmente por água no solo. A implantação e manejos da brachiaria é fundamental para cobertura do solo, uma grande vantagem em comparação com os sistemas convencionais onde o solo fica exposto favorecendo a erosão, perdas de nutrientes e o crescimento de plantas daninhas.

Aos 60 dias após o plantio iniciam-se às adubações de cobertura do cafeeiro. O prazo de 60 dias é possível devido a utilização de adubo de liberação lenta no plantio. São feitas três adubações com intervalos de 30 a 40 dias, até o mês de abril. Nesta operação é aplicada fórmula conforme a necessidade da

planta. Nesse período também segue a aplicação de gesso agrícola em superfície, 17 t ha^{-1} na linha da cultura em uma faixa de 50 a 59 cm de largura, totalizando 22 t ha^{-1} . Essa etapa serve de reservatório de cálcio e enxofre para os próximos 10 anos de cultivo da planta, que é realizado apenas na linha da muda. Outro benefício da aplicação do gesso é o favorecimento do crescimento radicular das plantas que pode chegar em média a 80 cm de profundidade. Com isso a raiz da planta ocupa um maior volume de solo, conseqüentemente tem um maior acesso a umidade de água disponível, tornando o sistema conservacionista mais resistentes a secas e períodos secos.

Agora inicia a chegada de terra na linha da cultura, onde começa o processo de amontoa, que nada mais é do que um trator que passa e remove um pouco do solo, braquiária e resíduos entre linha e joga no pé da planta, preparando um montinho no pé da muda; esse processo protege o gesso, a planta de possíveis geadas, além de ser o reservatório de cálcio e enxofre; em áreas com maior inclinação, cada linha também pode funcionar como mini terraço, que é uma prática de conservação do solo.

Inicialmente, a leira formada com a amontoa chegou a 50 cm de altura; com o tempo, ocorre a acomodação do material, que corresponde aos resíduos vegetais fornecidos pela braquiária cultivada nas entre linhas, estabilizando-se com 20 a 30 cm de altura (SERAFIM, 2013; RAMOS, 2013).

Ao final desses processos, preparo do solo e implantação do cafezal, plantio da cultura de cobertura do solo nas entrelinhas e das mudas de cafés, começa o monitoramento do cafezal, ou seja, conforme a necessidade da lavoura, são feitas as aplicações de fertilizantes, herbicidas, fungicidas e pulverizações.

A Tabela 7, apresenta média e do desvio padrão de características das fazendas no decorrer dos 5 anos avaliados no estudo. O sistema multipráticas conservacionista tem como vantagem, a otimização do uso da área, permitindo uma maior produtividade e uma média de vida longa aos pés de cafés. Vale ressaltar que os cafezais dos sistemas multipráticas conservacionistas tem uma vida produtiva entre 18 a 20 anos, ocorrendo em seguida poda drástica, inicia novamente processo de destoca, implantação de um novo cafezal. No sistema convencional a média produtiva é de 12 a 15 anos, e a produtividade média é de 30,6 sacas por hectare.

Tabela 7 – Estatística descritiva dos dados na fase produtiva das fazendas dos 5 anos de safra

Variável	Unidade		AP I	AP II	AP III	AP Curimba	AP Família
Área talhão	ha	Média	6,2	7,4	5,95	9,86	21,27
		DP	7,7	5,2	2,28	4,84	1,21
Produção	saca ha ⁻¹	Média	12,1	33,7	17,66	23,27	58,48
		DP	65,0	74,1	75,87	76,04	511,94
Idade (talhões)	ano ha ⁻¹	Média	17	12	12	13	9
		DP	1,8	1,3	2,8	1,4	1,7
Fertilizante sintético (NPK)	kg ha ⁻¹	Média	64,8	54,2	80,68	45,64	23,51
		DP	20,9	27,8	71,64	18,44	144,74
Fertilizante orgânico (Composto)	kg ha ⁻¹	Média	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00
		DP	352	46,7	1065	0,00	0,00
Fertilizante foliar	kg ha ⁻¹	Média	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00
		DP	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00

Legenda: DP, Desvio Padrão. A média e os DP foram para os 5 anos produtivos dos talhões.

Fonte: Elaborado pela autora

2.3 Objetivo e Escopo

O objetivo deste capítulo foi desenvolver o inventário do ciclo de vida e calcular a pegada de carbono dos cafezais manejados sob práticas conservacionistas, à luz da economia circular. A profundidade e a abrangência da ACV foram caracterizadas como do “berço ao portão da fazenda”, respeitando os limites da propriedade. A unidade funcional (UF) é um kg de café verde.

O público-alvo abrange os cafeicultores com o intuito de impulsionar a cadeia produtiva e o país e, assim, criarem-se potenciais aplicações de circularidade. Posteriormente, essas aplicações de circularidade podem ser utilizadas não só na cafeicultura, mas também em outras cadeias produtivas, a fim de ampliarem o mercado consumidor e a visibilidade internacional, devido à aplicação da teoria da EC.

2.4 Inventário do ciclo de vida (ICV)

A análise do inventário do ciclo de vida trata dos dados de entrada/saída de fluxos elementares associados ao sistema em estudo e envolve a coleta de dados necessários para atingir o objetivo proposto. Os dados utilizados para o inventário foram provenientes da coleta de dados em que foram identificadas e quantificadas quais são as entradas e as saídas dos sistemas, e quais são os limites do escopo para a construção adotada (“berço ao portão da fazenda”).

Os dados relativos implantação e manejo das lavouras foram coletados de forma primária (*foreground*), já as lacunas e dados de processos de fundo

(*background*) foram preenchidos com informações disponíveis na base de dados internacional do *Ecoinvent* (versão 3.7.1).

2.4.1 Dados de *foreground*

As entradas e as saídas consideradas foram aquelas diretamente relacionadas à produção: a preparação do solo, o plantio, os tratos culturais e a colheita. As informações quantitativas de entradas foram informadas pela empresa rural, priorizando os dados primários.

2.4.1.1 Contabilização das operações mecanizadas

Com base na Ficha de Informações de Segurança de Produto Química (FISPQ), disponibilizada pela Petrobrás Distribuidora, o diesel consumido nas operações, possui uma densidade de 0,854 kg/m³ (NEMECEK; KAGI, 2007).

As emissões para o ar resultantes da combustão durante as operações mecanizadas foram também estimadas, a saber: Dióxido de carbono (CO₂), Dióxido sulfúrico (SO₂), Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O) e Amônia (NH₃). Para estimar tais emissões a Equação 01 foi utilizada.

$$E_{op} = C * FE_{GEE} \quad (01)$$

Onde:

E_{op} = Emissão de outros gases poluentes;

C = Consumo de combustível (Kg);

FE_{GEE} = Fator de emissão dos outros gases poluentes.

A queima dos combustíveis fósseis nas operações emite GEE e baseada para análise em Nemecek e Kagi (2007), conforme a equivalência entre as operações realizadas no campo, utilizou-se como base de cálculos as informações contidas na Tabela 8 para elaboração da emissão de outros gases poluentes.

Tabela 8 - Fatores de emissões para o uso de diesel

Substância	Diesel kg
Dióxido de carbono (CO_2)	3,12E+03
Dióxido sulfúrico (SO_2)	1,01E+00
Chumbo (Pb)	0,00E+00
Metano (CH_4)	1,29E-01
Benzeno (C_6H_6)	7,30E-03
Cádmio (Cd)	1,00E-05
Cromo (Cr)	5,00E-05
Cobre (Cu)	1,70E-03
Óxido nitroso (N_2O)	1,20E-01
Níquel (Ni)	7,00E-05
Zinco (Zn)	1,00E-03
Benzo(a)pireno	3,00E-05
Amônia (NH_3)	2,00E-02
Selênio (Se)	1,00E-05
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	
Benzo(a)antraceno	8,00E-05
Benzo(a)fluorantraceno	5,00E-05
Criseno	2,00E-04
Dibenzo(a,h)-antraceno	1,00E-05
Fluoranteno	4,50E-04
Fenanteno	2,50E-03

Fonte: Nemecek e Kagi (2007).

2.4.1.2 Emissão de óxido nitroso

Outro fator necessário a ser calculado foi o óxido nitroso, produzido naturalmente nos solos através dos processos de nitrificação e desnitrificação. Nitrificação é a oxidação microbiana aeróbica do amônio a nitrato, e a desnitrificação é a redução microbiana anaeróbica de nitrato em gás nitrogênio (N_2). O óxido nitroso é um intermediário gasoso na sequência da reação de desnitrificação e um subproduto da nitrificação, que vaza das células microbianas para o solo e, finalmente, para a atmosfera (IPCC, 2019).

Um dos principais fatores controladores dessa reação é a disponibilidade de N inorgânico no solo. Segundo o IPCC (2019), estimam -se as emissões de N_2O , usando adições líquidas de N, induzidas pelo homem aos solos (por exemplo, sintético ou orgânico, fertilizantes, esterco depositado, restos de colheita, lodo de esgoto), ou de mineralização de N, na matéria orgânica do solo, após drenagem/manejo de solos orgânicos, ou mudança de cultivo/uso da terra, em solos minerais (por exemplo, Floresta Terras/Prados/Assentamentos convertidos em Terras Agrícolas).

Em grande parte dos solos, um aumento no N disponível aumenta as taxas de nitrificação e desnitrificação que então aumentam a produção de N_2O . Aumentos no N disponíveis podem ocorrer por meio de adições de N, induzidas pelo homem ou por mudanças no uso da terra e/ou práticas de manejo, que mineralizam o N orgânico do solo.

O cálculo de emissão direta de $N_2O - N$ é feito, portanto, através das seguintes equações descritas abaixo. Vale salientar que todos os valores correspondentes das emissões que utilizam nas fórmulas encontram-se na Tabela 08.

$$N_2O - N = (F_{SN} + F_{CR}) * EF_1$$

Onde:

$N_2O - N$ = Emissões diretas anuais de $N_2O - N$ produzidas a partir de solos manejados;

F_{SN} = Quantidade anual de fertilizante sintético ou orgânico N aplicado aos solos;

F_{CR} = Quantidade anual de N em resíduos de culturas (acima e abaixo do solo), incluindo culturas de fixação de N, e da renovação de forragem/pastagem, devolvidos aos solos, kg N yr⁻¹

EF_1 = Fator de emissão desenvolvidos para emissões de N_2O de entradas de N de fertilizante sintético e aplicação de N orgânico.

