



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

NÍVEL DOUTORADO

ROBÉRIO SATYRO DOS SANTOS JUNIOR

**GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA (*Manihot
esculenta*) NO SEMIÁRIDO SERGIPANO SOB O ASPECTO DA ECONOMIA
CIRCULAR**

São Cristóvão/SE

2025

ROBÉRIO SATYRO DOS SANTOS JUNIOR

**GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA (*Manihot
esculenta*) NO SEMIÁRIDO SERGIPANO SOB O ASPECTO DA ECONOMIA
CIRCULAR**

Documento apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe (PRODEMA/UFS), como requisito parcial para aprovação no Exame de Qualificação.

Linha de Pesquisa: Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável

Orientador: Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Alberto Wisniewski Jr.

São Cristóvão/SE

2025

ROBÉRIO SATYRO DOS SANTOS JUNIOR

**GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA (*Manihot
esculenta*) NO SEMIÁRIDO SERGIPANO SOB O ASPECTO DA ECONOMIA
CIRCULAR**

Documento apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe (PRODEMA/UFS), como requisito para aprovação na defesa da Tese.

Aprovado em 29 de outubro de 2025, às 09:00h.

Documento assinado digitalmente
 **ROBERIO SATYRO DOS SANTOS JUNIOR**
Data: 13/11/2025 13:51:03-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Robério Satyro dos Santos Jr.
Universidade Federal de Sergipe
Discente

Documento assinado digitalmente
 **ROBERTO RODRIGUES DE SOUZA**
Data: 14/11/2025 09:58:35-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza
Universidade Federal de Sergipe
Presidente-Orientador

ALBERTO
JUNIOR:9222236696
8

Assinado de forma digital por
ALBERTO JUNIOR:92222366968
Dados: 2025.11.17 15:33:03
-03'00'

Prof. Dr. Alberto Wisniewski Jr.
Universidade Federal de Sergipe
Coorientador

Profa. Dr. Inajá Francisco de Sousa
Universidade Federal de Sergipe
Examinador Interno

Profa. Dr. Jailton de Jesus Costa
Universidade Federal de Sergipe
Examinadora Interno

Profa. Dr. Jefferson Arlen Freitas
Universidade Federal de Sergipe
Examinador Externo

Profa. Dra. Rosiane dos Santos
Universidade Federal de Sergipe
Examinadora Externa

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

S237g Santos Júnior, Robério Satyro dos.
Gestão sustentável dos resíduos da agroindústria (*Manihot esculenta*) no semiárido sergipano sob o aspecto da economia circular / Robério Satyro dos Santos Júnior; orientador Roberto Rodrigues de Souza. – São Cristóvão, SE, 2025.
164 f.; il.

Tese (doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) –
Universidade Federal de Sergipe, 2025.

1. Meio Ambiente - Sergipe. 2. Mandioca - Indústria. 3. Impacto ambiental.
4. Biomassa. 5. Resíduos agrícolas. 6. Gestão integrada de resíduos sólidos.
I. Souza, Roberto Rodrigues de, orient. III. Título.

CDU 502.171.1(813.7)

AGRADECIMENTOS

No mestrado iniciei meus agradecimentos com o significado dessa palavra “Agradecer significa reconhecer o cuidado e a atenção dada em momentos que mais necessitamos”. Agora eu gostaria de trazer uma palavra mais profunda e que expressa o sentimento que estou “Gratidão”. A gratidão é um sentimento genuíno e de apreço pelo reconhecimento de algo recebido, ela é um dos sentimentos mais sinceros e transformadores. E é esse sentimento que estou agora ao final dessa jornada enquanto aluno do doutorado, uma gratidão enorme por todos os ensinamentos e valores recebidos por tantas pessoas que fizeram com que esse momento pudesse acontecer.

Em primeiro momento, sou grato a DEUS por me mostrar que nunca estive sozinho, principalmente quando meus pensamentos diziam o contrário. Gratidão a minha MÃE Elza Maria que desde o meu nascimento nunca desistiu de mim e sempre esteve ao meu lado (algumas vezes sem entender o que é fazer pesquisa). A minha avó Aurelina Adilha *in memoriam*, que me passou diversos valores e broncas, mas principalmente me amou, e deu todo seu carinho em vida. A minha irmã Mairla Thainara por muitas vezes bancar meus gastos e deixar morar em sua casa e aos meus sobrinhos (Marina, Isaac e Ravi) pelo carinho e amor.

Nesse parágrafo dedico minha gratidão aos meus amigos(as) que foram paz nos momentos em que minha mente e meu coração esteve mais acelerado. André (Deco), Camilo Rafael, Eline Prado, Caroline Sousa, Alana Soares, Ana Lima, Laíse Soares, Felipe Guilherme, Kelvin Teixeira, Adriano Moraes, Jaiane Melo, Sangue de Cristo, Fyve e Turma doutorado 2021. Todos vocês contribuíram de forma direta ou indireta para que chegasse ao final dessa jornada.

Por fim, minha gratidão ao meu orientador Roberto Rodrigues pelo apoio e disposição, mesmo em meio a um tratamento e meu coorientador Alberto Wisniewski que teve papel fundamental no desenvolvimento da pesquisa, guardarei com respeito e carinho todos os ensinamentos que recebi em reuniões que tivemos. Grato ao PRODEMA/UFS pelos ensinamentos passados através dos professores e servidores ao longo desses seis anos que estive no programa. A UFS/PROSGRAP/PROAP ao aporte físico, financeiro e logístico e a FAPITEC/SE e CAPES pelo apoio para o desenvolvimento da pesquisa. O presente estudo foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

E para concluir gratidão aqueles que não foram citados aqui, mas também foram importantes na minha trajetória até aqui.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – (a) Pesquisas que abordaram a agricultura familiar (b) Aspectos abordados nos artigos	32
Figura 1.2 – Artigos selecionados por ano e quantitativo por revista	33
Figura 1.3 – Países onde ocorreram as pesquisas	35
Figura 1.4 – Nuvem de palavras com os títulos das pesquisas	38
Figura 2.1 – Delimitação da região semiárida no estado de Sergipe	54
Figura 2.2 – Fluxograma de estimativas para aplicação da massa residual das culturas	59
Figura 3.1 – Evolução da matriz energética no Brasil	86
Figura 3.2 – Transporte dos resíduos da mandioca no semiárido sergipano	92
Figura 4.1 – Localização da região semiárida sergipana	110
Figura 4.2 – Quantidade de mandioca e planta superior no período de 19 anos	116
Figura 4.3 – Resíduos sólidos e líquidos da colheita e beneficiamento da mandioca	117
Figura 4.4 – Análise de cenários circulares para a produção de mandioca	119
Figura 4.5 – Cenários circulares para os bioprodutos da pirólise da biomassa da mandioca	120
Figura C1 – Fluxograma dos sprints para desenvolvimento da plataforma	154
Figura C2 – Logomarca para a plataforma Semiárido Forte	154
Figura C3 – Interface inicial da Plataforma Semiárido Forte	156
Figura C4 – Interface inicial: Seção de descrição do projeto	157
Figura C5 – Interface inicial: financiadores do projeto	157
Figura C6 – Subseção com a descrição dos bioprodutos	158
Figura C7 – Subseção com área para entrar em contato	158
Figura C8 – Interfaces da calculadora da Plataforma Semiárido Forte	159
Figura C9 – Documento a ser baixado em PDF	160
Figura C10 – Relatório gerado a partir da calculadora da Plataforma Semiárido Forte	161

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Critérios de inclusão e exclusão dos artigos analisados	28
Quadro 1.2 – Questões aplicadas para análise dos artigos	29
Quadro 1.3 – Faixa de qualidade para os artigos	30
Quadro 1.4 – Quantitativo de artigos selecionados por base de dados	31
Quadro 1.5 – Evidências extraídas nos artigos sobre os desafios e limitações para EC	39
Quadro 2.1 – Dados para cálculos da massa residual, biocombustíveis de 2ª geração, sequestro de CO ₂ e monetização	55
Quadro 3.1 – Aspectos analisados na viabilidade técnica, econômica e energética dos resíduos da agricultura/agroindústria	82
Quadro 3.2 – Informações para os cálculos da viabilidade técnica, econômica e energética	84
Quadro 3.3 – Panorama dos biocombustíveis no Brasil	88
Quadro 4.1 – Variáveis, equações, informações e referências dos cenários lineares	113
Quadro 4.2 – Variáveis, equações, informações e referências dos cenários circulares	114
Quadro 4.3 – Síntese ambiental, social e econômica do cenário linear e circular na agricultura	122
Quadro A1 - Evidências sobre a incorporação da economia circular nos estudos	135
Quadro B1 – Características do reator de pirólise	139
Quadro B2 – Especificações técnicas do modelo de triturador	139
Quadro B3 – Especificações técnicas do modelo de ensacadora	139
Quadro B4 – Especificações técnicas do modelo de trator	140
Quadro C1 – Equações e informações do aspecto ambiental	152
Quadro C2 – Equações e informações do aspecto econômico	153
Quadro C3 - Equações e informações do aspecto social	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais culturas agrícolas no Estado de Sergipe	60
Tabela 2.2 – Culturas agrícolas produzidas no semiárido sergipano	62
Tabela 2.3 – Perímetro irrigado de Canindé do São Francisco (Semiárido)	63
Tabela 2.4 – Estimativa da biomassa residual e produtos das culturas agrícolas do semiárido	65
Tabela 2.5 – Estimativa sobre o valor econômico da biomassa residual e produtos	66
Tabela 3.1 – Fator de geração de biogás	80
Tabela 3.2 – Percorso de transporte da biomassa residual	91
Tabela 3.3 – Capex ou custo de investimento para produção de biocombustíveis de segunda geração	93
Tabela 3.4 – Custo operacional na produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise	94
Tabela 3.5 – Receita com a produção de biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise e CO ₂ sequestrado	96
Tabela 3.6 – Gasto energético com a indústria de biocarvão	97
Tabela 3.7 – Estimativa do CO ₂ gerado e sequestrado com a produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise	98
Tabela 3.8 – Energia gerada com a produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise	98
Tabela 4.1 – Valores de disposição final sólida, líquida e poluentes gerados	118
Tabela 4.2 – Cenários circulares para os ganhos ambientais com aproveitamento da biomassa	121

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

APL's – Arranjos Produtivos Locais

ATER – Assistência Técnica e Extensão Rural

BBS – Biochar do Brasil Sustentabilidade

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CAPEX – Capital Expenditure

CBIO – Créditos de Descarbonização

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

CC – Cenário Circular

CL – Cenário Linear

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética

COHIDRO – Companhia de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Irrigação de Sergipe

CONBASF – Consórcio Público de Saneamento Básico e Resíduos Sólidos do Baixo São Francisco

CONSCENSUL – Consórcio Público de Saneamento Básico e Resíduos Sólidos do Sul e Centro Sul de Sergipe

COOCAFÉ – Cooperativa de Cafeicultores da Região de Lajinho

COOFMA – Cooperativa de Produtores de Farinha de Mandioca do Município de Campo do Brito

COP – Conferência das Partes

CPAC – Consórcio Público de Saneamento Básico da Grande Aracaju

CPDM – Centro de Processamento e Derivados da Mandioca

DS – Dinâmica de Sistemas

EBITDA/LAJIDA – Lucro Antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização

EC – Economia Circular

EL – Economia Linear

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMDAGRO – Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPJEL – Empresa Júnior de Engenharia Elétrica

FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura

FATIPEC – Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe

GEE – Gases do Efeito Estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MME – Ministério de Minas e Energia

ODS – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Produto Interno Bruto

PAS – Perfil da Agricultura Sergipana

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

PNRS – Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PPGQ – Programa de Pós-Graduação em Química

PRODEMA – Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente

PRONAF – Programa Nacional de Apoio à Agricultura Familiar

PRORH – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos

PROINVESTE – Programa de Apoio ao Investimento dos Estados e Distrito Federal

RAM – *Random Access Memory*

RASP – Resíduos Agrossilvopastoris

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SC – Simulado Circular

SGSRA – Sistema de Gestão Sustentável para Resíduos da Agricultura

SL – Simulado Linear

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TPI – Terras Pretas de Índio

UFS – Universidade Federal de Sergipe

VAP – Variação da Área de Produção

VP – Variação da Produção

VPL – Valor Presente Líquido

RESUMO

A produção agrícola é uma das atividades socioeconômicas mais importantes, pois é responsável pela produção de alimentos, todavia, também é responsável pela geração de uma quantidade enorme de resíduos. A quantidade estimada de produção agrícola mundial é de 7,26 Gt e que o volume de biomassa seca chegue à ordem de 140 Gt, esse quantitativo de material verde representa um impacto significativo no meio ambiente. Além disto, a falta de valorização e o descarte inadequado dos resíduos agrícolas na natureza estão associados ao modelo linear de produção, que prioriza apenas o consumo e descarte, causando impactos no meio ambiente. Este modelo se contrapõe diretamente ao da Economia Circular (EC), que por sua vez, representa um avanço significativo na incorporação da sustentabilidade por organizações, cidades e governos, caracterizando-se fundamentalmente pela reciclagem, reutilização e reaproveitamento dos resíduos gerados em todo o ciclo de vida do produto, e não apenas no processo produtivo. Neste contexto, a pesquisa propôs o desenvolvimento de um modelo circular para o aproveitamento dos resíduos provenientes da colheita e do beneficiamento da mandioca, visando à transformação da biomassa resultante em biocombustíveis de segunda geração. Para atingir esse objetivo, inicialmente, conduziu-se um levantamento preliminar que identificou uma cultura de base familiar (mandioca) entre as doze culturas produzidas no Semiárido Sergipano. Em seguida, procedeu-se a uma análise de viabilidade técnica, econômica e energética para a conversão da biomassa vegetal. Com o intuito de demonstrar os impactos dos modelos linear e circular, adotou-se a metodologia da Dinâmica de Sistemas. Esta abordagem permitiu a construção de cenários que simularam ambos os modelos. Por fim, o estudo culminou na criação da plataforma Semiárido Forte, que compartilha informações sobre o as quantidades de biomassa produzida, potencial de biocombustíveis de segunda geração, o CO₂ sequestrado no processo de colheita e beneficiamento, os impactos sociais e ambientais contrastantes entre o modelo linear e o circular, além dos valores econômicos com e sem a reciclagem da biomassa. A consecução dos objetivos propostos foi suportada pela aplicação de tecnologias interdisciplinares, que otimizaram a coleta e o processamento das informações necessárias. Os resultados demonstraram a importância e os benefícios que podem ser alcançados com a incorporação de um modelo circular de produção para os resíduos da biomassa da mandioca, servindo como instrumento para as práticas sustentáveis. A análise de viabilidade demonstrou potencial positivo com a introdução da Unidade de Produção, com ganhos ambientais, energéticos e econômicos. Quanto as simulações demonstraram os impactos positivos e negativos ao longo de dezenove anos para biomassa no modelo linear e circular. Portanto, a pesquisa serve como importante instrumento para alcançar os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2 e 12, proporcionando a agricultura, produção e consumo sustentável, servindo para melhorar a qualidade do solo, minimizar o efeito do estresse hídrico nas culturas, diminuir a emissão de gases do efeito estufa, permitindo que as atividades agrícola-pastoris, contribuindo fortemente para a fixação dos pequenos agricultores familiares na região, sendo o mais importante, a promoção de uma economia sustentável de consumo para os resíduos da agricultura/agroindústria.