Para o cálculo das emissões indiretas de N_2O por volatilização e deposição sintética e orgânica é feita, a partir das equações seguintes:

- N_2O por volatilização e deposição sintética:

$$N_2O_{(ATD)} = [(F_{SN} * Frac_{GASF}) * EF_4] * 44/28$$

Onde:

$N_2O_{(ATD)}$ = Quantidade anual de N_2O produzida a partir da deposição atmosférica de N, volatilizado de solos manejados, emissões indiretas;

F_{SN} = Quantidade anual de fertilizante sintético N aplicado aos solos;

$Frac_{GASF}$ = fração de N, fertilizante sintético, que volatiliza como NH₃ e NO_x, kg N volatilizam (kg de N aplicado) ¹;

EF_4 = fator de emissão para as emissões de N_2O por deposição atmosférica de N, no solo.

- N_2O por volatilização e deposição orgânica

$$N_2O_{(ATD)org} = [(F_{sn+org} * Frac_{GASF}) * EF_4] * 44/28$$

Onde:

$N_2O_{(ATD)org}$ = Quantidade anual de N_2O produzida a partir da deposição orgânica de N, volatilizado de solos manejados;

$F_{SN\ org}$ = Quantidade anual de fertilizante orgânico N aplicado aos solos;

$Frac_{GASF}$ = fração de N, fertilizante orgânico, que volatiliza como NH_3 e NO_x , kg N volatilizam (kg de N aplicado) ¹;

EF_4 = fator de emissão para as emissões de N_2O por deposição orgânica de N, no solo.

Foram adotados valores padrão sugeridos pelo IPCC (2019) para $Frac_{GASF}$ e EF_4 , levando-se em consideração clima seco, molhado e os tipos de N encontrados nos fertilizantes, na parte de implantação do sistema.

As emissões de N_2O por lixiviação e escoamento, em regiões onde ocorre, são estimadas usando a seguinte equação:

$$N_2O_{(L)} = (F_{sn} * Frac_{LEACH-(H)} * EF_5) * 44/28$$

Onde:

$N_2O_{(L)} - N$ = quantidade anual de $N_2O - N$ produzida por lixiviação e escoamento de adições de N no solo manejado, onde ocorre lixiviação/escorrimento;

F_{sn} = quantidade anual de fertilizante sintético N aplicado ao solo da região, onde ocorre lixiviação/escorrimento;

$Frac_{LEACH-(H)}$ = Fração de todo o N adicionado/mineralizado no solo manejado, onde ocorre lixiviação, escoamento, que é perdido por lixiviação e escoamento;

EF_5 = Fator de emissão para emissões de N_2O por lixiviação e escoamento de N, ton $N_2O - N$.

Consistiu-se em adotar valores padrões, sugeridos pelo IPCC (2019): para $Frac_{LEACH-(H)}$ e EF_5 . O $Frac_{LEACH-(H)}$ só se aplica a climas úmidos. Para

clima seco, o padrão $Frac_{LEACH-(H)}$ é considerado zero. Os valores correspondentes às demais emissões se encontram na tabela 09

2.4.1.3 Emissões de CO_2 de Calagem

A calagem é usada para reduzir a acidez do solo e melhorar o crescimento das plantas em sistemas manejados, principalmente terras agrícolas e florestas manejadas. A adição de carbonatos aos solos na forma de cal (por exemplo, calcário cálcico ($CaCO_3$) ou dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) leva a emissões de CO_2 , à medida que se dissolvem e liberam bicarbonato ($2HCO_3$), que evoluem para CO_2 e água (H_2O). A equação é calculada da seguinte forma:

$$CO_2 - C = (M_{limestone} * EF_{limestone}) + (M_{dolomite} * EF_{dolomite}) * 44/12$$

Onde:

$CO_2 - C$ = emissões de C da aplicação de calcário

M = quantidade de calcário ou dolomita

EF = fator de emissão para calcário ou dolomita

Para EF foram adotados valores padrões, sugeridos pelo IPCC (2006).

A construção do $N_2O - N$, $N_2O_{(ATD)} - N$, $N_2O_{(L)} - N$, $CO_2 - C$ e $CO_2 - C_{emission}$ contou com base nos fatores de emissão padrão, disponibilizados através do IPCC (2006) e IPCC (2019), vide a Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros e fatores de emissão para cálculo de emissão de N_2O para a implantação do café 2015/2016 (IPCC, 2019).

Parâmetros e fatores de emissão	Unidade de medida	Valor
EF_1	kg $N_2O - N$ (kg N) ⁻¹	0,01
EF_4 estação das águas	kg $N_2O - N$ (kg NH_3-N + $NOx-N$ volatilised) ⁻¹	0,014
EF_4 estação das secas	kg $N_2O - N$ (kg NH_3-N + $NOx-N$ volatilised) ⁻¹	0,005
EF_5	kg $N_2O - N$ (kg N leaching/runoff) ⁻¹	0,011
$Frac_{GASF}$ Sulfato de Amônia	(kg NH_3-N) (kg N applied) ⁻¹	0,095
$Frac_{GASF}$ Sulfato de Amônia	($NOx-N$) (kg N applied) ⁻¹	0,007
$Frac_{GASF}$ Ureia	(kg NH_3-N) (kg N applied) ⁻¹	0,14
$Frac_{GASF}$ Ureia	($NOx-N$) (kg N applied) ⁻¹	0,011
$Frac_{GASF}$ MAP	(kg NH_3-N) (kg N applied) ⁻¹	0,053
$Frac_{GASF}$ MAP	($NOx-N$) (kg N applied) ⁻¹	0,007
$Frac_{GASF}$ Nitrato Amônia	(kg NH_3-N) (kg N applied) ⁻¹	0,03

$Frac_{GASF}$ Nitrato Amônia	(NO _x -N) (kg N applied) ⁻¹	0,029
$Frac_{LEACH-(H)}$	kg N (kg N additions or deposition by grazing animals) ⁻¹	0,24
$EF_{limestone}$	tonne of C (tonne of limestone) ⁻¹	0,12
$EF_{dolomite}$	tonne of C (tonne of dolomite) ⁻¹	0,13

Fonte: Adaptado de IPCC (2019).

2.4.2 Dados de *background*

Foram considerados nos inventários a produção e o transporte de fertilizantes, pesticidas e corretivos de solo (Tabela 10). Os dados secundários, quando necessários, foram obtidos na base de dados do *EcolInvent*, disponibilizada no software SimaPro®.

Tabela 10 – Inventário de emissões dos insumos para correção do solo

Entrada	CO ₂ eq/kg café
Fertilizante nitrogenado	4,17
Fertilizante fosfatado, como P ₂ O ₅	2,40
Gesso agrícola	0,02
Calcário como CaCO ₃	0,04

Fonte: Baseado no *EcolInvent*

Então por fim, conseguimos ter o inventário da fase de implantação do cafezal para 1ha e da fase produtiva do café nas fazendas para uma unidade funcional, conforme as Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11 - Inventário com as entradas e saídas da etapa de implantação do cafezal para 1ha do sistema conservacionista

Atividade	Unidade	Quantidade
Entradas		
Calcário Dolomítico	t/ha ⁻¹	8
Gesso	t/ha ⁻¹	22
N	kg/ha ⁻¹	0,59
P205	kg/ha ⁻¹	0,57
K20	kg/ha ⁻¹	0,16
Herbicida	l/ha ⁻¹	0,00
Inseticida	l/ha ⁻¹	5,50
Inseticida	kg/ha ⁻¹	1,13
Fungicida	l/ha ⁻¹	0,07
Fungicida	lg/ha ⁻¹	0,484
Foliar	L/ha ⁻¹	10,16
Foliar	kg/ha ⁻¹	19,53
Quantidade de Tanques	l/unid	2,365
Água	l/ha ⁻¹	3.144
Mudas	unid	8800
Diesel	kg	266,62
Saídas		
N ₂ O direto	kg /ha ⁻¹	9,36E-03
CO ₂ de Calcário	t /ha ⁻¹	3,813333
HC	kg	348,5
NOx	kg	5106
CO	kg	631,6
NH ₃ de fertilizante	kg	3,79E-02
NOx de fertilizante	kg	9,97E+00

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 12 – Inventário de entradas e saídas da etapa da fase produtiva do cafezal nas fazendas para uma unidade funcional no sistema multi práticas conservacionista.

Atividades	Unid.	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Entradas						
Fertilizante sintético	kg/ha ⁻¹	149,67	185,62	197,83	183,82	229,42
Fertilizante orgânico	kg/ha ⁻¹	0	94,93	82,49	211,43	40,54
Foliar	kg/ha ⁻¹	0	105	28	0	0
Inseticida	kg/ha ⁻¹	0	0	0	0	0
N orgânico	kg/ha ⁻¹	0	800	700	1825	350
N sintético	kg/ha ⁻¹	27,79	32,26	30,34	29,06	17,78
P ₂ O ₅	kg/ha ⁻¹	4,63	0,20	5,07	2,49	1,06
K ₂ O	kg/ha ⁻¹	22,01	1,97	26,74	20,10	16,83
Diesel de fertilizante	kg/ha ⁻¹	471,40	169,09	660,99	666,12	742,98
Diesel foliar	kg/ha ⁻¹	0	164,99	71,73	0	0
Diesel inseticida	kg/ha ⁻¹	0	61,48	0	0	0
Diesel total	kg/ha ⁻¹	471,40	395,57	732,73	666,12	742,98
Saídas						
N ₂ O direto	Kg	147,18	178,69	172,59	186,23	101,89
N ₂ O volatilizado sintético	kg	8,75	2,57	12,71	24,76	2,29
N ₂ O volatilizado orgânico	kg	0	1,32	1,15	3,01	0,57
N ₂ O lixiviado	kg	21,93	0	39,50	31,58	23,99

Fonte: Elaborado pela autora

2.6 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

Nesta fase é realizada a identificação e a avaliação dos impactos inventariados na fase anterior, no ICV. A NBR ISO 14040 (2009) recomenda a modelagem de caracterização dos dados a partir de categorias específicas para o caso estudado. Segundo Barrantes (2016), ao se estimarem as saídas, para o ar, água e solo, resultantes das aplicações de insumos, bem como da queima de combustíveis fósseis, verifica-se a existência de diferentes modelos e fatores de emissões que podem ser utilizados na ACV.

Os potenciais de aquecimento global, GWP (*Global Warming Potential*), são concebidos pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). O GWP de uma substância é a relação entre a contribuição para a absorção do calor de radiação resultante da descarga instantânea de 1 kg de um gás, com efeito de estufa e uma igual emissão de dióxido de carbono (CO₂), integrada ao longo do tempo (Heijungs et. al. 1992):

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

Onde:

GWP_i = representa o potencial de aquecimento global da substância i expresso em equivalentes CO_2

T = representa o horizonte de tempo (20, 100, 500 anos);

a_i = efeito de uma unidade de massa de substância (i);

$c_i(t)$ = a concentração da substância (i) no tempo (t);

$A_{CO_2} C_{CO_2}$ = são parâmetros correspondentes para a substância de referência (CO_2).

Perspectivas de tempos longos (100 e 500 anos) são utilizados para o efeito cumulativo, enquanto para tempos curtos (20 anos) traduzem uma indicação dos efeitos de curto-prazo das emissões.

No presente estudo, consideramos o potencial de aquecimento global para um horizonte de 100 anos. Os fatores de conversão aplicados foram 1, 28 e 265 para as emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O , respectivamente (IPCC, 2014).

3. Resultados

A Tabela 13 apresenta o Potencial de Aquecimento Global das emissões na fase de implantação do cafezal.

Tabela 13 – Emissão dos GEE na fase de implantação e produtiva do cafezal para 1ha sistema multipráticas conservacionista

Fase	Unidade	Quantidade
Dióxido de carbono (CO_2)	kg CO_2 eq	8,32
Metano (CH_4)	kg CO_2 eq.	33,8
Óxido nitroso (N_2O)	kg CO_2 eq.	31,5

Fonte: Elaborada pela autora

Na Tabela 14 podemos verificar que no final dos 5 anos dos sistemas de multipráticas conservacionistas é notório um desempenho superior e positivo dessa prática. Este fato pode ser explicado pelas implicações do uso da braquiária como planta de cobertura pois acarreta um melhor condicionamento físico ao solo.

Tabela 14 – Emissão dos GEE na fase produtiva do café em sistema multipráticas conservacionistas para as fazendas ao final dos 5 anos de safra

Fase	Unidade	Quantidade
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg CO ₂ eq.	106,54
Metano (CH ₄)	kg CO ₂ eq.	10,86
Óxido nitroso (N ₂ O)	kg CO ₂ eq.	95,68

Fonte: Elaborada pela autora

É válido acrescentar que neste estudo se inclui apenas a fase de produção, não engloba a fase de colheita. Portanto, na Tabela 15, temos a emissão dos GEE para o diesel na fase produtiva do café ao longo dos 5 anos analisados.

Tabela 15 –Emissão dos GEE do diesel na fase produtiva do café no sistema multipráticas conservacionistas ao longo dos 5 anos das safras analisadas

Atividades	Unid.	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
CO ₂ de diesel	CO ₂ eq. ha ⁻¹	1470,79	1234,18	2286,12	2078,29	2318,0
CH ₄ de diesel	CO ₂ eq. ha ⁻¹	0,060	0,051	0,094	0,0859	0,095
N ₂ O de diesel	CO ₂ eq. ha ⁻¹	0,056	0,047	0,0879	0,0799	0,089

Fonte: Elaborada pela autora

Salienta-se que os tratamentos culturais como decote e esqueletamento, aplicação de fertilizantes, pesticidas e roçada são operações que envolvem a utilização de máquinas e equipamentos e, conseqüentemente, ocorre a queima de combustíveis fósseis. Portanto a dosagem de fertilizantes e pesticidas também podem corroborar para que o impacto ambiental seja superior, conforme observamos na Tabela 16.

Tabela 16: Emissão dos GEE na fase produtiva do café no sistema multipráticas conservacionistas por ano para cada fazenda analisada

Ano	GEE	Unidade	AP I	AP II	AP III	AP Curimba	AP Família
2016	CO ₂	kg CO ₂ eq.	3,99	3,44	4,71	3,08	1,45
	CH ₄	kg CO ₂ eq.	0,41	0,35	0,48	0,31	0,14
	N ₂ O	kg CO ₂ eq.	3,58	3,09	4,23	2,77	1,31
2017	CO ₂	kg CO ₂ eq.	5,95	3,52	3,01	1,01	0,51
	CH ₄	kg CO ₂ eq.	0,6	0,35	0,307	0,103	0,051
	N ₂ O	kg CO ₂ eq.	5,34	3,16	2,7	0,91	0,46
2018	CO ₂	kg CO ₂ eq.	6,24	7,36	6,56	4,13	1,63
	CH ₄	kg CO ₂ eq.	0,63	0,75	0,67	0,42	0,17
	N ₂ O	kg CO ₂ eq.	5,61	6,61	5,89	3,71	1,46
2019	CO ₂	kg CO ₂ eq.	5,62	6,53	7,07	2,72	1,63
	CH ₄	kg CO ₂ eq.	0,57	0,67	0,72	0,27	0,17
	N ₂ O	kg CO ₂ eq.	5,05	5,86	6,35	2,45	1,46
2020	CO ₂	kg CO ₂ eq.	7,07	7,07	6,71	3,81	1,63
	CH ₄	kg CO ₂ eq.	0,72	0,72	0,68	0,39	0,17
	N ₂ O	kg CO ₂ eq.	6,35	6,35	6,02	3,42	1,46

Fonte: Elaborado pela autora

De maneira detalhada, na Tabela 17, é possível visualizar a pegada de carbono na fase produtiva do cultivo de café ao longo das 5 safras analisadas para cada fazenda. A média produtiva ao longo de 5 anos para todas as fazendas foi de 4,13 kg de CO₂ eq / kg café verde. A fazenda AP Família é a que apresentou menor impacto, 1,63 kg de CO₂ eq./kg de café. A AP Família é uma das menores áreas entre as 5 fazendas, além de ser a fazenda com maior detalhamento de informações como uso de fertilizantes nitrogenados, orgânicos (casca de café), inseticidas e foliares.

Tabela 17 – Pegada de carbono das fazendas do sistema multipráticas conservacionistas durante a fase produtiva do café para os 5 anos analisados

Safra	Unidade	AP I	AP II	AP III	AP Curimba	AP Família
2016	kg CO ₂ eq.	3,99	3,45	4,72	3,08	1,45
2017	kg CO ₂ eq.	5,95	3,52	3,01	1,01	0,05
2018	kg CO ₂ eq.	5,51	7,36	5,56	4,13	1,63
2019	kg CO ₂ eq.	5,08	6,53	7,07	2,72	1,63
2020	kg CO ₂ eq.	6,53	7,07	6,71	3,81	1,63

Fonte: Elaborada pela autora

Na Figura 11 é possível observar que para cada kg de café colhido a pegada de carbono para cada fazenda foi: AP I 5,51 kg CO₂ eq, AP II 6,53 kg

CO₂ eq, AP III 5,56 kg CO₂ eq AP Curimba 3,08 e a AP Família 1,63 kg CO₂ eq. Neste manejo de multipráticas conservacionista, a média geral produtiva ao longo de 5 anos para todas as fazendas foi de 4,13 kg CO₂ eq./ kg de café produzido.

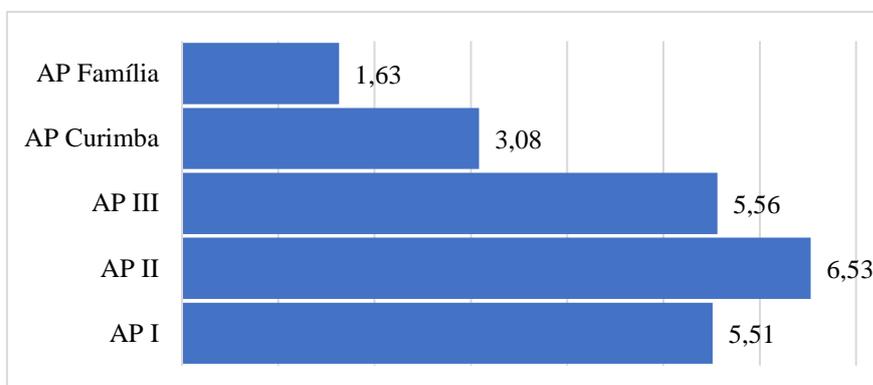


Figura 11: Média de pegada de carbono para cada fazenda ao longo de 5 anos (kg CO₂ eq./ kg café).