Palavras-Chave: Biomassa; Economia Circular; Mandioca; Semiárido Sergipano.

ABSTRACT

Agricultural production is one of the most important socioeconomic activities, as it is responsible for food production; however, it is also responsible for generating a huge amount of waste. The estimated amount of global agricultural production is 7.26 Gt, and the volume of dry biomass reaches approximately 140 Gt. This quantity of green material represents a significant impact on the environment. Furthermore, the lack of valorization and inadequate disposal of agricultural waste in nature are associated with the linear production model, which prioritizes only consumption and disposal, causing environmental impacts. This model directly opposes the Circular Economy (CE), which, in turn, represents a significant advance in the incorporation of sustainability by organizations, cities, and governments, fundamentally characterized by the recycling, reuse, and repurposing of waste generated throughout the product's life cycle, and not just in the production process. In this context, a research project proposed the development of a circular model for utilizing cassava harvesting and processing waste, transforming the resulting biomass into second-generation biofuels. To achieve this objective, it initially relied on a preliminary survey establishing cassava as a family-based crop among the two crops produced in the Sergipe Semi-Arid region. Following this, an analysis of technical, economic, and energy solutions for the conversion of plant biomass was conducted. To demonstrate the impacts of linear and circular models, the Systems Dynamics methodology was proposed. This approach allowed the construction of scenarios simulating both models. Finally, the study culminated in the creation of the Semiárido Forte platform, which shares information on the components of the biomass produced, the potential for second-generation biofuels, the CO₂ sequestered in the harvesting and processing, the contrasting social and environmental impacts between the linear and circular models, as well as the economic values with and without biomass recycling. The achievement of the proposed objectives was supported by the application of interdisciplinary technologies, which optimized the collection and processing of easy-to-use information. The results demonstrated the importance and benefits that can be achieved with the incorporation of a circular production model for cassava biomass waste, used as an instrument for sustainable practices. The analysis demonstrated positive potential with the introduction of the Production Unit, with environmental, energy, and economic gains. Simulations showed positive and negative results over ten years for biomass in both linear and circular models. Therefore, this research serves as an important instrument for achieving Sustainable Development Goals (SDGs) 2 and 12, providing sustainable agriculture, production, and consumption, necessary to improve soil quality, minimize the effect of water stress on crops, reduce greenhouse gas emissions, and enable agricultural and pastoral activities, strongly contributing to the retention of small family farmers in the region, and most importantly, promoting a sustainable consumption economy for agricultural/agro-industrial waste.

Keywords: Biomass; Circular Economy; Cassava; Sergipe semiarid.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
1. Desafios e limitações para economia circular na agricultura sustentável	23
Resumo	24
Abstract	24
1.1. Introdução	25
1.2. Metodologia	27
1.3 Resultados e Discussões	31
1.3.1. Visão geral dos artigos	31
1.3.2 Mapeamento das evidências extraídas	38
1.4 Considerações Finais	42
Referências	43
2. Agricultura sustentável no semiárido sergipano: Análise dos aspectos produtivos e econômicos da aplicação dos resíduos da agricultura/agroindústria na produção de <i>biochar</i>	50
Resumo	51
Abstract	51
2.1. Introdução	52
2.2. Metodologia	54
2.3. Resultados e Discussões	60
2.3.1. Cenário da agricultura no semiárido sergipano	60
2.3.2. Aspectos produtivos e econômicos dos resíduos da agricultura	65
2.4. Considerações Finais	67
Referências	68
3. Análise de viabilidade técnica, econômica e energética com a transformação da massa residual	76
Resumo	77
Abstract	77
3.1 Introdução	78
3.2 Metodologia	80
3.3 Resultados e discussões	85
3.3.1 Evolução da matriz energética no Brasil	85
3.3.2 Análise de viabilidade técnica, econômica e energética	91
3.4 Considerações finais	99

Referências	100
4. Resíduos da mandioca no Semiárido Sergipano: Análise de cenários linear e circular	104
Resumo	105
Abstract	105
4.1. Introdução	106
4.2. Metodologia	110
4.2.1. Delimitação da área de estudo	110
4.2.2. Hipótese dinâmica	111
4.2.3. Coleta e análise de dados	112
4.2.3.1. Cenário Linear (CL)	113
4.2.3.2. Cenário Circular (CC)	114
4.3. Resultados e Discussões	116
4.3.1. Análise de cenários lineares para a produção da mandioca	116
4.3.2. Análise de cenários circulares para a produção da mandioca	119
4.3.3. Análise ambiental, social e econômica dos cenários	122
4.4. Considerações finais	124
Referências	125
Conclusão	131
APÊNDICES	134
Apêndice A – Evidências sobre a incorporação da economia circular nos estudos	135
Apêndice B – Especificações dos equipamentos	139
Apêndice C – Relatório da Construção da Plataforma Semiárido Forte	141

INTRODUÇÃO

Quando se trata de resíduos sólidos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída em 2 de agosto de 2010, é a referência para o conjunto de disposições, princípios, objetivos e diretrizes a respeito dos resíduos sólidos. Ela atribui responsabilidade à pessoa física e jurídica que gera de forma direta ou indireta algum tipo de resíduo. Para Silva Filho e Soler (2019), os termos dispostos pela lei apresentam-se de forma bastante complexa e muitas vezes em discordância ou são incompatíveis com os instrumentos legais e normativos nas esferas federal, estadual e municipal. Isso dificulta o tratamento e a disposição final, demonstrando a necessidade de implementação de políticas públicas e ações interdisciplinares para a solução dos problemas.

Segundo Hammer e Pivo (2017), a solução para os impactos causados ao meio ambiente estaria na utilização do *triple bottom line* (Tripé da Sustentabilidade), no fortalecimento dos aspectos sociais, econômicos e ambientais. É preciso ressaltar também o papel de importância do governo e estado na tomada de decisão, com a implantação de políticas públicas na solução dos problemas. Em específico, a pesquisa trata-se o tripé da sustentabilidade na busca por uma agricultura sustentável, valoração e aproveitamento dos resíduos no processo de colheita e beneficiamento.

Para o cenário atual, no setor agrícola, estima-se que a produção em nível mundial esteja em torno de 7,26 Gt, e que o volume seco de biomassa vegetal chegue ao equivalente de 140 Gt (EMBRAPA, 2020). Ao analisar o aspecto econômico com base na economia praticada no Brasil (produção, consumo e descarte), percebe-se a necessidade de medidas que incentivem o reaproveitamento da biomassa vegetal descartada. À luz disto, a inserção de um modelo circular de consumo para todos os resíduos da produção agrícola proporcionaria maior aproveitamento econômico.

Nesse contexto, os resíduos da agricultura/agroindústria precisam de tratamento e disposição final ambientalmente correto, quando necessário, como acontece com os resíduos sólidos urbanos (RSU), tendo em vista os malefícios que podem causar pelo descarte inadequado, como a emissão de metano (CH₄) por exemplo, em decorrência do processo de decomposição microbiológica da matéria orgânica. Na questão social, se observa a desvalorização da área como resultado do acúmulo da biomassa sem tratamento, além de transtornos sociais para os moradores e agricultores(as) que residem próximo a esses locais, devido a quantidade de matéria orgânica em decomposição.

Desta maneira, o emprego de novas tecnologias representa uma solução para os resíduos da agricultura/agroindústria e no beneficiamento dos(as) pequenos(as) agricultores(as) familiares, para além do que já vem sendo feito, na alimentação de animais e aplicação no solo.

Assim, o objetivo é aplicar tecnologias de transformação da biomassa residual para valoração e aumento da produtividade.

No Brasil, uma das formas mais habituais de tratamento para a biomassa vegetal é a compostagem, processo biológico onde microrganismos atuam na decomposição da matéria orgânica. Segundo os dados fornecidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), mostram que a quantidade em massa total de resíduo orgânico destinado ao tratamento por compostagem foi de 304.637,3 toneladas, desse montante, a região Nordeste contribuiu com 433,3 toneladas, o que representa 0,14% em comparação as outras regiões (SNIS, 2019).

Outra forma de tratamento pouco explorada no Brasil é a pirólise da biomassa residual, que pode ser utilizada para a produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise, sendo que o primeiro, quando adicionado como parte de uma formulação de fertilizante, demonstra conseguir gerar ganhos de produtividade de até 21% no milho, e na eficiência no uso de nitrogênio pelas plantas, além disto, também diminui a emissão líquida de gases do efeito estufa, e auxilia no sequestro de carbono no solo, e ainda como benefício proporciona a liberação mais lenta dos nutrientes em comparação com outras formas tradicionais utilizadas, prevenindo contra perdas excessivas, elevando o potencial de absorção pela cultura (EMBRAPA, 2022).

Para demonstrar o potencial econômico do biocarvão no Brasil, o agronegócio é responsável por movimentar 25% do Produto Interno Bruto – PIB, o que demonstra a necessidade de compra de fertilizantes para atender a demanda do setor (CEPEA, 2022). Além disto, a Guerra na Ucrânia diminuiu a quantidade de fertilizantes exportados da Rússia, exigindo novas alternativas de fornecedores para atender a produção no país (Joaquim *et al.*, 2023, p.103). Dados encontrados no Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas do IPEA 2012, mostra que o Brasil importa cerca de 70% das matérias-primas utilizadas para fabricação dos fertilizantes.

Nesse sentido, esta pesquisa se justifica pela necessidade de tecnologias com princípios pautados na sustentabilidade e na economia circular, que valorize a biomassa vegetal gerada pela agricultura/agroindústria, e proporcione a valoração das atividades dos pequenos agricultores familiares através da biomassa da colheita e beneficiamento da mandioca. Para além disso, a pesquisa aponta a necessidade de investimento em políticas públicas que fortaleçam o setor e auxiliem a suprir a falta de fertilizantes causada pelas variações de mercado.

Nesta pesquisa, a valoração dos resíduos da agricultura/agroindústria foi abordada

através do condicionamento do solo e aproveitamento energético para região semiárida de Sergipe, a qual apresenta limitações e restrições de produtividade agrícola devido ao solo pobre em nutrientes e a pouca disponibilidade hídrica, com chuvas durante dois ou três meses no ano. A pouca capacidade de retenção hídrica pelo solo, juntamente com uma insolação intensa, resultam em uma baixa infiltração de água em camadas de solo mais profundas, além de uma evaporação rápida, gerando uma deficiência de água durante o resto do ano.

O viés desta pesquisa, propõe utilizar os princípios da Economia Circular (EC) como estratégia na gestão sustentável dos resíduos da agricultura/agroindústria no Semiárido Sergipano, com a valoração dos resíduos gerados pelo processo de colheita e beneficiamento da cultura da mandioca (*manihot esculenta*) com o desenvolvimento de condicionadores de solo, sequestro de carbono e aproveitamento energético. A Conferência das Partes - COP27, que tratou sobre os impactos causados pelas mudanças climáticas, reforça a importância no desenvolvimento de uma economia de baixo carbono e que utilize energias renováveis (ONU, 2022).

Nesses termos, os condicionadores de solo propostos serão preparados em um processo que possa ser parcialmente ou totalmente transferido para os agricultores e/ou cooperativas, de forma que o preparo possa ocorrer *in loco*, a baixo custo, e empregando como matéria-prima a biomassa residual da agricultura/agroindústria da região.

Logo, a questão central foi investigar qual a realidade na gestão dos resíduos da agricultura/agroindústria no semiárido sergipano, por meio da valoração estimada e a quantificação da biomassa residual, com direcionamento para implementação de um sistema circular de produção e consumo sustentável. Nesses termos, a pesquisa mostra-se relevante e desafiadora, pois pretende beneficiar uma região que naturalmente possui condições de plantio difíceis pelo clima e pela condição do solo, através da incorporação de uma agricultura circular e sustentável.

O método científico usado foi o Hipotético Dedutivo, que parte de uma hipótese criada para embasar a pesquisa. Como hipótese o estudo propõe: o desenvolvimento de um modelo circular de produção e consumo que influencie nas questões ambientais, sociais e econômicas, com impacto direto na preservação do meio ambiente, qualidade de vida dos pequenos(as) agricultores(as) e o incentivo a criação de políticas públicas para produção de bioprodutos.