Fonte: Elaborado pela autora

3.1 Resultado do inventário (entradas e saídas)

Todas as entradas e saídas calculadas para as etapas agrícolas, implantação e produção, bem como as emissões de GEE calculadas para o café são apresentadas nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 - Entradas e saídas da etapa de implantação do cafezal no sistema multipráticas conservacionistas

Atividade	Unidade	Montante
Entradas		
Calcário Dolomítico	t/ha ⁻¹	8
Gesso	t/ha ⁻¹	22
N	kg/ha ⁻¹	0,59
P ₂ O ₅	kg/ha ⁻¹	0,57
K ₂ O	kg/ha ⁻¹	0,16
Herbicida	l/ha ⁻¹	0,00
Inseticida	l/ha ⁻¹	5,50
Inseticida	kg/ha ⁻¹	1,13
Fungicida	l/ha ⁻¹	0,07
Fungicida	lg/ha ⁻¹	0,484
Foliar	L/ha ⁻¹	10,16
Foliar	kg/ha ⁻¹	19,53
Quantidade de Tanques	l/unid	2,365
Água	l/ha ⁻¹	3.144
Mudas	unid	8800
Diesel	kg	266,62
Saídas		
N ₂ O direto	kg /há ⁻¹	9,36E-03
N ₂ O-N indireto	kg /há ⁻¹	0,0009

N ₂ O-N lixiviação	kg /há ⁻¹	0,0102
CO ₂ de calcário	t /ha ⁻¹	3,8133
CO ₂ de ureia	t /ha ⁻¹	0,176
Fósforo	kg/ ha	86,922
HC	kg	348,5
NOx	kg	5106
CO	kg	631,6
Dióxido de carbono (CO ₂)	kg	8,19E+05
Dióxido sulfúrico (SO ₂)	kg	2,65E+02
Metano (CH ₄)	kg	3,38E+01
Óxido nitroso (N ₂ O)	kg	3,15E+01
Amônia (NH ₃)	kg	5,25E+00
NH ₃ do fertilizante	kg	3,79E-02
NOx do fertilizante	kg	9,97E+00

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 19 - Entradas e saídas da etapa de produção do cafezal nas 5 fazendas no sistema multipráticas conservacionistas

Atividades	Unid.	2015-16	2016-17	2017-18	2018-19	2019-20
Entradas						
Fertilizante sintético	kg/ha	149,67	185,62	197,83	183,82	229,42
Fertilizante orgânico	kg/ha	0	94,93	82,49	211,43	40,54
foliar	kg/ha	0	105	28	0	0
Inseticida	kg/ha	0	0	0	0	0
N orgânico	kg/ha	0	2,37	2,06	5,28	1,01
N sintético	kg/ha	27,79	31,36	30,33	29,06	17,78
P ₂ O ₅	kg/ha	4,63	0,207	5,07	2,48	1,06
K ₂ O	kg/ha	22,01	19,70	26,74	20,10	16,83
Diesel fertilizante	kg/ha	471	169,09	660,99	666,12	742,98
Diesel fert. foliar	kg/ha	0	164,99	71,73	0	0
Diesel inseticida	kg/ha	0	61,48	0	0	0
Diesel	kg/ha	471,04	395,57	732,73	666,12	742,98
Saídas						
N ₂ O direto	kg/ha	147,18	178,69	172,59	186,23	101,89
N ₂ O volatilizado	kg/ha	8,75	2,57	12,71	24,76	2,29
N ₂ O volatilizado orgânico	kg/ha	0	1,32	1,15	3,01	0,57
N ₂ O lixiviado	kg/ha	21,93	0	39,50	31,58	23,99
CO ₂ de ureia	kg/ha	0	0	0	0,16	0
Fosforo	kg	345,71	365,46	385,22	385,22	414,85
HC	kg	0,92	0,772	1,43	1,3	1,45
NOx	kg	14,16	10,07	21,44	20,02	22,33
CO	kg	1,288	1,080	2,002	1,82	2,03
CO ₂ diesel	kg	1470,0	1234,18	2286,12	2078,29	2318,09
SO ₂ diesel	kg	0,476	0,399	0,7400	0,672	0,750
CH ₄ diesel	kg	0,060	0,051	0,0945	0,085	0,095
N ₂ O diesel	kg	0,056	0,047	0,0879	0,079	0,089
NH ₃ diesel	kg/ha	0,009	0,0079	0,0146	0,013	0,0148

Fonte: Elaborado pela autora

Ademais, podemos observar nas Tabelas 20 a 24 uma série de emissões de CO_{2eq}. das atividades das fazendas em estudo, em referência às safras 2015-2016, 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 e 2019-2020.

Tabela 20 – Emissões de CO₂ equivalente das saídas das atividades das fazendas do sistema multipráticas conservacionistas do ano safra 2015-2016

	Unidade	API	APII	APIII	AP Curimba	AP Família
CO _{2eq} transporte	kg/ha	3,35	0,69	0,80	4,97	-
CO _{2eq} N fertilizante	kg/ha	195,38	213,16	231,27	237,50	269,48
CO _{2eq} P fertilizante	kg/ha	9,04	16,52	20,52	19,69	26,43
CO _{2eq} K fertilizante	kg/ha	22,41	40,96	50,89	48,83	65,54
CO _{2eq} diesel	kg/ha	1,32	1,14	1,25	1,36	1,28
CO _{2eq} de N ₂ O direto	kg/ha	195,04	212,80	230,87	237,09	269,01
CO _{2eq} N ₂ O volatili.	kg/ha	11,24	12,13	14,03	14,82	15,92
CO _{2eq} N ₂ O volatili. org.	kg/ha	-	-	-	-	-
CO _{2eq} N lixiviado	kg/ha	27,29	29,11	35,88	38,92	39,69
CO _{2eq} diesel	kg/ha	8,79	7,59	8,31	9,06	8,53
CO _{2eq} CH ₄	kg/ha	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CO _{2eq} de N ₂ O	kg/ha	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09
CO _{2eq} da fazenda	kg/ha	2.370	2.671	2.970	3.062	3.480

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 21 – Emissões de CO₂ equivalente das saídas das atividades das fazendas do sistema multipráticas conservacionistas do ano safra 2016-2017

	Unidade	API	APII	APIII	AP Curimba	AP Família
CO _{2eq} transporte	kg/ha	5,11	0,80	0,87	5,62	-
CO _{2eq} N fertilizante	kg/ha	233,73	221,84	247,43	262,70	227,04
CO _{2eq} P fertilizante	kg/ha	3,40	-	-	-	-
CO _{2eq} K fertilizante	kg/ha	43,24	45,41	25,99	33,73	28,41
CO _{2eq} diesel	kg/ha	1,97	0,93	0,80	0,45	0,45
CO _{2eq} de N ₂ O direto	kg/ha	254,15	271,42	247,01	262,25	226,65
CO _{2eq} N ₂ O volatili.	kg/ha	2,43	4,39	4,14	3,65	3,24
CO _{2eq} N ₂ O volatili. org.	kg/ha	2,19	5,25	-	-	-
CO _{2eq} N lixiviado	kg/ha	-	-	-	-	-
CO _{2eq} diesel	kg/ha	13,11	6,20	5,31	2,98	2,98
CO _{2eq} CH ₄	kg/ha	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
CO _{2eq} N ₂ O	kg/ha	0	0,06	0,05	0,03	0,03
CO _{2eq} da fazenda	kg/ha	2.797	2.782	2.658	2.857,13	2.444

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 22 – Emissões de CO₂ equivalente das saídas das atividades das fazendas do sistema multipráticas conservacionistas do ano safra 2017-2018

	Unidade	API	APII	APIII	AP Curimba	AP Família
CO _{2eq} transporte	kg/ha	2,33	1,97	0,87	5,72	-
CO _{2eq} N fertilizante	kg/ha	219,98	224,67	247,43	238,02	237,77
CO _{2eq} P fertilizante	kg/ha	17,14	18,28	-	17,49	23,32
CO _{2eq} K fertilizante	kg/ha	47,17	47,02	25,99	43,37	57,83
CO _{2eq} diesel	kg/ha	1,76	1,77	0,80	1,83	1,44
CO _{2eq} de N ₂ O direto	kg/ha	234,55	229,68	247,01	237,61	237,36
CO _{2eq} N ₂ O volatili.	kg/ha	17,28	17,70	4,14	18,36	19,61
CO _{2eq} N ₂ O volatili. org.	kg/ha	1,57	0,57	-	-	-
CO _{2eq} N lixiviado	kg/ha	53,69	55,11	-	56,46	62,66
CO _{2eq} diesel	kg/ha	11,72	11,79	5,31	12,15	9,59
CO _{2eq} CH ₄	kg/ha	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CO _{2eq} N ₂ O	kg/ha	0,12	0,12	0,05	0,12	0,10
CO _{2eq} da fazenda	kg/ha	3.037	3.044	2.658	3.156	3.248

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 23 – Emissões de CO₂ equivalente das saídas das atividades das fazendas do sistema multipráticas conservacionistas do ano safra 2018-2019

	Unidade	API	APII	APIII	AP Curimba	AP Família
CO _{2eq} transporte	kg/ha	2,10	0,80	2,10	4,00	-
CO _{2eq} N fertilizante	kg/ha	214,48	212,74	207,30	178,82	240,28
CO _{2eq} P fertilizante	kg/ha	8,54	0,35	19,39	-	-
CO _{2eq} K fertilizante	kg/ha	36,09	28,77	37,64	30,10	18,26
CO _{2eq} diesel	kg/ha	1,60	1,73	1,53	1,20	1,44
CO _{2eq} N direto	kg/ha	253,08	212,38	262,06	178,51	239,86
CO _{2eq} N volatili.	kg/ha	33,66	83,83	15,46	12,31	15,83
CO _{2eq} N volatili. org.	kg/ha	4,09	-	5,79	-	-
CO _{2eq} N lixiviado	kg/ha	42,92	45,18	38,43	35,03	43,54
CO _{2eq} diesel	kg/ha	10,66	11,51	10,16	7,99	9,59
CO _{2eq} CH ₄	kg/ha	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CO _{2eq} N ₂ O	kg/ha	0,11	0,12	0,10	0,08	0,10
CO _{2eq} da fazenda	kg/ha	3.036,72	2.987,11	2.999,87	2.240,27	2.844,56

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 24 – Emissões de CO₂ equivalente das saídas das atividades das fazendas do sistema multipráticas conservacionistas do ano safra 2019-2020

	Unidade	API	APII	APIII	AP Curimba	AP Família
CO _{2eq} transporte	kg/ha	2,75	1,84	0,99	6,04	-
CO _{2eq} N fertilizante	kg/ha	121,85	127,73	125,03	122,43	131,40
CO _{2eq} P fertilizante	kg/ha	3,41	2,71	3,39	2,33	-
CO _{2eq} K fertilizante	kg/ha	28,05	31,40	30,41	25,31	31,96
CO _{2eq} diesel	kg/ha	1,66	1,64	1,62	1,68	1,44
CO _{2eq} de N ₂ O direto	kg/ha	128,58	136,91	124,82	122,22	131,18
CO _{2eq} N ₂ O volatili.	kg/ha	2,90	2,42	0,45	3,47	-
CO _{2eq} N ₂ O volatili. org.	kg/ha	0,73	0,99	-	-	-
CO _{2eq} N lixiviado	kg/ha	30,27	31,44	28,96	32,27	34,63
CO _{2eq} diesel	kg/ha	11,04	10,93	10,75	11,19	9,59
CO _{2eq} CH ₄	kg/ha	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CO _{2eq} N ₂ O	kg/ha	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10
CO _{2eq} da fazenda	kg/ha	1.656,86	1.740,04	1.633,31	1.634,03	1.701,94

Fonte: Elaborado pela autora

4. Discussão

4.1 Gases de Efeito Estufa (GEE)

Dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) são os principais GEE (XING et al., 2016). É preciso compreender a relevância dos GEE sem ignorar que, segundo Johnston et al (2004), até meados do ano de 2004 pouco se sabia ao certo quais efeitos que os GEE teriam nas reservas de carbono do solo, ou como as mudanças climáticas afetariam o ciclo global do carbono. Os sistemas de produção agrícola são conhecidos por impactar o clima ao emitir GEE (FOLEY et al., 2011).

O maior reservatório de C nos ecossistemas terrestres é o solo. Cerca de um terço do C orgânico do solo ocorre em florestas, outro terço está em pastagens e savanas, e o restante está em pântanos, lavouras e outros biomas (JANZEN, 2004). A agricultura que emprega boas práticas de conservação do solo contribui beneficentemente para a redução de GEE através da promoção de serviços ecossistêmicos, por meio da estocagem de carbono no solo (GALEGO; FERREIRA; CARDUCCI, 2022; MARTINELLI et al., 2023).

Para tanto, pequenas mudanças no equilíbrio entre o armazenamento e a liberação de carbono, abaixo do solo, podem ter grandes impactos nos GEE. A

fauna do solo, raízes, fungos e micróbios interagem com a matéria mineral e orgânica para processar o carbono do solo (JOHNSTON et al, 2004). Através das práticas tradicionalmente realizadas em áreas de cultivo, tanto no Brasil como em outras regiões do mundo, é possível compreender o funcionamento e as alterações de CO₂ ao longo do tempo (CERRI et al., 2017).

Em específico no sistema multipráticas conservacionistas pode-se citar a fase de implantação, que possui uma alta dosagem de gesso na área e é visto como um diferencial, pois apenas o manejo conservacionista faz adição desse insumo. A incorporação de gesso é uma solução para os problemas relacionados a escassez de água para as plantas, particularmente na região dos Cerrados, além de potencializar o crescimento do sistema radicular (SERAFIM et al., 2011). Dessa forma, esse insumo pode ser um dos componentes responsáveis pelo aumento do rendimento produtivo.

Levando em consideração o uso de gesso, que auxilia no sistema radicular da planta, e conseqüentemente no armazenamento de água, alguns estudos como Nicholls et al. (2007), Rode et al. (2016) e Cerri et al. (2017) abordam que quando um café está na camada 0-30 cm, os estoques de C ficaram entre 0,0000874, 0,0000864 e 0,0000721 Kg/C/ha⁻¹. Considerando o perfil até 100 cm de profundidade, os estoques de C para as mesmas regiões totalizaram 0,0001608, 0,0001865 e 0,0001929 Kg C ha⁻¹. Para esses mesmos autores, pode-se afirmar que os resultados obtidos são superiores aos obtidos por outros como Andrea et al. (2004), que avaliando um Latossolo Vermelho Distrófico de textura média, localizado no sul de Goiás, obtiveram para uma pastagem de *Brachiaria decumbes* Stapf, de 15 anos, o estoque de 0,00006986 Kg C ha⁻¹ na camada de 0-40 cm. Neves et al. (2004) relataram o estoque de C de aproximadamente 0,000052 Kg C ha⁻¹ para a camada de 0-40 cm de uma pastagem convencional, cultivada em Latossolo Distrófico típico (textura muito argilosa), no noroeste mineiro.

Para Cerri et al. (2017), quando existe a conversão de um sistema nativo em pastagem, pode ocorrer inicialmente uma redução do estoque de C do solo, mas não perda total, desde que sejam implementadas culturas regenerativas em conjunto, como por exemplo, as gramíneas, que faz com que esse estoque seja restabelecido em níveis próximos aos da vegetação nativa. Isso ocorre porque o

sistema radicular das gramíneas, que se propaga em todo o volume da camada mais superficial do solo, é renovado continuamente (CERRI et al., 2017).

As fazendas de sistema Multipráticas conservacionistas utilizam a *Brachiaria* nas linhas do cafezal, retendo mais carbono no solo, como os demais nutrientes e não permitindo erosões; portanto, essa adoção de boas práticas agrícolas com o manejo adequado de podas e controle do mato, propicia a manutenção dos estoques de carbono e nitrogênio no solo, fazendo com que a cafeicultura reflita positivamente na saúde do solo.

Segundo Souza et al. (2023), no Brasil cerca de 4,5 milhões de toneladas de N são aplicadas por ano nos cafezais. Aproximadamente 80% desse N é aplicado na forma de ureia, o que corresponde a 3,6 milhões de toneladas de N por ano. Para uma perda representativa de N-NH₃ por volatilização e de 30% da ureia convencional. São emitidos para a atmosfera cerca de 1,08 milhão de toneladas de amônia por ano, o que pode ser mitigado com o uso de tecnologias adequadas.

Neste ponto, podemos observar que no sistema multipráticas conservacionistas não houve emissão de CO₂ de ureia na fase produtiva, apenas na fase de implantação com valor correspondente de 0,176 t /ha⁻¹. Parte considerável dos cafeicultores do Brasil têm usado doses de N (da ordem de 600 – 800 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) muito acima daquelas aplicadas em outras áreas produtoras de café (150–450 kg N ha⁻¹ ano⁻¹) (FAO, 2010). Por outro lado, o adubo Producode - utilizado no sistema da fazenda em estudo - apresenta apenas 39% de N, de modo a não volatilizar suficientemente a fim de impactar no resultado das emissões anuais de CO₂ eq oriundo da aplicação de ureia (MOLIN, 2016).

4.2 Pegada de carbono

Os impactos ambientais indiretos muitas vezes não são considerados nas avaliações ambientais. Na Pegada de Carbono, por exemplo, há dificuldades em se quantificar a quantidade de carbono equivalente emitido (NAB e MASLIN, 2020). Além disso, diferentes práticas agrícolas demonstram distintos perfis ambientais. De mais a mais, a quantidade de agrotóxicos está diretamente relacionada às práticas agrícolas como rotações de cultura, preparo de solo, densidade de plantas, dentre outras (COLTRO et al., 2006).

Assim, a pegada de carbono da produção agrícola em todo o ciclo de vida de uma cultura pode fornecer informações sobre a contribuição desta fase agrícola para as mudanças climáticas e, também, ajudar a identificar possíveis opções de mitigação de gases de efeito estufa (CHENG et al., 2015). ACVs anteriores para o café produziram estimativas muito variadas da pegada de carbono durante a produção, com valores variando entre 3,7 a 15,8 kg CO₂eq /kg de café verde (NAB e MASLIN, 2020).

A pegada de carbono média do café no Vietnã, por exemplo, foi calculada como 15,33 kg CO₂ eq de café verde para a produção de café convencional e 3,51 kg CO₂eq para a produção mais sustentável de café. A redução de 77% na pegada de carbono para a produção mais sustentável de café, em comparação com a produção convencional, ocorre devido à exportação de grãos, via carga aérea, e à redução no uso de insumos agroquímicos (NAB e MASLIN, 2020).

Portanto, denota-se que sistemas de manejo que empregam práticas de conservação ao solo como a cobertura vegetal, não revolvimento mínimo, terracimento, rotação de culturas, culturas em faixas (diversificação de culturas), sistemas integrados de produção, entre outras, podem elevar o conteúdo de resíduos depositados sobre a superfície do solo, com diferentes taxas de decomposição, exemplos que o sistema multipráticas conservacionistas já seguem. Evidencia-se assim, que esse sistema possui efeitos benéficos no sequestro de carbono em profundidade, além da formação de bioporos, que atuam na melhoria da dinâmica água – ar do solo, funcionando como sítios ou “pool” de sequestro de carbono, pela atividade biológica (bioporos se tornam um habitat). Ademais, também proporciona a formação de caminhos para novas raízes da planta, ou seja, minimiza algum grau de compactação do solo (GALEGO; FERREIRA; CARDUCCI, 2022).

A mensuração do estoque de carbono na atividade agrícola tem despertado o interesse por parte dos *stakeholders*, dada sua relevância para a mitigação dos impactos nas mudanças climáticas, pois em função das elevadas taxas de crescimento e produtividade das plantas no sistema estudado, essas promovem um considerável sequestro de carbono. (BARRANTES, 2016).

4.3 Economia Circular

Na perspectiva de uma Economia Circular, observa-se que o uso sustentável do nitrogênio beneficia não apenas a EC, mas também a saúde

pública e o meio ambiente (KURNIAWAN et al., 2023), afinal, o nitrogênio faz parte da composição de várias misturas de fertilizantes, além da própria ureia (EMBRAPA, 2018). As emissões em termos de acidificação terrestre e de esgotamento de recursos minerais devem-se, principalmente, ao uso de fertilizantes nitrogenados (DE MARCO; RIEMMA; IANNONE, 2018). No caso da ureia, a sua molécula pura contém 46,67% de nitrogênio em sua composição (EMBRAPA, 2018), desta forma a alta concentração de N na sua composição faz com que tenha o menor custo por unidade de N quando comparada aos demais fertilizantes nitrogenados. Isso faz com que a ureia seja o fertilizante nitrogenado mais utilizado nas adubações.