O caráter da pesquisa é o aplicado, com o objetivo de gerar novos conhecimentos sobre a economia circular e a gestão dos resíduos da agricultura/agroindústria no semiárido

sergipano. Com a finalidade de beneficiar os pequenos agricultores(as) familiares, e incentivar a permanência na região pelo uso de tecnologia e valorização dos resíduos da produção.

O enquadramento da pesquisa é quali-quantitativa. No aspecto qualitativo houve o levantamento de informações sobre o local de pesquisa, buscando compreender a dinâmica regional de produção para as culturas do semiárido. Já a quantitativa prioriza os valores estimados da massa residual que podem ser aplicadas no modelo circular de produção e consumo, através da produção de biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise, aproveitamento energético e sequestro de carbono.

Por fim, a pesquisa explora a realidade do semiárido sergipano com base no tripé da sustentabilidade, e propõe aos pequenos agricultores(as) familiares, novas formas de aproveitamento da biomassa gerada pelas culturas no processo de colheita, beneficiamento e consumo. Informações contidas no Programa Nacional de Apoio à Agricultura Familiar (PRONAF) mostra que no Estado de Sergipe atende 14.574 agricultores familiares (SERGIPE, 2020).

O objetivo geral foi identificar uma cultura agrícola com base familiar no semiárido sergipano com potencial para valoração da biomassa no contexto da economia circular. Como objetivos específicos propomos:

- Elaborar uma revisão sistemática para compreensão da economia circular aplicada na agricultura.
- Definir uma cultura no semiárido sergipano associada a agricultura familiar com alta geração de resíduos.
- Realizar uma análise estimativa de valoração dos resíduos com foco em biocombustíveis de 2ª geração.
- Analisar a viabilidade técnica, econômica e energética do processo de valoração dos resíduos para ser usado como subsídio no desenvolvimento de políticas públicas ou na implementação do negócio pelo arranjo produtivo local (APL) escolhido.
- Demonstrar o potencial ambiental, social e econômico da biomassa vegetal da mandioca pela utilização da dinâmica de sistemas.
- Desenvolver uma plataforma virtual de EC para resíduos agrícolas associados a biocombustíveis de 2ª geração.

O contexto interdisciplinar da pesquisa, surge da complexidade ligada aos problemas causados pelos resíduos no meio ambiente e a necessidade de soluções conjuntas entre as

diversas áreas do conhecimento. Nesse sentido, a pesquisa busca resultados que proporcionem ganhos econômicos, através de uma economia sustentável, com a adoção de modelos circulares de produção, consumo, e ambientais, com a redução na emissão de gases do efeito estufa pelo sequestro de carbono, baseado no biocarvão produzido pela pirólise dos resíduos da agricultura. Por fim, se tem os resultados no aspecto social com a valoração e permanência dos pequenos(as) agricultores(as) nessas áreas que possuem baixos índices de precipitações hídricas entre 500 e 700 mm (SERGIPE, 2021), além de, incentivar o uso de tecnologias sustentáveis.

Dessa maneira, as diversas áreas do conhecimento precisam participar de forma ativa e integrada na busca por um denominador comum, compreendendo que cada localidade possui suas particularidades, referentes aos aspectos culturais, sociais, econômicos, espaciais entre outros. No caso da presente pesquisa, o local tem como principal deficiência o incentivo a políticas públicas que utilizem o biocarvão, e outras maneiras sustentáveis, como forma de tratamento e aproveitamento para os resíduos do processo de colheita e consumo.

O avanço científico que o estudo se propõe a fazer, consiste na integração das diversas partes que compõem as questões de ordem ambiental (biomassa vegetal, agricultores, pesquisadores, população e gestores) em um modelo circular de gestão, na adoção de tecnologia ambiental que possibilite um avanço nos processos produtivos e consequentemente na qualidade ambiental de todos que residem na localidade, corroborando com os estudos realizados por Phillipi Jr. *et al.* (2000), que integra o recurso humano na geração de novos conhecimentos na busca por corrigir e recuperar a qualidade do ambiente. Para tanto, se faz necessária uma provocação aos órgãos públicos sobre a importância de se debater políticas e regulamentos para os biocombustíveis de 2ª geração que incentivem medidas sustentáveis na construção da economia circular.

No mais, é preciso ressaltar que a pesquisa vem sendo desenvolvida em parceria com os Programas de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH/UFS), Química (PPGQ/UFS), e com o apoio da Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe (EMDAGRO) e da Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC), para atender aos interesses do projeto Semiárido Forte, aprovado junto à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

A fim de facilitar o processo de publicação dos resultados obtidos, a tese foi organizada em formato de artigos que contemplam os objetivos específicos. O primeiro consiste em uma revisão sistemática com base na economia circular, agricultura sustentável, produção de biocombustíveis de 2ª geração e sequestro de carbono. Para tanto, foram feitas extrações de pesquisas em bases de dados e análises da qualidade e lacunas em cima dos temas levantados.

O artigo foi publicado e aceito no *Journal of Environmental Analysis and Progress* (JEAP/UFRPE).

O artigo seguinte atende ao segundo e terceiro objetivo específico, com a identificação das culturas produzidas no semiárido sergipano, na escolha de uma cultura específica para desenvolver o projeto Semiárido Forte e na valoração estimada dos resíduos com foco na produção de biocombustíveis de 2ª geração. Para este artigo, a revista escolhida para publicação foi a *Fuel* que abrange diversos tópicos relacionados a fontes de energia, combustíveis e seus impactos.

O terceiro artigo atende ao quarto objetivo específico, com a análise de viabilidade técnica, econômica e energética do processo de valoração dos resíduos para serem usados como subsídio no desenvolvimento de políticas públicas ou implementação do negócio pelo Arranjo Produtivo Local (APL) escolhido. A *Cleaner Production* foi a revista escolhida para publicação, seu foco é na pesquisa transdisciplinar voltada para a produção mais limpa e o desenvolvimento de sociedades mais sustentáveis.

O último artigo está ligado ao quinto objetivo específico com o desenvolvimento da plataforma virtual de EC para os resíduos agrícolas associados aos biocombustíveis de 2ª geração. Para tanto, são aplicadas tecnologias interdisciplinares (geoprocessamento e a dinâmica de sistemas) no levantamento de informações e construção dos cenários para adoção da EC na região semiárida de Sergipe. A revista é a *Energies* que publica artigos científicos sobre tecnologias, processos físico-químicos, armazenamento de energia e gestão de energia, com um foco especial em pesquisa científica, desenvolvimento tecnológico, política e estudos de gestão.

REFERENCIAS

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**. 2010.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (Brasil). **PIB do agronegócio brasileiro**. São Paulo. 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx#:~:text=Considerando%2Dse%20os%20desempenhos%20parciais,de%20PIB%20alcan%C3%A7ado%20em%202021>. Acesso em: 23 de março de 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil). **Aproveitamento de resíduos da agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília. 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Pesquisas com biocarvão apontam caminhos para a menor dependência na importação de fertilizantes**. Brasília. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/70728511/pesquisas-com-biocarvao-apontam-caminhos-para-a-menor-dependencia-na-importacao-de-fertilizantes>. Acesso em: 23 de março de 2023.

HAMMER, J., PIVO, G. **Teoria e prática do triple bottom line e do desenvolvimento econômico sustentável**. *Economic Development Quarterly*, 31 (1), 25-36. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA E PESQUISA APLICADA (Brasil). **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Brasília. 2012.

JOAQUIM, M. S.; PENHA, R. V.; VALE, J. S.; SOUZA, Á. N.; SILVA JÚNIOR, J. J.; BOTELHO, M. E. S. **Impactos da guerra entre a Rússia e a Ucrânia no trigo brasileiro**. *Editora Licuri*, 101-116, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das Partes - COP27**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/205377-cop27-tr%C3%AAs-maneyras-de-conter-crise-clim%C3%A1tica-e-diminuir-fome>. Acesso em: 23 de março de 2023.

PHILLIPI JÚNIOR, A.; TUCCI, C. E. M.; HOGAN, D. J.; NAVEGANTES, R. **Interdisciplinaridade em ciências ambientais**. In *Interdisciplinaridade em ciências ambientais*. 2000.

EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO DE SERGIPE (Sergipe). **Relatório de Atividades**. 2020.

EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO DE SERGIPE (Sergipe). **Relatório de Atividades**. 2021.

SILVA FILHO, C. R.; SOLER, F. D. **Gestão de Resíduos Sólidos: o que diz a lei**. 4 ed. Atual, e rev, Trevisan editora, São Paulo, 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (Brasil). **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2017**. Brasília. Versão republicada 2019.

DESAFIOS E LIMITAÇÕES PARA ECONOMIA CIRCULAR NA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

RESUMO

A forma de produção e consumo da sociedade tem impactado de modo significativo os recursos naturais devido à extração exacerbada, visto que o processo de transformação das matérias-primas gera a emissão de poluentes no planeta. Desse modo, ao se considerar o atual modelo de extração, produção, consumo e descarte na natureza (economia linear), observa-se a importância da criação de um modelo sustentável que possibilite preservar os recursos naturais e diminua os efeitos causados pelos padrões de consumo. Nesse sentido, o objetivo foi realizar uma revisão sistemática em escala global para entender os desafios e as limitações na compreensão da economia circular aplicada à agricultura. A metodologia seguiu os critérios para a elaboração de uma revisão sistemática, com a extração de artigos científicos publicados em bases de dados reconhecidas. Os levantamentos evidenciam alguns desafios e limitações para a implantação da economia circular na gestão dos resíduos da agricultura, dentre eles: a necessidade de mais pesquisas e tecnologias na produção de biomassa; a participação dos governos na adoção de políticas públicas e a participação social. Diante disso, a implementação da Economia Circular enfrenta desafios e limitações, conforme evidenciado no Quadro 1.5. Entre eles, destacam-se a necessidade de pesquisa em inovação e tecnologia, apoio financeiro, políticas públicas eficazes e a mitigação da poluição agrícola.

Palavra-chave: Modelo Sustentável, Economia Circular, Resíduos da Agroindústria/Agricultura, Revisão Sistemática.

ABSTRACT

The way society produces and consumes has significantly impacted natural resources due to excessive extraction, since the process of transforming raw materials generates the emission of pollutants into the planet. Therefore, considering the current model of extraction, production, consumption, and disposal in nature (linear economy), the importance of creating a sustainable model that makes it possible to preserve natural resources and reduce the effects caused by consumption patterns becomes evident. In this sense, the objective was to conduct a global-scale systematic review to understand the challenges and limitations in understanding the circular economy applied to agriculture. The methodology followed the criteria for the elaboration of a systematic review, with the extraction of scientific articles published in recognized databases. The surveys highlight some challenges and limitations for the implementation of the circular economy in the management of agricultural waste, among them: the need for more research and technologies in biomass production; the participation of governments in the adoption of public policies; and social participation. Therefore, the implementation of the Circular Economy faces challenges and limitations, as evidenced in Table 1.5. Among these, the need for research in innovation and technology, financial support, effective public policies, and the mitigation of agricultural pollution stand out.

Key words: Sustainable Model, Circular Economy, Agroindustry/Agriculture Waste, Systematic Review.

1.1. Introdução

O padrão de consumo no decorrer do tempo passou por diversas transformações, devido às mudanças de comportamento dos seres humanos. Todo esse processo de mudança na forma de consumo, ocasionou aumento na extração de recursos naturais, causando impacto direto ao meio ambiente, com desmatamento, contaminação do solo ou emissão de gases do efeito estufa provocado pelo descarte de produtos tóxicos (Rueangsan *et al.*, 2021).

Nesse aspecto o comportamento exagerado de consumo pela sociedade, reforça a necessidade de utilização de recursos naturais e o desmatamento de áreas para construção de indústrias, agricultura/agroindústria e pecuária. No caso da agricultura/agroindústria, se tem o uso de áreas para o cultivo e beneficiamento, com a finalidade de atender ao mercado consumidor.

O processo de produção na agricultura/agroindústria segue um fluxo essencialmente linear: cultivo, colheita, beneficiamento, venda, consumo e, finalmente, o descarte. Essa sequência, em sua maioria, gera um volume enorme de resíduos. Quando essa grande quantidade é descartada de forma inadequada, causa prejuízos significativos ao meio ambiente. Na visão de Hu *et al.* (2021), todo processo está compreendido na economia linear (EL), pois parte do princípio de que os resíduos gerados no processo produtivo não são aplicados novamente no processo.

Para ilustrar o consumo e descarte, o Banco Mundial e a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), estima que 1,33 bilhão de toneladas de alimentos são perdidos ou desperdiçados a cada ano em todo o mundo e os níveis de geração de resíduos subiriam para 2,2 bilhão de toneladas (Sridhar *et al.*, 2021). Nesse contexto, fica nítida a necessidade de reaproveitamento e aplicação desses resíduos, como forma de diminuir os impactos na extração de novos recursos e prejuízos ao meio ambiente.

Em contrapartida a esse movimento da EL, os estudos de Sandoval, Jaca e Ormazabal (2017), apontam o surgimento da economia circular (EC) como resposta aos desafios econômicos e produtivos criados pela EL, pois permite um fluxo cíclico de extração, produção e distribuição sustentável, com a reciclagem e reaproveitamento energético dos resíduos novamente no processo de produção.

Em 2015, os países da Europa iniciaram o processo de transição da economia linear para circular, com o objetivo de impulsionar a competitividade e promover um crescimento econômico mais sustentável, no plano constam 54 medidas que envolvem todas as etapas, desde a concepção do produto, seguindo os padrões sustentáveis, até o retorno para reutilização, reciclagem ou reaproveitamento energético (CIRCULAR, 2017).

No Brasil, a EC começa a ser analisada, principalmente devido a pandemia de COVID-19, que exigiu medidas sustentáveis, onde alguns modelos de negócios já caminham para circularidade de produção, na Europa onde a implementação está mais avançada, estima-se que a conversão gerou uma renda de cerca de 320 bilhões de euros em 2025. Tendo como meta até 2035 reciclar 65% dos seus resíduos e abolir a prática de incineração dos resíduos até 2040 (Silva, 2020).