Para a agricultura atingir a produtividade máxima com aportes reduzidos de fertilizantes nitrogenados é um imenso desafio. A distribuição ideal da adubação nitrogenada, fortemente ligada ao estágio específico de demanda de N da planta, é uma das lacunas do conhecimento para diversas culturas, e através das práticas de EC, como as multipráticas conservacionistas, pode-se evidenciar a reincorporação de N no processo produtivo.

Além disso, é preciso salientar que quando os produtos chegam ao fim de suas vidas, ainda há os materiais remanescentes. Reaproveitar, reparar ou reciclar pode devolvê-los ao uso ativo, criando um ciclo tecnológico que, de certa forma, é paralelo aos ciclos de carbono, nitrogênio e hidrológico da biosfera (ASHBY, 2024) e segue uma EC no solo.

Na aplicação convencional de um estudo de ACV, por si só os resíduos associados a um produto não seriam considerados como relevantes em relação ao impacto ambiental. Em vez disso, as emissões e os usos de recursos causados pelo tratamento de resíduos estariam classificados como outras emissões e usos de recursos (WERNET et al., 2016) (LAURENTI; DEMIRER; FINNVEDEN, 2023)

Se por um lado as ferramentas da ACV se concentram na avaliação de impacto e, em última análise, na eficiência de recursos, por outro a EC se concentra em princípios que são principalmente orientados para a eficácia dos recursos. Existem, portanto, oportunidades para uma complementaridade entre as abordagens estudadas e até aqui apresentadas (BEAULIEU; DURME; ARPIN, 2016).

Parte considerável do total de resíduos orgânicos, associados a um produto, podem ser gerados antes mesmo de o produto chegar aos consumidores, por exemplo, durante a extração de recursos, transporte, produção de combustível e eletricidade e processos de fabricação (LAURENTI et al., 2017). Desse modo, ao se adotar uma perspectiva de ciclo de vida e se medir esse resíduo “invisível” e comunicar uma pegada de resíduos (C e N) numa fronteira do berço ao túmulo, percebe-se que toda essa fase foi negligenciada pelos indicadores da EC (HARRIS et al., 2020).

Outro fator importante a ser denotado é a sinergia existente entre o armazenamento de carbono orgânico no solo e o armazenamento de carbono no cafeeiro, que pode ser impulsionada por uma combinação de maior atividade microbiana, maior liberação de nutrientes no solo e maior infiltração de água, contribuindo para maior qualidade do solo (MAYORGA et al., 2022).

Portanto, verifica-se que sistemas integrados de agricultura levam a uma melhor qualidade alimentar e ambiental, mas esses sistemas são complexos e devem ser avaliados em experimentos de longo prazo. Sistemas de plantio direto de longo prazo com diferentes plantas de cobertura promovem alterações nas propriedades químicas e microbiológicas do solo (DOS SANTOS SOARES, et al, 2019).

5. Conclusão

O café, seja como grão ou bebida, circula pelos diversos elos da cadeia produtiva, como, por exemplo, desde sua produção na forma de grão até seu consumo na forma de bebida; assim, é preciso analisá-lo, a fim de se observar a sua circularidade e como esta ocorre.

Apesar da importância do Brasil como produtor e consumidor do café, poucos trabalhos analisaram o desempenho ambiental de sua etapa agrícola como matéria-prima para sistemas alimentícios ou produtos industriais. Como o Brasil tem uma área extensa e muitas diferenças de solo, clima, práticas de manejo de culturas e outras condições culturais, as peculiaridades dos manejos de cafezais devem ser consideradas e há carência de estudos regionalizados do café com ACV.

Assim sendo, o presente estudo teve como objetivo desenvolver o inventário do ciclo de vida e calcular a pegada de carbono de cafezais manejados

sob práticas conservacionistas, à luz da economia circular e, assim, foi possível notar que o sistema está no caminho para uma circularidade, através da mensuração da emissão de carbono, embora seja preciso analisar outras esferas ambientais e até mesmo sociais, para que um sistema possa ser considerado 100% circular.

Embora tenha sido pouco evidente é preciso existir mais cumplicidade de transação para demonstrar maiores benefícios circular entre as fazendas. Acredita-se que com mais detalhamento dos dados - como tração animal das fazendas, dados de outros maquinários que possam ser usados e que não tenham sido contemplados nesse estudo, como utilização de motocicletas, gasolina, ou até mesmo, automóveis para o deslocamento de itens, como mão de obra – é possível influenciar uma mitigação dos impactos ambientais, derivados de uma maior sinergia, para podermos, assim, quantificar melhor a circularidade, dentro dessas propriedades agrícolas.

A maioria das métricas de circularidade visa capturar a circularidade dos fluxos de recursos, embora falhe em considerar simultaneamente o período, durante o qual um recurso está em uso. Para se avaliar o nível de circularidade na agricultura não se pode ter apenas como base uma orientação útil na definição de metas adequadas, mas é preciso também indicar, principalmente, as áreas em que esse nível é mais ou menos desenvolvido (ROCCHI et al. 2021; VELASCO-MUÑOZ et al. 2021). Para a autora dessa tese, alcançar a eficiência em modelos de agricultura circular inclui otimizar processos para minimizar o uso de recursos, evitando desperdícios.

Por enquanto, apenas a EC, de forma isolada, não se sustenta, enquanto método científico. Da forma como é apresentada e pelas leituras das publicações científicas, a EC ainda é uma possibilidade a ser implementada. Assim, a EC ainda carece de métodos e ferramentas para se auto justificar. Sob essa condição, é válido nos indagarmos: até que ponto a EC em conjunto com a ACV não é um meio para se vislumbrar a circularidade? A ACV é, atualmente, a ferramenta que dá suporte a grande parte das tomadas de decisões, principalmente, na economia circular biológica.

Por fim, trago o estudo de Stillitano et al. (2021), que apresentam a terminologia de "ACV circular", que poderia ser uma alternativa a ser abarcada, pois cada vez mais se constroem inventários detalhados do ciclo de vida dos

produtos, podendo juntamente com os pontos considerados “chaves” da EC, evidenciar a sustentabilidade, cada vez mais almejada. Vale ressaltar, porém, que essa introdução de estratégias circulares, mesmo que inconsciente ou de forma simples, da forma como a fazenda estudada busca introduzi-las, está trazendo benefícios tanto para o consumo de recursos quanto para as mudanças climáticas.

Muito embora esse conhecimento e implementação da EC esteja em crescimento, ainda demanda que as informações ao longo da cadeia cafeicultora estejam mais interconectadas e globalizadas, pois, assim, teremos cadeias de suprimentos abrangendo continentes e ocasionando mudanças transformadoras de um modelo linear de produção para uma EC.

Mapear as interações entre o comércio e as áreas políticas relevantes da economia circular, investir na rastreabilidade dos produtos e na transparência das informações, apoiar ainda mais o comércio de serviços e o comércio de alimentos, cultivados de forma regenerativa, serão etapas necessárias nessa transformação mais ampla. À medida que as regras e os padrões de comércio global contribuem para determinar em que tipo de mundo vivemos, alinhar as políticas comerciais com os resultados da EC será uma peça fundamental nesta questão.

Ressalta-se que nesta tese, não se realizaram comparações com outros estudos existentes, considerando que as bases de dados utilizadas pelos estudos precisariam ser iguais e, até o momento, não se encontrou equivalência entre as bases de dados disponíveis, que permitissem a comparação quantitativa adequada para os objetivos do trabalho. Outra observação é o fato de poucos trabalhos na literatura apresentarem seus conjuntos de dados detalhados, impossibilitando a comparação das atividades, em diferentes regiões em nível de inventário.

Ficam aqui registrados, portanto, uma lacuna e um grande desafio, dentro da circularidade, que é amarrar os benefícios ambientais e sociais, inerentes aos sistemas e conseguir que eles sejam quantificados.

É imperioso destacar ainda, como um ponto relevante na centralidade desta tese, que a temática apresentada tem se tornado foco de discussão mundial, visto que a EC está sendo cada vez mais reconhecida como um

imperativo para as empresas de manufatura apoiarem a transição para uma sociedade sustentável e de carbono zero.

Referências

ASHBY, Michael F. Chapter 10 - Circular Materials Economics. **Materials and Sustainable Development** (Second Edition). Pages 255-295, 2024.

BARRANTES, L. D. E. S. Biomassa Florestal Com Finalidades Energéticas No Brasil: Caso De Itapeva Brasil: Caso De Itapeva. **Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba**, 2016.

BARCELOS, S. M. B. D. et al. Circularity of Brazilian silk: Promoting a circular bioeconomy in the production of silk cocoons. **Journal of Environmental Management**, v. 296, n. April, p. 113373, 2021.

BEAULIEU, L.; DURME, G. VAN; ARPIN, M.-L. Circular Economy: A Critical Literature Review of Concepts. **Circular Economy Working Group**, n. January, 2016.

CERRI, C. C. et al. ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO DEVIDO A MUDANÇA DO USO Cerri, C. C. et al. DA TERRA EM ÁREAS DE CULTIVO DE CAFÉ EM MINAS GERAIS. **Coffee Science**, v. 12, p. 30–41, 2017.

CHAIN, C. P. et al. Aglomerações produtivas na indústria do café em Minas Gerais. *Gestão & Regionalidade*, v. 32, n. 94, 2016.

CHENG, K. et al. Carbon footprint of crop production in China: an analysis of National Statistics data. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 422-431, 2015.

COLTRO, Leda et al. Environmental profile of Brazilian green coffee (6 pp). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, p. 16-21, 2006.

DE MARCO, I.; RIEMMA, S.; IANNONE, R. Life cycle assessment of supercritical CO₂ extraction of caffeine from coffee beans. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 133, n. November 2017, p. 393–400, 2018.

DOS SANTOS SOARES, Daiane et al. How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104316, 2019.

DO, T. T. H. et al. A new integrated circular economy index and a combined method for optimization of wood production chain considering carbon neutrality. **Chemosphere**, v. 311, n. P2, p. 137029, 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Acompanhamento da safra brasileira, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/73940564/producao-de-cafe-arabica-corresponde-a-64-e-cafe-conilon-a-36-da-safra-total-dos-cafes-do-brasil-em2022>. Acesso em: 30 maio. 2023

FLYNN, K. C. et al. Manureshed management to overcome longstanding nutrient imbalances in US agriculture. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 188,

n. March 2022, p. 106632, 2023.

GALEGO, Joyce Castro Xavier; FERREIRA, Rafael Costa; CARDUCCI, Carla Eloize. Sequestro de carbono de um latossolo caulínico sob cultivo de linhaça em manejo conservacionista. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 3, n. 4, p. e341324-e341324, 2022.

GONCALVES, N. et al. Potential economic impact of carbon sequestration in coffee agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 2, p. 419–430, 2021.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Climate Food Security in Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>. Acesso em: 20 jun. 2023

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems - A soil science perspective. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, n. 3, p. 399–417, 2004.

KHAN, M. A.-A. et al. Optimal circular economy index policy in a production system with carbon emissions. **Expert Systems With Applications**, v. 212, n. July 2022, 2023a.

KURNIAWAN, T. A. et al. From liquid waste to mineral fertilizer: Recovery, recycle and reuse of high-value macro-nutrients from landfill leachate to contribute to circular economy, food security , and carbon neutrality. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 170, n. December 2022, p. 791–807, 2023.

LAURENTI, R.; DEMIRER, D.; FINNVEDEN, G. Analyzing the relationship between product waste footprints and environmental damage – A life cycle analysis of 1, 400 + products. **Science of the Total Environment**, v. 859, n. May 2022, 2023.

LAZZERINI, G. et al. Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration from Conventional and Organic Olive Tree Nurseries in Tuscany, Italy. **Sustainability**, 2022.

MAYORGA, I. et al. Tradeoffs and synergies among ecosystem services, biodiversity conservation, and food production in coffee agroforestry. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, n. August, p. 1–15, 2022.

NAB, Carmen; MASLIN, Mark. Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam conventional and sustainable coffee production and export to the United Kingdom. **Geo: Geography and Environment**, v. 7, n. 2, p. e00096, 2020.

NICHOLLS, P. H. et al. Economical analysis of cultivation systems with *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (Parica) and *Ananas comosus* ar. *erectifolius* (L. B. Smith) Coppus & Leal (Curaua) crop at Aurora do Pará, Brazil [Análise econômica dos sist. **Environmental Conservation**, v. 18, n. 1, p. 250–256, 2007.

RAMOS, B. Z. et al. Doses de gesso em cafeeiro: Influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um latossolo vermelho

distrófico. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1018–1026, 2013.

ROCCHI, L. et al. Measuring circularity: an application of modified Material Circularity Indicator to agricultural systems. **Agricultural and Food Economics**, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2021.

RODE, R. et al. Protecting habitats in low-intensity tropical farmland using carbon-based payments for ecosystem services. **Floresta**, v. 17, n. 1, p. 311–336, 2016.

SERAFIM, M. E.; DE OLIVEIRA, G. C.; DE OLIVEIRA, A. S.; DE LIMA, J. M.; GUIMARÃES, P. T. G.; COSTA, J. C. Sistema conservacionista e de manejo intensivo do solo no cultivo de cafeeiros na região do Alto São Francisco, MG: estudo de caso. *Bioscience Journal*, v. 27, n.6, 2011.

SMITH, P.; HABERL, H.; POPP, A.; ERB, K.; LAUK, C.; HARPER, R.; ROSE, S. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? *Global Change Biology*, v.19, n.8, p. 2285–2302, 2013. doi:10.1111/gcb.12160.

STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTRÖM, J.; CORNELL, S. E.; FETZER, I.; BENNETT, E. M.; BIGGS R.; CARPENTER, S. R.; DE VRIES, W.; DE WIT, C. A.; FOLKE, C.; GERTEN, D.; HEINKE, J.; MACE, G. M.; PERSSON, L. M, RAMANATHAN, V, REYERS, B, SÖRLIN, S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*. v. 347, n. 6223, 2015. doi: 10.1126/science.1259855

VELASCO-MUÑOZ, Juan F. et al. Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, p. 105618, 2021.

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fica nítido que nesta tese que a EC não é algo tangível pois assemelha-se mais a um aspecto ou um segmento que a indústria em geral anseia utilizar como justificativa de boas práticas. A EC transcende as linhas inimagináveis da sustentabilidade, e quando abordada nas questões de solo, não são apenas as abordagens físicas e químicas que ganham espaço de estudo, é preciso e requerido, conhecimento biológico, afinal, para garantir um nitrogênio adequado e um estoque de carbono no solo, é preciso entrelaçar os diversos elementos da sustentabilidade.

Para uma agricultura sustentável é preciso gerenciar os agroecossistemas de modo a manter a diversidade biológica, a capacidade de regeneração, a vitalidade, a produtividade e a capacidade de cumprir importantes funções ecológicas, econômicas e sociais nos níveis local, nacional e global, sem prejudicar o ecossistema.

A cafeicultura tem uma oportunidade única de oportunizar, por meio das diferentes práticas de manejo, os direcionamentos que podem levar uma variedade de resultados em segurança alimentar, serviços ecossistêmicos e conservação da biodiversidade.

O aumento do rendimento da cultura por ha ou a substituição de fertilizantes químicos e bioestimulantes poderiam reduzir a pegada de carbono. Além disso, a biomassa de resíduos pode ser usada para produzir biometano, digestado que é o material remanescente após a digestão anaeróbica de uma matéria-prima biodegradável, bioestimulantes e biomateriais (RANA, BUX, LOMBARDI, 2023).

Portanto a relação entre a Economia Circular e a Avaliação do Ciclo de Vida é crucial para uma abordagem mais sustentável e eficiente na gestão de recursos e redução das emissões de GEE. A Economia Circular busca minimizar o desperdício e prolongar a vida útil dos produtos, enquanto a ACV quantifica o impacto ambiental, incluindo as emissões de GEE, ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos. Ao integrar essas abordagens, é possível identificar oportunidades para reduzir as emissões de GEE através da reutilização,

reciclagem e design de produtos mais eficientes. Dessa forma, a Economia Circular com base na ACV pode contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas e a sustentabilidade ambiental.

Referência geral.

ADA, E. et al. Analysis of barriers to circularity for agricultural cooperatives in the digitalization era. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2021.

ÅKERMAN, M.; HUMALISTO, N.; PITZEN, S. Material politics in the circular economy: The complicated journey from manure surplus to resource. **Geoforum**, v. 116, n. May, p. 73–80, 2020.

ALOBWEDE, E.; LEAKE, J. R.; PANDHAL, J. Circular economy fertilization: Testing micro and macro algal species as soil improvers and nutrient sources for crop production in greenhouse and field conditions. **Geoderma**, v. 334, p. 113–123, 2019.

ALTAMIRANO, Ana Manríquez. Pérez, Jorge Sierra. Muñoz, Pere. Gabarrell, Xavier. Analysis of urban agriculture solid waste in the frame of circular economy: Case study of tomato crop in integrated rooftop greenhouse. **Science of the Total Environment**. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139375>

AN, H.-Y. H. Y.; LI, C.-X. C. X. C.-X. Synthetic evaluation on the development of agricultural circular economy based on the principal component analysis: A case of Tailai County in Heilongjiang Province. **2009 International Conference on Management Science and Engineering - 16th Annual Conference Proceedings, ICMSE 2009**, p. 998–1003, 2009.

ASTOLFI, V. et al. Cellulolytic enzyme production from agricultural residues for biofuel purpose on circular economy approach. **BIOPROCESS AND BIOSYSTEMS ENGINEERING**, v. 42, n. 5, p. 677–685, 2019.

ATINKUT, H. B. et al. Cognition of agriculture waste and payments for a circular agriculture model in Central China. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–15, 2020.

AVRAAMIDOU, Styliani. Baratsas, Stefanos G. Tian, Yuhe. Pistikopoulos, Efstratios N. Circular Economy - A challenge and na opportunity for Process Systems Engineering. **Journal Computers and Chemical Engineering**. 133. (2020) <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106629>

AYER, J. E. B. et al. Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 45, n. 2, p. 180–191, 2015.

BARROS, Murillo Vetroni. Ferramenta para promover a ECem propriedades rurais. 2019. 105 f. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção** - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

BARCELOS, S. M. B. D. et al. Circularity of Brazilian silk: Promoting a circular bioeconomy in the production of silk cocoons. *Journal of Environmental Management*, v. 296, n. April, p. 113373, 2021. BEAULIEU, L.; DURME, G. VAN; ARPIN, M.-L. Circular Economy: A Critical Literature Review of Concepts. Circular Economy Working Group, n. January, 2016.

BARRANTES, L. D. E. S. Biomassa Florestal Com Finalidades Energéticas No Brasil: Caso De Itapeva Brasil: Caso De Itapeva. **Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba**, 2016.

BEKCHANOV, M.; MIRZABAEV, A. Circular economy of composting in Sri Lanka: Opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 1107–1119, 2018.

BORTOLINI, S. et al. Hermetia illucens (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121289, 2020.

BRUEL, A. et al. Linking Industrial Ecology and Ecological Economics: A Theoretical and Empirical Foundation for the Circular Economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 12–21, 2018.

CARELLA, F. et al. Thermal conversion of fish bones into fertilizers and biostimulants for plant growth-A low tech valorization process for the development of circular economy in least developed countries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104815, 2021.

CASAREJOS, F. et al. Rethinking packaging production and consumption vis-à-vis circular economy: A case study of compostable cassava starch-based material. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1019–1028, 2018.

CHEN, W. et al. The socio-economic impacts of introducing circular economy into Mediterranean rice production. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 273–283, 2019.

CHENG, K. et al. Carbon footprint of crop production in China: An analysis of National Statistics data. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 422–431, 2015.

COLLEY, T. A. et al. Using a gate-to-gate LCA to apply circular economy principles to a food processing SME. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119566, 2020.

COLTRO, L. et al. Environmental profile of Brazilian green coffee. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 1, p. 16–21, 2006.

CORVELLEC, H.; STOWELL, A. F.; JOHANSSON, N. Critiques of the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, p. 1–12, 2021.