Ao tratar especificamente o setor da agricultura/agroindústria, existe uma grande quantidade de alimentos cultivados, comercializados e consumidos, responsáveis pela geração de resíduos na colheita (planta superior) e beneficiamento (cascas, caroços). Nesse cenário, o panorama da ABRELPE (2021) e o PNRS (2022) afirma que a maior parcela de resíduo sólido gerada está enquadrada no setor agrícola e na área urbana (matéria orgânica). As informações comprovam uma economia agrária, pautada por altos volumes de produção e geração de resíduos no pós-consumo.

Ademais, uma quantidade mínima de resíduos da agricultura/agroindústria e orgânicos são reaproveitados na compostagem, produção de biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise, e aproveitamento energético. Para embasamento dessa informação, o Panorama da Abrelpe 2022, traz que as metas de aplicação de tratamentos biológicos e térmicos estão entre os menores. Surpreendentemente, embora 60% do lixo da população seja orgânico, apenas 4% desse material é reciclado, conforme apontam estudos de Pires e Ferrão (2017).

Em face do modelo linear predominante na agricultura/agroindústria, surge a necessidade de transição para uma economia circular. Esta abordagem visa a reincorporação e o máximo aproveitamento dos resíduos no processo produtivo, agregando valor à biomassa através de tratamentos inovadores. O desafio central reside na valorização e adoção de tecnologias que impulsionem uma agricultura circular e sustentável.

Em um contexto de crescente preocupação ambiental, o sequestro de carbono emerge como uma alternativa promissora, amplamente discutida em eventos como a COP27. No Brasil, a produção de biocarvão se destaca como uma estratégia eficaz para mitigar as emissões de gases do efeito estufa. Através da pirólise da biomassa residual, o carbono é fixado no solo, impedindo sua liberação na atmosfera e reduzindo a emissão de metano.

Nas visões de Foster, Roberto e Igari (2016), a EC simboliza o fim da cultura de descarte, eliminando o pensamento de “fazer, usar e descartar”, logo esse novo modelo simbolizaria a produção sustentável e a introdução do conceito de “lixo zero”, com o aproveitamento total dos resíduos.

Diante da necessidade de incorporação de um modelo circular na agricultura sustentável, a pesquisa busca compreender os desafios e limitações para introdução da EC em práticas agrícolas. Para tanto, foi realizada uma revisão sistemática em plataformas de dados, com a finalidade de responder o seguinte questionamento: “O que se sabe sobre os desafios e limitações para incorporação da EC na gestão dos resíduos sólidos?”.

1.2. Metodologia

A pesquisa se baseou em estudos prévios de Medeiros *et al.* (2015) e Oliveira, Kalid e Souza (2017), utilizando a coleta de artigos científicos em bases de dados para realizar uma revisão sistemática da literatura. O objetivo foi identificar, analisar, interpretar e sintetizar estudos relevantes, tanto primários quanto secundários, validados academicamente, para responder às questões de pesquisa.

A natureza qualitativa desta pesquisa permitiu uma análise abrangente do objeto de estudo, considerando seu contexto e características locais. A metodologia empregada foi a Análise e Síntese Temática (Cruzes e Dybå, 2011), que identificou e interpretou temas recorrentes nos estudos analisados. A revisão sistemática foi conduzida em sete fases: planejamento, busca, seleção por título/resumo, seleção por introdução/conclusão, avaliação da qualidade, extração e síntese.

1. Planejamento da pesquisa

O planejamento tem como modelo o desenvolvido por Gohr *et al.* (2013), que propõe três etapas de início:

- I. Perguntas da pesquisa: delimitação do tema; definição das palavras-chave e combinações; delimitação do período de publicação dos artigos; seleção da base de dados.
- II. Pesquisa/Seleção: busca de artigos com critérios estabelecidos na fase anterior; inclusão e exclusão de artigos selecionados.
- III. Descrição/Classificação: ordenação dos artigos de acordo com os critérios de maior relevância pelo pesquisador.

2. Busca pelos artigos

Para garantir um alcance maior sobre os temas abordados na pesquisa, foram selecionadas mais de uma plataforma de busca, com acesso institucional permitido pela Universidade Federal de Sergipe, via Portal de Periódicos da CAPES, entre elas: *Scopus*, *Science Direct*, *Spring* e *Scielo*.

A busca foi feita a partir das palavras-chaves, concatenadas pelos operadores booleanos “OR” e “AND” quando necessários. Foram utilizados como parâmetros a combinação das palavras-chaves: *circular economy* (economia circular), *biomass* (biomassa), *circular system* (sistema circular), *sustainable agriculture* (agricultura sustentável), *organic waste* (resíduos orgânicos), *sustainability* (sustentabilidade), *Carbon credit* (credito de carbono), *Carbon sequestration* (sequestro de carbono) e *2nd generation biofuel* (biocombustíveis de 2ª geração).

Os resultados das buscas foram exportados para uma planilha no Excel, para construção das etapas seguintes.

3. Seleção por título e resumo

Os artigos selecionados pelo processo de busca foram avaliados com base nos critérios de inclusão e exclusão descritos no quadro 1.1. Um artigo era incluído quando atendia a todos os critérios de inclusão, e excluído se atendesse a pelo menos um dos critérios de exclusão.

Quadro 1.1 – Critérios de inclusão e exclusão dos artigos analisados

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
IC1. Estudos que tratem da economia circular aplicada aos resíduos da agricultura	EC1. Escrito em um idioma que não seja o inglês e o português;
IC2. Pesquisas qualitativas e quantitativas	EC2. Estudos duplicados ou repetidos;
IC3. Estudos primários e secundários	EC3. Estudos incompletos, rascunhos, slides, artigos de revisão, enciclopédia, capítulo de livros e resumos;
IC4. Estudos aplicados na agricultura sustentável	EC4. Estudos terciários e meta-análises;
IC5. Estudos que tenham características similares com o objetivo da pesquisa	EC5. Artigos que não estejam disponíveis gratuitamente para download nos ambientes institucionais do PERIÓDICOS/UFS;

Fonte: adaptado de Oliveira, Kalid e Souza (2017).

Inicialmente, o título e resumo dos artigos eram lidos e os critérios de inclusão e exclusão aplicados. Em caso de dúvida sobre a relevância, o artigo era incluído para ser analisado na etapa seguinte.

4. Seleção por introdução e conclusão

Nessa fase, os critérios foram aplicados com base na leitura da introdução e da conclusão dos artigos selecionados da fase anterior. Quando necessária, era feita a leitura completa do artigo para melhor entendimento.

5. Avaliação da qualidade

Após aplicar os critérios de inclusão e exclusão, a fase seguinte avaliou a qualidade dos estudos, para isso, foi utilizado o questionário adaptado de Dybå e Dingsøyr (2008). As respostas foram tabuladas de forma que fosse possível comparar as respostas, discutir as divergências e, por fim, entrar em um acordo. O quadro 1.2 apresenta as questões aplicadas.

Quadro 1.2 – Questões aplicadas para análise dos artigos

Questões
1. É um artigo de pesquisa?
2. Existe uma descrição clara dos objetivos da pesquisa?
3. Existe uma descrição adequada do contexto em que o estudo foi realizado?
4. O desenho de pesquisa foi adequado para atender os objetivos da pesquisa?
5. A estratégia de seleção da amostragem foi adequada aos objetivos da pesquisa?
6. Os dados foram coletados de maneira adequada a responder as questões?
7. A análise dos dados foi suficientemente rigorosa?
8. A relação entre os pesquisadores e demais (local, objeto, espaço e etc.) foi adequadamente considerada?
9. Há uma descrição clara dos resultados?
10. O estudo possui valor para a academia ou para a indústria?

Fonte: Adaptado de DYBÅ e DINGSØYR (2008).

A partir do somatório de cada questão, que podia variar de 0 a 1, os artigos foram classificados em quatro faixas de qualidade, de acordo com a pontuação obtida, conforme apresentado no Quadro 1.3. Os artigos, com somatório classificado nas faixas Média, Alta e Muito Alta, foram encaminhados para a fase de extração, os demais foram desconsiderados.

Quadro 1.3 – Faixa de qualidade para os artigos

Baixa	Média	Alta	Muito Alta
--------------	--------------	-------------	-------------------

$0 \leq N \leq 2,9$	$3 \leq N \leq 5,9$	$6 \leq N \leq 8,9$	$9 \leq N \leq 10$
---------------------	---------------------	---------------------	--------------------

Fonte: adaptado de Oliveira, Kalid e Souza (2017).

6. Extração

Essa fase consiste na extração de dados dos artigos que passaram pelo critério de qualidade. O processo consistiu na retirada de informações de forma estruturada, utilizando uma planilha do Microsoft Excel (2013). Nesse sentido, extraiu-se os dados de publicação (referência), contexto (tipo de estudo, métodos de pesquisa, análise dos dados).

CO₂

7. Síntese

O primeiro passo da síntese e análise dos dados foi a construção de uma nuvem de palavras com base nos títulos dos artigos analisados, como forma de demonstrar a frequência e a importância das palavras destacadas no contexto da pesquisa. Para isso, foi utilizado o programa *WordCloud* versão 2003 desenvolvido pela © *Zygomatic*. O outro ponto foi a resposta para o questionamento levantado: “O que se sabe sobre os desafios e limitações para incorporação da EC na gestão dos resíduos da agroindústria/agricultura?”.

Essa fase ocorreu em paralelo as demais fase, com uma abordagem qualitativa, o estudo se resume a inclusão de evidências extraídas nos artigos primários e secundários incluídos nesta pesquisa. O estudo conduziu uma síntese e análise temática dos dados conforme processo recomendado por Cruzes e Dybå (2011). Para ajudar nesse processo foi utilizada também o Microsoft Excel (2013).

1.3 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados da revisão sistemática sobre economia circular e sua aplicação na produção de biocarvão a partir de resíduos agrícolas e agroindustriais. Os resultados são divididos em duas partes: uma visão geral dos artigos analisados, com dados

quantitativos e metodológicos, e um mapeamento das evidências extraídas, que inclui uma nuvem de palavras e a resposta à questão de pesquisa. O apêndice A traz um quadro geral sobre os artigos utilizados e as extrações feitas para responder à questão.

1.3.1. Visão geral dos artigos

A partir das buscas efetuadas nas bases de dados (*Scopus*, *Scielo*, *Science Direct* e *Spring*) foram obtidos 323 artigos provenientes da busca manual. O Quadro 1.4 aponta a quantidade de artigos encontrados por plataforma e as palavras-chaves utilizadas para o levantamento. O termo “*family farming*” foi utilizado em conjunto com as demais palavras-chaves, mas foram obtidas zero pesquisas.

Quadro 1.4 – Quantitativo de artigos selecionados por base de dados

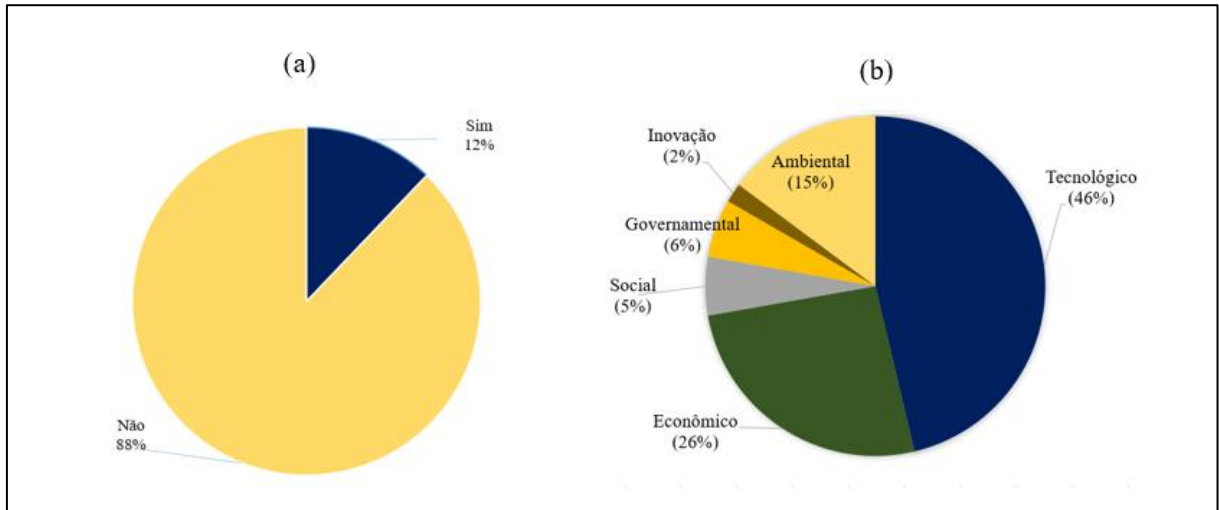
Base de dados	Palavra-Chave	Qtd. de artigos
<i>Science Direct</i>	“Circular economy” and “agriculture” and “biochar” “Carbon credit” and “Carbon sequestration” and “2nd generation biofuel”	232
<i>Scopus</i>	“Circular economy” and “organic waste” and “biochar” and “Sustainable Agriculture” and “Carbon sequestration” and “2nd generation biofuel”	42
<i>Scielo</i>	“Circular economy” and “Sustainable Agriculture” and “Carbon sequestration” and “2nd generation biofuel”	44
<i>Spring</i>	Circular economy and “Sustainable Agriculture” and “Carbon sequestration” and “2nd generation biofuel”	5
Total		323

Organização: Autor, 2024.

A partir dos 323 artigos iniciais, a seleção por título e resumo reduziu o número para 109, focados em economia circular, agricultura sustentável e biocarvão. A aplicação dos critérios de inclusão e exclusão (Quadro 1.1) resultou na exclusão de 86 artigos. A avaliação da qualidade eliminou um artigo com pontuação abaixo de 2.9.