DONIA, E.; MINEO, A. M.; SGROI, F. A methodological approach for assessing business investments in renewable resources from a circular economy perspective. **Land Use Policy**, v. 76, p. 823–827, 2018.

DUQUE-ACEVEDO, M. et al. The Management of Agricultural Waste Biomass in the Framework of Circular Economy and Bioeconomy: An Opportunity for Greenhouse Agriculture in Southeast Spain. **AGRONOMY-BASEL**, v. 10, n. 4, 2020.

EMBRAPA. **CONTROLE BIOLÓGICO DE PRAGAS DA AGRICULTURA**. [s.l.: s.n.].

- FERREIRA, J. V. R. Análise De Ciclo De Vida De Produtos. p. 80, 2004.
- FERRI, M. et al. From winery waste to bioactive compounds and new polymeric biocomposites: A contribution to the circular economy concept. **Journal of Advanced Research**, v. 24, p. 1–11, 2020.
- FEUDIS, M. DE et al. The importance of incorporating soil in the life cycle assessment procedure to improve the sustainability of agricultural management. **Catena**, v. 218, n. July, p. 106563, 2022.
- FLYNN, K. C. et al. Manureshed management to overcome longstanding nutrient imbalances in US agriculture. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 188, n. March 2022, p. 106632, 2023.
- FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; PICOLI, J. F. Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry - Brazil. **Sustainable Recycling Industries**, v. 1, p. 106-122, 2018
- GAROFALO, D. F. T. et al. Land-use change CO₂ emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. v. 364, n. June, 2022.
- GUOHUI, S.; YUNFENG, L. The Effect of Reinforcing the Concept of Circular Economy in West China Environmental Protection and Economic Development. **Procedia Environmental Sciences**, v. 12, p. 785–792, 2012.
- HOMRICH, A. S. et al. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 525–543, 2018.
- HUMBERT, S. et al. Life cycle assessment of spray dried soluble coffee and comparison with alternatives (drip filter and capsule espresso). **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 15, p. 1351–1358, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.011>.
- JØRGENSEN, M. S.; REMMEN, A. A Methodological Approach to Development of Circular Economy Options in Businesses. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 816–821, 2018.
- KHAN, M. A.-A. et al. Optimal circular economy index policy in a production system with carbon emissions. *Expert Systems With Applications*, v. 212, n. July 2022, 2023.
- KIRCHHERR, J. Resources, Conservation & Recycling Circular economy and growth: A critical review of “ post-growth ” circularity and a plea for a circular economy that grows. **Resources, Conservation & Recycling**, n. November, p. 106033, 2021.
- KOODUVALLI, K.; VAIDYA, U. K.; OZCAN, S. Life Cycle Assessment of Compostable Coffee Pods: A US University Based Case Study. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–24, 2020.
- KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37–46, 2018
- KTORI, R.; KAMATEROU, P.; ZABANIOTOU, A. Spent coffee grounds valorization through pyrolysis for energy and materials production in the concept of circular economy. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 14, Part 1, p. 27582–27588, 2018.
- LAZZERINI, G. et al. Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration

from Conventional and Organic Olive Tree Nurseries in Tuscany, Italy. sustainability, 2022.

LORD, R.; SAKRABANI, R. Ten-year legacy of organic carbon in non-agricultural (brownfield) soils restored using green waste compost exceeds 4 per mille per annum: Benefits and trade-offs of a circular economy approach. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 1057–1068, 2019.

MAHROOF, K. et al. Drone as a Service (DaaS) in promoting cleaner agricultural production and Circular Economy for ethical Sustainable Supply Chain development. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125522, 2021.

MANRIQUEZ-ALTAMIRANO, A. et al. Analysis of urban agriculture solid waste in the frame of circular economy: Case study of tomato crop in integrated rooftop greenhouse. **SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT**, v. 734, 2020.

MANRÍQUEZ-ALTAMIRANO, A. et al. Analysis of urban agriculture solid waste in the frame of circular economy: Case study of tomato crop in integrated rooftop greenhouse. **Science of The Total Environment**, v. 734, p. 139375, 2020.

MARTINEZ URREAGA, J. et al. Tube shelters from agricultural plastic waste: An example of circular economy. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 268, 2020.

MARTÍNEZ URREAGA, J. et al. Tube shelters from agricultural plastic waste: An example of circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122401, 2020.

MATRAPAZI, V. K.; ZABANIOTOU, A. Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. **Science of The Total Environment**, v. 718, p. 137316, 2020.

MENDES, N. C. Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. **Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.**, p. 149, 2013.

MENG, X. et al. Fuzzy Min-Max Neural Network With Fuzzy Lattice Inclusion Measure for Agricultural Circular Economy Region Division in Heilongjiang Province in China. **IEEE ACCESS**, v. 8, p. 36120–36130, 2020.

MIES, A.; GOLD, S. Mapping the social dimension of the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, n. November 2020, p. 128960, 2021.

MOLIN, S. J. D. DESEMPENHO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NA VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA, NA LIXIVIAÇÃO E NO RENDIMENTO DO FEIJOEIRO. **Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias**, 2016.

MOSQUERA-LOSADA, M. R. et al. Circular economy: Using lime stabilized bio-waste based fertilisers to improve soil fertility in acidic grasslands. **CATENA**, v. 179, p. 119–128, 2019.

MUSCAT, A. et al. Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. **Nature Food**, v. 2, n. 8, p. 561–566, 2021.

NAB, C.; MASLIN, M. Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam conventional and sustainable coffee production and export to the United Kingdom. **Geo: Geography and Environment**, n. November, p. 1–19, 2020.

NEMECEK, T.; KÄGI, T. Life cycle inventories of Agricultural Production Systems. **Ecoinvent**, n. 15, p. 1–360, 2007.

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, n. December 2020, p. 127973, 2021.

NOYA, I. et al. Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia – A strategy to work towards Circular Economy. **Science of The Total Environment**, v. 589, p. 122–129, 2017.

NOPONEN, M. R. A. et al. Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 151, p. 6–15, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.019>.

OZCARIZ-FERMOSELLE, M. V et al. Promoting Circular Economy Through Sustainable Agriculture in Hidalgo: Recycling of Agro-Industrial Waste for Production of High Nutritional Native Mushrooms. **Climate Change Management**, p. 455–469, 2019.

ROCCHI, L. et al. Measuring circularity: an application of modified Material Circularity Indicator to agricultural systems. **Agricultural and Food Economics**, v. 9, n. 1, 2021.

SALINAS, B. Life Cycle Assessment of Coffee Production. -, p. 6, 2008.

SALOMONE, R. Life cycle assessment applied to coffee production: investigating environmental impacts to aid decision making for improvements at company level. **Journal of Food Agriculture and Environment**, v. 1, n. 2, p. 295–300, 2003.

SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, C. et al. Two-phase Olive mill waste: A circular economy solution to an imminent problem in Southern Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122789, 2020.

SANTANA, D. B. et al. Estimate of water erosion in coffee growing areas in serra da mantiqueira, minas gerais state, brazil. **Agriculture and Forestry**, v. 67, n. 2, p. 75–88, 2021.

SECCO, C. et al. Circular economy in the pig farming chain: Proposing a model for measurement. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121003, 2020.

SERAFIM, M. E. Sistema conservacionista e de manejo intensivo na melhoria de atributos do solo para a cultura do cafeeiro. **Tese de Doutorado da Universidade Federal de Lavras, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.**, p. 120, 2011.

STILLITANO, T. et al. Sustainable agri-food processes and circular economy pathways in a life cycle perspective: State of the art of applicative research. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 5, p. 1–29, 2021.

STUCKI, M. et al. How life cycle-based science and practice support the

transition towards a sustainable economy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2021.

TRINH, L. T. K. et al. Comparative life cycle assessment for conventional and organic coffee cultivation in Vietnam. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.17 n. 3, p. 1307–1324, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02539-5>.

VAN KEULEN, M.; KIRCHHERR, J. The implementation of the Circular Economy: Barriers and enablers in the coffee value chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 125033, 2021.

VELASCO-MUÑOZ, J. F. et al. Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, n. January, 2021.

WEBER, C. T.; TRIERWEILER, L. F.; TRIERWEILER, J. O. Food waste biorefinery advocating circular economy: Bioethanol and distilled beverage from sweet potato. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 121788, 2020.

WERNICK, I. K.; AUSUBEL, J. H. National material metrics for industrial ecology. **Resources Policy**, v. 21, n. 3, p. 189–198, 1995.

XI, H. Models of Circular Economy on Agriculture in Yunnan Province. **Energy Procedia**, v. 5, p. 1078–1083, 2011.

XIA, X.; RUAN, J. Analyzing Barriers for Developing a Sustainable Circular Economy in Agriculture in China Using Grey-DEMATEL Approach. **SUSTAINABILITY**, v. 12, n. 16, 2020.

XUAN, L. I.; BAOTONG, D.; HUA, Y. E. The Research Based on the 3-R Principle of Agro-circular Economy Model-The Erhai Lake Basin as an Example. **Energy Procedia**, v. 5, p. 1399–1404, 2011.

XUE, Y. NAN et al. Environmental and economic benefits of carbon emission reduction in animal husbandry via the circular economy: Case study of pig farming in Liaoning, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117968, 2019.

YAZDANI, M.; GONZALEZ, E. D. R. S.; CHATTERJEE, P. A multi-criteria decision-making framework for agriculture supply chain risk management under a circular economy context. **Management Decision**, 2019.

ZABANIOTOU, A. et al. 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 Development**, v. 14, p. 22–36, 2015.

ZHAI, X.; SHANGJIE. Integrated evaluation PPC model of agricultural circular economy in the perspective of ecological restoration. **Advanced Materials Research**, v. 113–116, p. 750–756, 2010a.

ZHAI, X.; SHANGJIE. Integrated evaluation PPC model of agricultural circular economy in the perspective of ecological restoration. **Advanced Materials Research**, v. 113–116, p. 750–756, 2010b.

World Wide Fund for Nature –WWF. Disponível em <https://www.wwf.org.br/> Acesso em 07 de fevereiro de 2022.