Após a exclusão de 54 artigos, a seleção final resultou em 33 estudos. A distribuição por plataforma revelou o seguinte cenário: ScienceDirect (57,6%), Scopus (24,2%), Springer (15,2%) e Scielo (3%). Para evitar distorções, artigos duplicados foram removidos durante a busca manual. A análise dos 33 artigos (Figura 1.1) identificou pesquisas sobre agricultura familiar e os principais temas abordados: tecnológico, econômico, governamental, social, inovação e ambiental.

Figura 1.1 – (a) Pesquisas que abordaram a agricultura familiar. (b) Aspectos abordados nos artigos

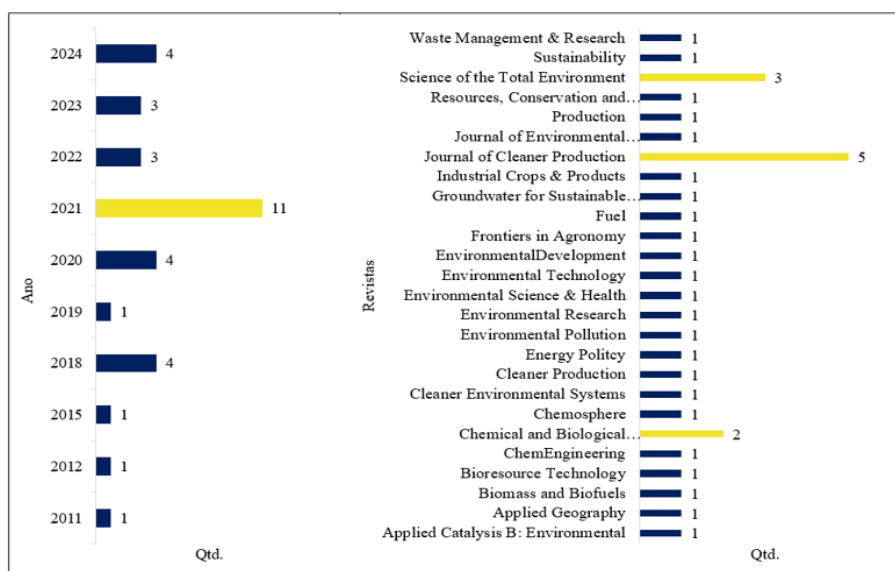


organização: Autor, 2024.

O gráfico (a) revela uma lacuna significativa: apenas 12% das pesquisas abordam a agricultura familiar, apesar de esta representar 77% das propriedades agrícolas no Brasil (Ministério da Agricultura, 2022). O gráfico (b) mostra que os estudos sobre economia circular no setor agrícola focam predominantemente em aspectos tecnológicos e econômicos, negligenciando a inovação e as dimensões governamental, social e ambiental. Estudos como o de Zabaniotou *et al.* (2015) destacam o potencial da economia circular para fortalecer o tecido social agrícola, gerar empregos e promover a sustentabilidade.

O período de 2011 a 2024 foi escolhido para a extração dos artigos, abrangendo 13 anos de intensa produção científica global. Este intervalo coincide com a publicação dos relatórios "Em direção a uma economia circular" pela *Ellen MacArthur Foundation*, marco fundamental na disseminação do tema (Azevedo, 2015). A Figura 1.2 apresenta a distribuição dos artigos selecionados por ano e revista. Notavelmente, não foram encontrados artigos que atendessem aos critérios de seleção nos anos de 2013, 2014, 2016 e 2017.

Figura 1.2 – Artigos selecionados por ano e quantitativo por revista



Organização: Autor, 2024.

Ao observar o quantitativo de publicações por ano, o destaque vai para 2021 com 11 artigos. Uma possibilidade para o alto número de publicações nesse ano em específico, seria devido a pandemia de COVID-19, onde as questões ambientais se tornaram relevantes e os impactos ambientais causados pela humanidade foram mais discutidos. Para exemplificar, Sánchez *et al.* (2023), colocam que a situação causada pela pandemia de COVID-19 levanta a necessidade restaurar as economias, principalmente nos países em desenvolvimento, logo a EC deve criar maneiras para conseguir alcançar esses objetivos socioambientais, econômicos e principalmente ligados a emissão de poluentes.

Outro motivo é a concentração de pesquisas com foco na gestão dos resíduos urbanos, industrial e civil, explicando a menor atenção aos resíduos agrícolas. Este último, embora responsável por 24% das emissões de GEEs (Yrjälä *et al.*, 2022), concentra-se na devolução de embalagens de agrotóxicos, negligenciando o tratamento da biomassa descartada. A escassez de pesquisas sobre economia circular e agricultura sustentável, com foco em biocombustíveis de 2ª geração, revela uma lacuna, dada a relevância do impacto ambiental desses resíduos.

Na análise das revistas, o destaque de publicações vai para o *Journal of Cleaner Production* (5), com as seguintes pesquisas: construção de um ecossistema circular na agricultura de comunidades rurais (Aguinaga, 2018); já na pesquisa de Antoniou (2019), é feita uma proposta de gestão para os resíduos agrícolas mistos por meio da abordagem sistêmica; na terceira é vista a viabilidade financeira na pirólise dos resíduos plásticos da produção agrícola (Rentizelas, 2018); a pesquisa de Rashid e Shahad, (2021), são trabalhados indicadores da EC

na gestão dos resíduos alimentares; e por fim é analisado o potencial com o sequestro de carbono pela produção de biocarvão (Forfora *et al.*, 2024).

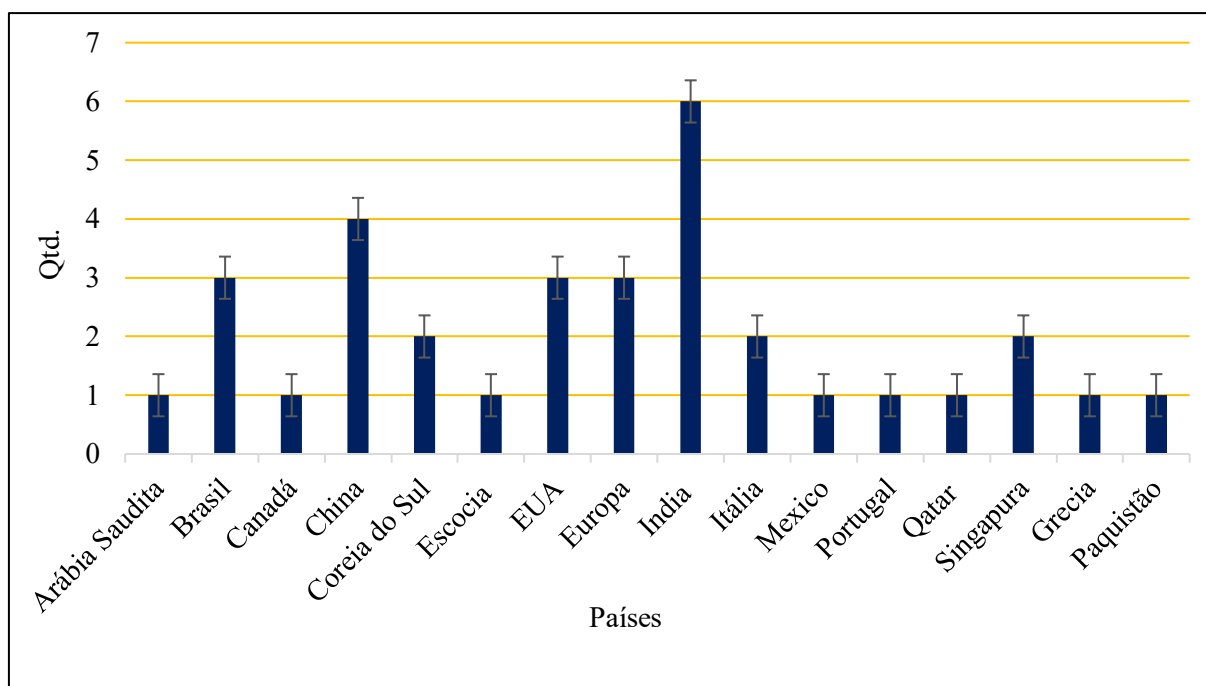
Nesse sentido, o *Journal of Cleaner Production* tem como escopo a apresentação de soluções que focam em tecnologias limpas de produção que tragam benefícios positivos para o meio ambiente. Além disto, entre as cinco pesquisas publicadas no jornal, apenas uma trabalhou a agricultura familiar.

No mais, as leituras dos artigos esclareceram que nos países desenvolvidos o movimento de articulação para a EC possui uma base sólida, na parte legislativa, tecnológica e econômica em comparação aos países em desenvolvimento. No Brasil as principais fontes de incentivo para EC e gestão de resíduos sólidos são a Lei 12.305 (Brasil, 2010) que dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que reforça a necessidade de reutilização, reaproveitamento e reciclagem com objetivo de maximizar os ganhos ambientais, econômicos e sociais com os resíduos e o Decreto 12.082 (Brasil, 2024) que institui a Estratégia Nacional de Economia Circular na garantia para um modelo de produção sustentável.

Outro ponto identificado é a necessidade de aproximação com a agricultura familiar, comunidades, associações, cooperativas que, muitas vezes, não tem acesso a essas tecnologias ou suporte financeiro para introdução da tecnologia. Entretanto, a EC possui ferramentas acessíveis que podem ser usadas no planejamento de modelos sustentáveis de produção, compreendendo as limitações e buscando tecnologias acessíveis que possam ser usadas em cada localidade.

Com relação a localidade dos estudos, a Figura 1.3 destaca os países onde as pesquisas foram realizadas, com destaque para a Índia (6), China (4), Brasil (3), EUA (3), Europa (3), Coreia do Sul (2), Itália (2), Singapura (2), Arábia Saudita (1), Canadá (1), Escócia (1), Grécia (1), México (1), Paquistão (1), Portugal (1) e Qatar (1). Como fonte de esclarecimento e distinção, os estudos que foram enquadrados na Europa faziam uma análise mais geral sobre os aspectos da EC e da gestão dos resíduos da agricultura em diversas localidades da União Europeia, se caracterizando por uma análise de grupo de países.

Figura 1.3 – Países onde ocorreram as pesquisas



Organização: Autor, 2024.

No Brasil já se consegue identificar oportunidades com modelos de negócios que trabalham com a EC: no setor de design e recuperação de materiais com a engenharia reversa, reciclagem, reuso e manufatura; eletrônico, com a transformação de materiais em novos serviços; construção civil, com redução e reaproveitamento dos materiais; têxtil e confecções, com a criação de uma cadeia circular de valor; e agropecuário com técnicas de reuso para água e energias renováveis, como a solar, biodigestores, eólica e biomassa (BRASIL, 2021).

O Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (BRASIL, 2021), reforça que a transição para EC irá permitir que o setor agropecuário e a indústria alcancem certificações nacionais e internacionais (barreiras não alfandegárias e certificações socioambientais) na comercialização de produtos e serviços em novos mercados, atraindo investimentos e gerando empregos, além de reduzir custos de operação e melhoria de indicadores de qualidade ambiental.

No aspecto metodológico, foram dezesseis artigos com características qualitativas, seis quantitativas e onze quali-quantitativas. Em relação aos procedimentos e técnicas, foram considerados estudos bibliográficos (18), estudo de caso (9), experimental (3), documental (2) e pesquisa ação (1). Ao analisar os estudos, percebe-se uma tendência para análises mais

técnicas dos bioprodutos (biocarvão, gás de pirólise e bio-óleo), com a verificação da característica química e física, vale ressaltar que esses pontos são de fundamental importância para alcançar modelos sustentáveis de produção, contudo não se pode excluir os aspectos sociais e ambientais. Uma alternativa na construção da EC é o “sequestro de carbono”, nessa vertente, os estudos de Resende *et al.*, (2011) trazem as aplicações do biocarvão como solução para as emissões de gases do efeito estufa, como o CO₂.

Corroborando com essa visão econômica, em 2015 o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD elaborou novos objetivos e metas a serem cumpridos até 2030, onde emerge os “Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS”, neste documento estão elencados 17 objetivos e 169 metas específicas para alcançar o desenvolvimento sustentável. Trazendo a temática dos ODS para a discussão dos resíduos da agricultura/agroindústria, o objetivo 2 que aborda “fome zero e a agricultura sustentável” e o 12 que trata de “assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis” (ONU, 2015).

Neste contexto, a contribuição para os ODS 2 e 12 na agricultura/agroindústria, seria pela produção de biocombustíveis de 2ª geração (biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise), permitindo o cultivo em áreas com grande deficiência hídrica e solo pobre em nutrientes, aumentando a oferta de alimentos para consumo e venda pelos agricultores. Igualmente, iria assegurar um padrão de produção e consumo sustentável pelo aproveitamento dos resíduos gerados pelo processo de colheita e beneficiamento, criando uma agricultura sustentável. Além disto, a utilização do biocarvão promove a descarbonização, impedindo que seja lançado na atmosfera.

Outro debate importante ocorreu na 27ª Conferência da ONU para Mudanças Climáticas (COP-27), que enxerga a urgência da segurança alimentar e o combate à fome, já que os sistemas agrícolas sofrem com os impactos causados pelas mudanças no clima. A reunião gerou um Plano de Implementação de Sharm Al Sheik que inclui a restauração, pagamento de serviços ambientais, conservação e proteção de água doce, reconhecimento do potencial da biodiversidade e o reforço no incentivo a transição para uma economia de baixo carbono e uso de energias renováveis (ONU, 2022).

Neste contexto, a contribuição para as questões levantadas na COP-27 sobre segurança alimentar e combate à fome, seriam os biocombustíveis de 2ª geração, a partir da massa residual das culturas, permitindo que atividades agrícolas ocorressem em condições com baixa qualidade, aumentando a oferta de alimentos para consumo e venda pelos pequenos(as) agricultores(as).

Além disto, a utilização do biocarvão funciona como um mecanismo que sequestra carbono, impedindo a emissão de gases do efeito estufa, sendo ele armazenado no solo em uma forma mais estável. No entanto, na COP-27 em sentido oposto ao que ciência alerta, não aconteceu nenhuma mudança em relação ao uso de combustíveis fósseis ou processo de descarbonização, mesmo assim no artigo 6 que trata sobre o mercado de carbono houve alguns avanços que tratam sobre os critérios de adicionalidade e integridade, com a inclusão de disposições para monitoramento, permanência e revisões livres na atmosfera.

Em suma, as pesquisas destacaram a importância EC para resíduos agroindustriais/agrícolas, focando na sustentabilidade e na adoção de tecnologias para os biocombustíveis de 2ª geração. Na etapa seguinte, construiu uma nuvem de palavras a partir dos títulos dos artigos e mapeou as evidências para responder à questão central: Quais são os desafios e limitações para incorporar a EC na gestão dos resíduos agroindústria/agricultura?

Quadro 1.5 – Evidências extraídas nos artigos sobre os desafios e limitações para EC

Artigos	Evidências extraídas por ocorrência													
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14
A2	x	x	x	x	x									
A3					x					x				
A5				x		x	x	x			x			
A8							x	x						
A9				x		x								
A10								x				x		
A11							x				x			
A12				x		x			x		x			
A14				x										
A15				x						x				
A17				x				x	x		x			
A19	x			x	x							x		
A22				x		x		x						
A23						x		x			x			
A43	x							x					x	
A44				x		x		x		x	x		x	
A46		x		x		x				x				x
A47		x		x						x		x		
A48		x		x										
A49		x		x				x						
A50		x												
A51		x												
A54		x			x			x					x	
A61		x	x					x						
A62						x		x						x
A63				x									x	
A64			x			x		x				x		
A66	x	x											x	
A67		x	x	x		x		x						
A68						x		x					x	
A69	x	x				x								
A70			x	x										
A71				x		x		x		x				

(E1) Falta de padrão para regularização; (E2) Emissão de poluentes CO₂, CH₄; (E3) Necessidade de documentos na literatura; (E4) Adoção de pesquisas em inovação e tecnologia; (E5) Explorar os resultados nas diversas aplicações; (E6) Ausência de políticas públicas; (E7) Aplicação em comunidades carentes; (E8) Aspecto financeiro; (E9) Dimensão territorial e transporte; (E10) Modificação dos resíduos; (E11) Consciência sociocultural; (E12) Necessidade de aproveitamento energético; (E13) Sustentar a quantidade de produção; (E14) Compreender o potencial dos solos.

Fonte: A2 (Hu *et al.*, 2020); A3 (Lee, 2021); A5 (Aguinaga, 2018); A8 (Velden *et al.*, 2022); A9 (Antoniou *et al.*, 2019); A10 (Sridhar *et al.*, 2021); A11 (Rentizelas *et al.*, 2018); A12 (Morias Lima *et al.*, 2021); A14 (Arora *et al.*, 2021); A15 (Fontes *et al.*, 2021); A17 (Duan *et al.*, 2020); A19 (Jindo *et al.*, 2020); A22 (Adami e Schiavon, 2021); A23 (Rashid e Shahad, 2021); A43 (Galinato *et al.*, 2011); A44 (Barrow, 2012); A46 (Sroufe e Watts, 2022); A47 (Ravindra *et al.*, 2019); A48 (Gross *et al.*, 2022); A49 (Shin *et al.*, 2021); A50 (Mona *et al.*, 2021); A51 (Abdelaal *et al.*, 2020); A54 (Forfora *et al.*, 2024); A61 (Kumar *et al.*, 2024); A62 (Lyu *et al.*, 2024); A63 (Singh e Verna, 2022); A64 (Yrjala *et al.*, 2022); A66 (Zabaniotou *et al.*, 2015); A67 (Kurniawan *et al.*, 2023); A68 (Ngoc-Dan Cao *et al.*, 2022); A69 (Enaime *et al.*, 2023); A70 (Jindo *et al.*, 2020); A71 (Fytili e Zabaniotou, 2018).

Observando os desafios e limitações para introdução da EC na gestão dos resíduos da agroindústria/agricultura, alguns se destacaram mais, dentre eles temos: a adoção de pesquisas em inovação e tecnologias (E4), aspecto financeiro (E8), ausência de políticas públicas (E6) e conversão de poluentes emitidos (E2).

Nesse cenário, ao comparar os resultados do Quadro 1.5 com a Figura 1.1 referente ao gráfico b, mostra que a evidência extraída E4 corrobora com a ausência de pesquisas no aspecto inovação (2%). No mais, apesar do aspecto tecnológico aparecer em 1º lugar no gráfico b, o principal desafio evidenciado é realizar a introdução de tecnologias sustentáveis, mais a questão financeira (E8) como barreira na compra de equipamentos e investimentos em pesquisa.

Dessa maneira, a resposta para introdução de tecnologias na transformação da biomassa em biocombustíveis de 2ª geração está na evidência (E6) com incentivos financeiros pelos governos, por meio, das políticas públicas que busquem o beneficiamento de pequenos(as) agricultores(as) organizados em cooperativas ou associações. Ademais, outro fator que os estudos de Enaime *et al.* (2023), demonstraram é que muitas pesquisas com biocarvão até o momento são executadas em escala laboratorial.

Dentro desse panorama no Brasil até o momento existe apenas uma fábrica em funcionamento na cidade de Lajinha (MG), e outra em processo de finalização da construção em São João do Manhuaçu (MG), onde o gerenciamento é feito pela empresa francesa NetZero, além do Brasil a empresa possui mais duas fábricas em Nkongsamba e Camarões. A Netzero ainda busca reduzir a pegada de carbono utilizando o biocarvão na agricultura sustentável. A biomassa utilizada para produção de biocarvão é proveniente da cultura de café, produzido pelos agricultores da Cooperativa de Cafeicultores da Região de Lajinha – COOCAFÉ (Netzero, 2023).

Na questão ambiental o desafio é evitar a emissão de poluentes (E2) na atmosfera gerados pelas atividades antrópicas, em específico os resíduos da agricultura/agroindústria. No Quadro 1.4 a emissão de poluentes (E2) ficou na 4ª posição de desafios e limitações, na visão de Adami e Schiavon (2021), a questão ambiental é colocada em segundo plano, ficando visível em um primeiro momento a busca por soluções que visam o aspecto financeiro, com lucros para empresas e governos. Kurniawan *et al.* (2023) sugere que, o sequestro de CO₂ pode ajudar na meta de redução da temperatura do planeta em 1,5 °C.

A questão de transporte, território, solo (E9, E13 e E14), consciência sociocultural (E11) e aplicação em comunidades carentes (E7) são outros fatores importantes para chegar na

economia circular. Dessa maneira, Lyu *et al.* (2024) afirmam que o rápido crescimento populacional e o desperdício de produção têm afetado o aumento de resíduos, de modo que o volume de desperdício previsto para 2030 é de $4,8 \times 10^9$ toneladas. Outro ponto é que as escolhas de compra ditam o sistema de produção agrícola (Sroufe e Watts, 2022).

Da mesma forma, na visão de Lima *et al.* (2021), a localização e as características físicas influenciam o potencial do território, por exemplo, áreas urbanas e rurais desempenham papéis diferentes em sua estrutura. Na questão do transporte se torna um desafio pela menor densidade de massa (resíduo processado) e fontes dispersas, agravado pela degradação da biomassa. Para tanto, é preciso estudar as características do local de aplicação do biocarvão e rotas que proporcionem melhores condições para biomassa coletada.

Para autores como Rashid e Shahad (2021), os principais obstáculos para EC na gestão dos resíduos são fatores econômicos, socioculturais e institucionais. Como resposta para esses obstáculos Aguinaga (2018) sugere que, uma abordagem de governança ascendente seja criada na construção de um *circular value ecosystem* (CVES), que advém sua produtividade da contribuição de comunidades regionais (cooperativas e associações).

No caso de comunidades, que são formadas por agricultores familiares a renda costuma ser inferior a um salário-mínimo, o que torna difícil escapar da pobreza pela baixa capacidade de produção e pouco capital (Velden *et al.*, 2022). Nesse aspecto, a EC baseada na produção de biocombustíveis de 2ª geração permitiria o aumento na renda desses agricultores(s), no mais, Rentizelas *et al.* (2018) reforçam que pode ocorrer impactos positivos na dimensão social da sustentabilidade, pelo aumento de emprego e renda para os pequenos(as) agricultores(as).

Na pesquisa de Hu *et al.*, (2020), o desafio consiste na pouca literatura documentada (E3) e um padrão de regulamentação (E1) para o biocarvão. Nesse quadro, faltam padrões adequados em nível nacional na maioria dos países para regulamentar o seu uso, criando uma barreira para sua adoção generalizada como condicionador de solo. Dessa maneira, se faz preciso pesquisas que façam análises de modificação e aplicação do biocarvão, com a finalidade de beneficiamento econômico e incentivo a geração de lixo zero.

Em nível Brasil, em apoio a EC temos o RenovaBio como fonte regulamentadora na produção de biocombustíveis. O órgão é responsável por estabelecer metas anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, de modo, que incentive o aumento na produção e participação de biocombustíveis na matriz energética de transporte no país.

O RenovaBio juntamente com a Política Nacional de Biocombustíveis (Lei 13.576/2017) busca os seguintes objetivos: fornece contribuições para o compromisso determinado pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris; promove a adequação e expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com foco na regulamentação; e assegura previsibilidade para o mercado de biocombustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissão de gases causadores do efeito estufa (Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020).

Outro fator observado foi a modificação dos resíduos (E10) e necessidade de aproveitamento energético (E12). Lee (2021) enfatiza que estudos futuros podem explorar a modificação do biocarvão para melhorar o gás de pirólise, e que o bio-óleo pode ser examinado para recuperação de nutrientes. O aproveitamento energético é outro desafio na construção da EC, para Yrjala *et al.* (2022) o caminho para neutralidade na produção de carbono está ligado a soluções sustentáveis no aproveitamento dos resíduos, seguindo esse mesmo pensamento Sridhar *et al.* (2021), colocam que o aspecto energético precisa ser avaliado criticamente para gestão eficiente da massa residual.

Diante do exposto, a persistência dos desafios e limitações contribui para o reforço do modelo de economia linear, perpetuando o consumo e o descarte irregular dos resíduos agrícolas no meio ambiente. Nesse contexto, a produção de biocombustíveis de segunda geração emerge como uma solução viável para mitigar os impactos ambientais, especialmente aqueles ocasionados pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEEs) provenientes das atividades da agricultura e agroindústria.

1.4 Considerações Finais

A busca por um modelo circular de produção tem se tornado o objetivo de diversos países, entretanto os padrões de consumo praticados se colocam como a principal barreira para alcançar esse objetivo. Na agricultura o processo é baseado no cultivo, colheita, beneficiamento, venda e disposição final (aterros sanitários, controlados e lixões). As consequências desse padrão de consumo é a emissão de GEEs.

Nessa vertente, as pesquisas utilizadas na revisão sistemática conseguiram passar uma visão sobre os desafios e limitações para introdução da EC na gestão dos resíduos da agricultura. Conseguindo traçar quais os aspectos mais vistos em pesquisas que trabalharam a agricultura

sustentável, EC, biocombustíveis de 2º geração e sequestro de carbono. Sendo o aspecto tecnológico o foco de pesquisas na produção dos biocombustíveis.

Os estudos apontaram a necessidade de participação dos pequenos(as) agricultores(as) em pesquisas que trabalhem a EC na gestão dos resíduos da colheita e beneficiamento das culturas. Sendo a justificativa, que os pequenos(as) agricultores(as) são responsáveis pelo maior número de estabelecimentos com a finalidade de produção e consequentemente geração de resíduos (Ministerio da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2022), demonstrando a necessidade de trabalhos que foquem no aspecto tecnológico, voltado para os pequenos(as) agricultores(as).

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

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

A luz disto, implementação da EC enfrenta desafios e limitações, conforme evidenciado no quadro 1.5. Entre eles, destacam-se a necessidade de pesquisa em inovação e tecnologia, apoio financeiro, políticas públicas eficazes e a mitigação da poluição agrícola. Nesse contexto, o fortalecimento, incentivo e regulamentação dos biocombustíveis de 2ª geração surgem como uma resposta promissora para a construção de uma agricultura sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABDELAAL, A.; PRADHAN, S.; ALNOUSS, A.; TONG, Y.; AL-ANSARI, T.; MCKAY, G.; MACKEY, H. R. **The impact of pyrolysis conditions on orange peel biochar physicochemical properties for sandy soil.** *Waste Management & Research*, 39 (7), 995-1004. 2021. <https://doi.org/10.1177/0734242X20978456>
- ADAMI, L.; SCHIAVON, M. **From circular economy to circular ecology: a review on the solution of environmental problems through circular waste management approaches.** *Sustainability*, 13(2), 925. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13020925>
- AGENCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **RenovaBio**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 3 de abril de 2023.

AGUIÑAGA, E.; HENRIQUES, I.; SCHEEL, C.; SCHEEL, A. **Building Resilience: A Self-Sustaining Community Approach to the Triple Bottom Line.** *Journal of Cleaner Production* , 173 , 186-196. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.094>

ANTONIOU, N.; MONLAU, F.; SAMBUSITI, C.; FICARA, E.; BARAKAT, A.; ZABANIOTOU, A. **Contribution to Circular Economy options of mixed agricultural wastes management: Coupling anaerobic digestion with gasification for enhanced energy and material recovery.** *Journal of Cleaner Production* , 209 , 505-514. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.055>

ARORA, S.; JUNG, J.; LIU, M.; LI, X.; GOEL, A.; CHEN, J.; WANG, C. H. **Gasification biochar from horticultural waste: An exemplar of the circular economy in Singapore.** *Science of the Total Environment* , 781 , 146573. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146573>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (Brasil). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2022.

AZEVEDO, J. L. **A Economia Circular Aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa.** In *XI Congresso Nacional de Excelência em gestão* (Vol. 13), 2015. ISSN CNEG: 1984-9354

BARROW, C. J. **Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture.** *Geografia Aplicada*, 34, 21-28. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.09.008>

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União.** 2010.

BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024. *Dispõe sobre a criação de grupos de trabalho para a política de inclusão social.* Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 162, n. 122, p. 3-4, 28 jun. 2024.

CIRCULAR, I. **Economia circular.** Recuperado em 15. 2017.

CRUZES, D. S.; DYBÅ, T. **Recommended steps for thematic synthesis in software engineering.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMPIRICAL SOFTWARE ENGINEERING AND MEASUREMENT, 5., 2011, Banff, Canada. Proceedings Banff: IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/ESEM.2011.36>

DUAN, Y.; PANDEY, A.; ZHANG, Z.; AWASTHI, M. K.; BHATIA, S. K.; TAHERZADEH, M. J. **Organic solid waste biorefinery: Sustainable strategy for emerging circular bioeconomy in China.** *Culturas e produtos industriais*, 153, 112568. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112568>

DYBÅ, T.; DINGSØYR, T. **Empirical studies of agile software development: a systematic review**. *Information and Software Technology*, v. 50, n. 9, p. 833-859, 2008.

ENAIME, G.; WICHERN, M. e LÜBKEN, M. **Contribution of biochar application to the promotion of circular economy in agriculture**. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1214012, 2023. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1214012>

FYTILI, D. e ZABANIOTOU, A. **Circular economy synergistic opportunities of decentralized thermochemical systems for bioenergy and biochar production fueled with agro-industrial wastes with environmental sustainability and social acceptance: a review**. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 5, 150-155, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40518->

FONTES, A. V.; JOÃO, I. M.; SILVA, J. M. **Multicriteria evaluation of biomass residues in Portugal to second generation bioethanol production**. *Produção*, 31. 2021. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210060>

FORFORA, N.; AZUAJE, I.; VIVAS, K. A.; VERA, R. E.; BRITO, A.; VENDITTI, R.; GONZALEZ, R. **Evaluating biomass sustainability: Why below-ground carbon sequestration matters**. *Journal of Cleaner Production*, 439, 140677, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140677>

FOSTER, A., ROBERTO, S.S.; IGARI, A.T. **Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica**. *Anais do Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*. São Paulo. 2016. ISSN: 2359-1048

GALINATO, S. P.; YODER, J. K.; GRANATSTEIN, D. **The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration**. *Política energética*, 39 (10), 6344-6350. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.035>

GOHR, C. F.; SANTOS, L. C.; GONÇALVES, A. M. C.; PINTO, N. O. **Um método para a revisão sistemática da literatura em pesquisas de Engenharia de Produção**. In: XXXIII ENEGEP. Anais. Salvador, 2013. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6101182/mod_resource/content/0/artigo%20sobre%20revis%C3%A3o%20sistem%C3%A1tica%20de%20literatura.pdf.

GROSS, C. D.; BORK, E. W.; CARLYLE, C. N.; CHANG, S. X. **Biochar and its manure-based feedstock have divergent effects on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in croplands**. *Science of the Total Environment*, 806, 151337. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151337>

HU, Q.; JUNG, J.; CHEN, D.; LEONG, K.; SONG, S.; LI, F.; WANG, C. H. **Biochar industry to circular economy**. *Science of The Total Environment*, 757, 143820. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>

JINDO, K.; AUDETTE, Y.; HIGASHIKAWA, F. S.; SILVA, C. A.; AKASHI, K., MASTROLONARDO, G.; MONDINI, C. **Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K**

cycles. *Tecnologias Químicas e Biológicas na Agricultura*, 7, 1-12. 2020.
<https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>

JINDO, K.; AUDETTE, Y.; HIGASHIKAWA, F. S.; SILVA, C. A.; AKASHI, K., MASTROLONARDO, G.; MONDINI, C. **Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: A review of the functions of biochar in growing media, composting and as a soil improver.** *Tecnologias Químicas e Biológicas na Agricultura*, 7, 1-12. 2020.

KUMAR, A.; BHATTACHARYA, T.; SHAIKH, W. A.; BISWAS, J. K. **Valorization of invasive plant and leaf litter wastes into biochar: Production, properties and potential for arsenic removal.** *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101066, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101066>

KURNIAWAN, T. A.; OTHMAN, M. H. D.; LIANG, X.; GOH, H. H.; GIKAS, P.; CHONG, K. K.; CHEW, K. W. **Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality.** *Journal of environmental management*, 332, 117429, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117429>

LEE, J. T.; OK, Y. S.; SONG, S.; DISSANAYAKE, P.D.; TIAN, H.; TIO, Z.K.; TONG, Y.W. **Biochar utilisation in the anaerobic digestion of food waste for the creation of a circular economy via biogas upgrading and digestate treatment.** *Bioresource technology*, 333, 125190. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125190>

LYU, H.; LIM, J. Y.; ZHANG, Q.; SENADHEERA, S.; ZHANG, C.; HUANG, Q.; OK, Y. S. **Conversion of organic solid waste into energy and functional materials using biochar catalyst: Bibliometric analysis, research progress, and directions.** *Applied Catalysis B: Environmental*, 123223, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2023.123223>

MEDEIROS, J. D. R. V.; ALVES, D. C.; VASCONCELOS, A. M. L.; SCHUENEMANN, C. T. L. L. S.; WANDERLEY, E. **Engenharia de requisitos em projetos ágeis: uma revisão sistemática da literatura.** *Revista Pincipia*. 2015. <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n28p11-24>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (Brasil). **Agricultura Familiar.** Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em: 18 de outubro de 2022.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (Brasil). **Rota da Economia Circular. Brasília.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-regional/rotas-de-integracao-nacional/rota-da-economia-circular>. Acesso em: 3 de abril de 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília. 2022.

MONA, S.; MALYAN, S. K.; SAINI, N.; DEEPAK, B.; PUGAZHENDHI, A.; KUMAR, S. **Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar.** *Chemosphere*, 275, 129856. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856>

MORIAS LIMA, P.; DE MORAIS, M. F.; CONSTANTINO, M. A.; PAULO, P. L.; MAGRALHÃES FILHO, F. J. C. **Environmental assessment of waste handling in rural Brazil: Improvements towards circular economy.** *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100013. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100013>

MICROSOFT Project for Windows 2013. Versão 4.1. [S. l.]: Microsoft Corporation, 2013.

NETZERO (França). **Você sabe quem é a NetZero?** Minas Gerais. 2023. Disponível em: <https://www.instagram.com/p/CpP2yAGu9kL/?igsh=cmM4anNwcWtnenF2>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2024.

OLIVEIRA, G. F.; KALID, R. A.; SOUZA, M. E. **O Conceito Enade no Âmbito das Pesquisas Acadêmicas sobre os Cursos de Engenharia de Produção.** XXXVII ENEGEP, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** ODS, p. 31, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das Partes - COP27.** 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/205377-cop27-tr%C3%AAs-maneyras-de-conter-erise-clim%C3%A1tica-e-diminuir-fome>. Acesso em: 23 de março de 2023.

PIRES, I. C. G., FERRÃO, E. G. **Compostagem no Brasil sob a perspectiva da legislação ambiental.** *Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas* 9: 1–18. 2017. <https://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/ccaatropica/article/view/5685/4110>

RASHID, M. I.; SHAHZAD, K. **Food waste recycling for compost production and its economic and environmental assessment as circular economy indicators of solid waste management.** *Journal of Cleaner Production*, 317, 128467. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128467>

RAVINDRA, K.; SINGH, T.; MOR, S. **Emissions of air pollutants from primary crop residue burning in India and their mitigation strategies for cleaner emissions.** *Journal of Cleaner Production*, 208, 261-273. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.031>

RENTIZELAS, A.; SHPAKOVA, A.; & MAŠEK, O. **Designing an optimized supply network for the sustainable conversion of agricultural plastic waste into higher-value products.** *Journal of Cleaner Production*, 189, 683-700. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.104>

REX, P.; MOHAMMED ISMAIL, K. R.; MEENAKSHISUNDARAM, N.; BARMAVATU, P.; SAI BHARADWAJ, A. V. S. L. **Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy.** *ChemEngineering*, 7(3), 50, 2023. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>

REZENDE, E. I.; ANGELO, L. C.; DOS SANTOS, S. S.; MANGRICH, A. S. **Biocarvão (biochar) e sequestro de carbono.** *Revista virtual de química*, 3(5), 426-433. 2011. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20110046>

RUEANGSAN, K.; KRAISODA, P.; HEMAN, A.; TASAROD, H.; WANGKULANGKOOL, M.; TRISUPAKITTI, S.; MORRIS, J. **Bio-oil and char obtained from cassava rhizomes with soil conditioners by fast pyrolysis.** *Heliyon*, 7(11), e08291, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08291>

SÁNCHEZ SUÁREZ, Y.; TRUJILLO GARCÍA, L.; HERNÁNDEZ NARIÑO, A.; CUERVO SAIZ, L.; SABLÓN COSSÍO, N.; MARQUÉS LEÓN, M. **Una aproximación a la economía circular y su contribución en el contexto de la pandemia.** *Infodir*, (40), 2023. <http://scielo.sld.cu/pdf/infd/n40/1996-3521-inf40-e1336.pdf>

SANDOVAL, V.P.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. **Economía circular.** *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (15), pp.85-95. .2017.

SHIN, J.; PARK, D.; HONG, S.; JEONG, C.; KIM, H.; CHUNG, W. **Influence of activated biochar pellet fertilizer application on greenhouse gas emissions and carbon sequestration in rice (*Oryza sativa* L.) production.** *Poluição Ambiental*, 285, 117457. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117457>

SILVA, C. **Por que as empresas adotam a economia circular.** Retomada Verde. Estadão. 2020. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/infograficos/economia,por-que-mais-empresas-apostam-na-economia-circular,1117170>. Acesso em: 20 de out. de 2023.

SINGH, J. e VERMA, M. **Waste derived modified biochar as promising functional material for enhanced water remediation potential.** *Environmental Research*, 117999, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117999>

SRIDHAR, A.; KAPOOR, A.; KUMAR, P. S.; PONNUCHAMY, M.; BALASUBRAMANIAN, S.; PRABHAKAR, S. **Conversion of food waste to energy: a focus on sustainability and life cycle assessment.** *Fuel*, 302, 121069. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121069>

SROUFE, R.; WATTS, A. **athways to agricultural decarbonization: Climate change obstacles and opportunities in the US.** *Recursos, Conservação e Reciclagem*, 182, 106276. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106276>

VAN DER VELDEN, R.; DA FONSECA-ZANG, W.; ZANG, J.; CLYDE-SMITH, D.; LEANDRO, W.M.; PARIKH, P.; CAMPOS, L. C. **Closed-loop organic waste management systems for family farmers in Brazil.** *Tecnologia Ambiental*, 43 (15), 2252-2269. 2022. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1871660>

WORDCLOUD. Versão 2008. Zygomatic. 2024. Disponível em: <https://classic.wordclouds.com/>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2024.

YRJÄLÄ, K.; RAMAKRISHNAN, M.; SALO, E. **Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality.** *Current opinion*

in environmental science & health, 26, 100339, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100339>

ZABANIOTOU, A.; ROVAS, D.; LIBUTTI, A.; MONTELEONE, M. **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*, 14, 22-36, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2014.12.002>

**Agricultura no semiárido sergipano:
Análise dos aspectos produtivos e
valoração dos resíduos da
agricultura/agroindústria**

RESUMO

A economia linear, baseada na extração, transformação e descarte de materiais, gera impactos ambientais significativos. Em contrapartida, a economia circular propõe o reaproveitamento total de materiais, oferecendo uma solução sustentável. No contexto da agricultura, a biomassa pode ser convertida em biocombustíveis de segunda geração, como biocarvão e bio-óleo, promovendo a sustentabilidade do setor. Para explorar essa solução, a pesquisa identificou culturas no semiárido sergipano para a produção de biocombustíveis, utilizando pesquisa bibliográfica e documental no cálculo da massa residual, produtos da pirólise e CO₂ sequestrado no processo. Os resultados demonstraram o potencial econômico do reaproveitamento da biomassa para agricultores familiares, destacando a necessidade de uma transição para um modelo agrícola circular e sustentável. Portanto, a difusão da economia circular, por meio da produção de biocombustíveis de segunda geração, tem o potencial de impulsionar o alcance das metas propostas pelos ODS, incluindo a erradicação da fome, a promoção da agricultura sustentável e o estímulo à produção e consumo ambientalmente conscientes.

Palavra-chave: Crédito de Carbono, Resíduos da Agroindústria/Agricultura, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The linear economy, based on the extraction, transformation, and disposal of materials, generates significant environmental impacts. In contrast, the circular economy proposes the total reuse of materials, offering a sustainable solution. In the context of agriculture, biomass can be converted into second-generation biofuels, such as biochar and bio-oil, promoting the sustainability of the sector. To explore this solution, the research identified crops in the semi-arid region of Sergipe for the production of biofuels, using bibliographic and documentary research to calculate the residual mass, pyrolysis products, and CO₂ sequestered in the process. The results demonstrated the economic potential of biomass reuse for family farmers, highlighting the need for a transition to a circular and sustainable agricultural model. Therefore, the dissemination of the circular economy, through the production of second-generation biofuels, has the potential to boost the achievement of the goals proposed by the SDGs, including the eradication of hunger, the promotion of sustainable agriculture, and the encouragement of environmentally conscious production and consumption.

Key words: Carbon Credit, Agroindustry/Agriculture Waste, Sustainability.

2.1. Introdução

A economia linear (EL), ainda predominante em muitos países, baseia-se na extração, produção e descarte, resultando em exaustão de recursos e poluição (Hu *et al.*, 2021). Diante desse cenário, a economia circular (EC) emerge como solução, utilizando tecnologias e políticas públicas para promover a sustentabilidade (Sandoval; Jaca e Ormazabal, 2017). No setor agrícola, a economia circular permite o reaproveitamento da biomassa gerada na colheita e beneficiamento, transformando resíduos vegetais (folha, caule, raiz e flores, casca, caroço) em novos recursos.

Nesse intuito a EC busca a recuperação dos recursos pelo movimento de reintrodução da matéria descartada no processo de produção, sem que haja a necessidade de utilizar uma nova matéria-prima (Donia; Mineo e Sgroi, 2018). Em análise, esse modelo cria um cenário ideal para a agricultura sustentável com a utilização quase que 100% dos recursos cultivados, além de preservar a extração de novos recursos naturais, permitindo a valorização da biomassa.

A agricultura familiar, responsável pela produção de grande parte dos alimentos consumidos no Brasil, desempenha um papel crucial na construção da agricultura sustentável. Conforme o Censo Agropecuário de 2017, 77% das propriedades rurais brasileiras são classificadas como familiares, ocupando 23% da área agrícola total (Ministério da Agricultura, 2022). No entanto, muitos agricultores familiares enfrentam desafios devido à baixa aplicação de tecnologia, limitando seu potencial produtivo e econômico.

Dentro desse contexto a agricultura familiar, sendo a maior parcela dos estabelecimentos produtivos no país, gera um volume significativo de resíduos. Para otimizar o aproveitamento desses resíduos, é crucial investir em pesquisas e tecnologias que beneficiem o solo e o meio ambiente, como apontam as evidências extraídas no capítulo anterior. Nesse sentido, a promoção de práticas sustentáveis e a adoção da economia circular são diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que visam melhorar as condições de vida e reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) através de 17 objetivos e 169 metas interconectadas (ONU, 2015).

Entre os objetivos dispostos, foram identificados dois que estão alinhados com o objetivo da pesquisa na construção da agricultura sustentável: O ODS 2 – visa acabar com a fome e fornecer uma segurança alimentar e melhores condições na nutrição e a promoção da agricultura sustentável; E o outro é o ODS 12 – que busca assegurar padrões e de consumo sustentáveis (ONU, 2015). Ambos os objetivos impactam nas atividades agrícolas.

No âmbito da sustentabilidade, as Ciências Ambientais destacam o conceito do "*triple bottom line*" ou "Tripé da Sustentabilidade", que enfatiza a interconexão dos aspectos econômicos, sociais e ambientais. Este modelo busca um modo de vida sustentável, no qual o meio ambiente é utilizado como fonte de recursos de forma responsável, respeitando seus limites e otimizando o aproveitamento dos recursos extraídos (Hammer e Pivo, 2017).

Além dos três pilares exibidos, a governança pode ser vista como um quarto pilar na construção da sustentabilidade, compreendendo que é obrigação dos governos a elaboração de políticas públicas que beneficiem os diversos setores da sociedade. No que se refere aos resíduos da agricultura/agroindústria, é necessário a adoção de políticas públicas que discutam e coloquem em prática o uso de tecnologias no (re)aproveitamento da biomassa gerada, seja na produção de biocombustíveis e/ou como fonte energética.

No contexto do semiárido sergipano, uma região marcada por desafios edafoclimáticos, hídricos e alimentares, a construção de uma agricultura sustentável encontra no "Tripé da Sustentabilidade" um alicerce fundamental. Este modelo permite analisar as condições locais e buscar soluções que integrem os aspectos ambiental, social e econômico. Na presente pesquisa, o tripé é aplicado à gestão de resíduos agrícolas, visando o reaproveitamento para a produção de biocombustíveis de 2ª geração, aproveitamento energético e sequestro de carbono.

A produção de biocombustíveis de 2ª geração, a partir dos resíduos agrícolas, apresenta-se como uma estratégia eficaz para mitigar as deficiências do semiárido sergipano e proporcionar a valorização dos resíduos gerados. O descarte inadequado dessa biomassa gera um passivo ambiental significativo. No entanto, sua conversão em biocombustíveis para uso e condicionamento do solo neutraliza a emissão de gases poluentes e promove o sequestro de carbono. O biocarvão, obtido pela pirólise da biomassa em condições de baixa oxigenação (Hu *et al.*, 2021), é um exemplo promissor dessa tecnologia.

Em adição aos benefícios proporcionados pela produção do biocarvão tem-se a questão do sequestro de carbono que pode gerar benefícios econômicos e ambientais. Nas visões de Jat *et al.* (2022), o sequestro de carbono é um termo usado para indicar a quantidade de dióxido de carbono excluído da atmosfera e transformado em oxigênio, de forma natural essa técnica é feita pelas florestas, oceanos e solo.

Considerando a capacidade que o setor agrícola tem em sequestrar carbono, o aprisionamento pela produção de biocarvão pode contribuir significativamente para diminuir

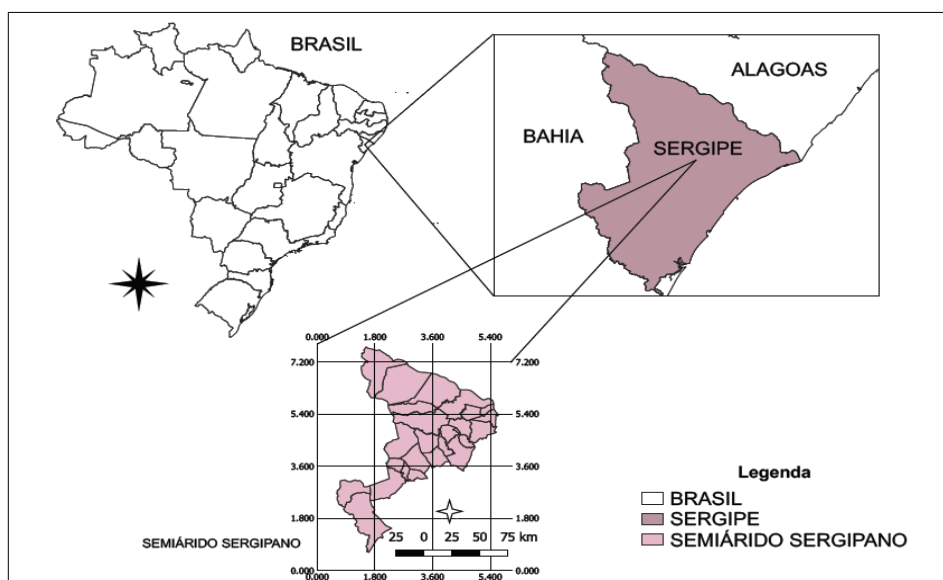
os índices de emissão de GEE. Além disso, o carbono sequestrado pode ser comercializado por meio de créditos de carbono, que representam a quantidade de carbono evitada na atmosfera.

A presente pesquisa utilizou a pesquisa bibliográfica e documental para identificar culturas no semiárido sergipano, selecionando uma para o Projeto Semiárido Forte. A pesquisa permitiu obter dados sobre a massa residual por cultura, disponibilidade hídrica, valorização do resíduo e massa de CO₂ sequestrada pela produção dos bioprodutos. Documentos, artigos e websites foram utilizados como fontes de informação para a construção da pesquisa.

2.2 Metodologia

A pesquisa abrange todo o semiárido sergipano, composto por 30 municípios (Figura 2.1) e caracterizado por problemas de deficiência hídrica, precipitações anuais muitas vezes entre 500 e 700 mm, sofrendo muita variabilidade, com apenas dois ou três meses adequados as atividades agrícolas. A metodologia da pesquisa é baseada em bibliografia (artigos, dissertações e teses) e documentos (Emdagro, Embrapa) utilizadas como base para realização dos cálculos descritos nos itens subsequentes.

Figura 2.1 – Delimitação da região semiárida no estado de Sergipe.



Organização: Autor, 2023.

Quanto a gestão dos resíduos agrossilvopastoris (RASP), o Plano Nacional para Resíduos Sólidos (PNRS), traz algumas informações importantes sobre a realidade brasileira e regiões do país, a estimativa é que sejam gerados 775 milhões de toneladas de RASP, sendo

esse valor baseado nos índices de produção agropecuária e silvicultura para o ano de 2015. Em específico, os resíduos da agricultura/agroindústria representam a maior quantidade gerada com 660 milhões de toneladas, em comparação aos da pecuária e silvicultura (Brasil, 2022).

O PNRS ainda coloca que na geração de resíduos da agricultura/agroindústria o Nordeste é o terceiro colocado com uma produção de 50 milhões de toneladas, ficando atrás apenas do Sudeste e Centro-Oeste do país. Com relação as culturas que mais produziram resíduos, se destacaram a de cana-de-açúcar 97,57%, laranja 0,86%, mandioca 0,40% e outros 1,17%.

Segundo informações analisadas pelo Observatório de Sergipe (2024), os maiores municípios em termos de produção estão localizados no semiárido de Sergipe, com produção do milho sendo o principal responsável, exceto no município de Lagarto com uma produção mais diversificada. O município de Carira em 2024 registrou R\$ 200 milhões arrecados, revezando com a cidade de Simão Dias, que é responsável por 25% do produto agrícola do estado, sendo ambas localizadas no semiárido.

No semiárido sergipano, a mandioca se destaca como uma cultura voltada para os(as) pequenos(as) agricultores(as) familiares, que trabalham de forma individual ou em cooperativas/associações. Dados de produção apontam que o estado produziu em 166.103 toneladas em 2023 e 169.142 toneladas em 2024 representando um aumento de 2% na produção (Sergipe, 2024).

A pesquisa baseou-se em pesquisa bibliográfica e documental, com a extração de dados de artigos, dissertações, teses, panoramas e websites. Essas fontes forneceram subsídios para os cálculos apresentados nas tabelas de resultados (Quadro 2.1), incluindo informações sobre o cada uma das 12 culturas identificadas no semiárido e as referências onde foram extraídas as informações.

Quadro 2.1 – Dados para os cálculos da massa residual, biocombustíveis de 2º geração, sequestro de CO₂ e monetização

Cultura	Informações	Referências
Cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	- 1 ton de caule = 0,276 ton de bagaço = 0,165 ton de folha. - Teor de carbono cana = 75% para 350 graus bagaço. - Teor do bagaço 50%. - Teor da palha sem umidade 12,7%. - Bagaço a tonelada R\$ 150. - Palha a tonelada R\$ 60,54.	Barros (2012) Casara <i>et al.</i> , (2017) Figueredo (2012) CanaOline (2022) Valverde (2022) Ely <i>et al.</i> , (2019)
Milho (<i>Zea mays</i>)	- Os valores do sabugo e palha foram extraídos da média de produção.	Vieira Jr. <i>et al.</i> , (2020)

	- O teor de umidade do sabugo de milho é muito baixo 2,5%. - O pé de milho sem espiga pesa 2.69 ton/hect - Teor de carbono = 80,1% para 400 graus espiga - Teor do sabugo + palha 34,67% - Teor do sabugo + palha sem umidade 12,96%. - O valor para o cálculo do sabugo e palha foram sacos de 200kg a R\$ 60, onde cinco sacos equivalem a 1 tonelada e 300 reais	Grutzmacher (2016) Tozatti (2013)
Mandioca (<i>Manihot esculenta c.</i>)	- Área colhida no semiárido = 821,7 hectares - 1 hectare rende 15 sacos de maniva com 25kg/cada - Maniva s/umidade 10,7% - Casca 5% - Casca s/umidade 64,6% - Bio-óleo casca e maniva 10,4% - Gás casca 21,7% - Teor de carbono 61% maniva 500 graus - O valor da maniva praticado no semiárido é de 15 reais - O valor de venda do bio-óleo é de US\$ 7.500 ou R\$ 39.075 o metro cúbico	Barati <i>et al.</i> , (2019) Cardoso (2003) Castiglioni <i>et al.</i> , (2014) Modesto Jr. (2010) Moreno Piraján & Giraldo (2010) Santana <i>et al.</i> , (2014) Silva & Murrieta (2014) O Globo (2021)
Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>)	- Peso da planta = 3.720 g - Peso seco da planta = 721,12 g - Casca representa 33,7% - Cilindro representa 6,3% - Coroa representa 5% - Área colhida = 150,4 - Média de planta/ha = 42.066 - Teor de carbono 42,91% p/ folha e casca 500 graus - Teor de umidade Casca + coroa + cilindro 8,3%	Alexandre <i>et al.</i> , (2014) Santos (2018)
Arroz (<i>Oryza</i>)	- 1 hectare é responsável pela produção de 222,5 planta/hectare - Área colhida no semiárido 671,3 - Tomando como base uma planta com 0,00005 ton - Teor de carbono 57,3% para casca a 500 graus - Planta s/umidade 27% - Casca 20% - Casca s/umidade 2,3%	Faustino (2019) Muhlen <i>et al.</i> , (2021) Muraro <i>et al.</i> , (2018) Vieira (2018) Mfrural (2022)
Banana (<i>Musaceae</i>)	- Para uma área colhida de 82,3 hectares a quantidade de coração é 246.900. - Com espaçamento de três metros entre as fileiras por três metros entre as plantas, resultando em 1,1 mil plantas por hectare. - Pseudocaule pesa de 10 a 100kg sendo utilizado o valor de 55kg como média são gerados 3 corações por bananeira - No Brasil, para cada tonelada (t) de banana produzida são gerados aproximadamente 3 t de pseudocaule e 480 Kg de folhas. - A casca da banana representa 40% - Teor de umidade da casca da banana 87,57% - Coração com média de 100g - Teor de carbono 43% para 500 graus - A única parte vendida é o coração com a unidade a R\$ 4,99	Krohl (2014) Lima <i>et al.</i> , (2012) Neves (2018) Pereira (2020) Conershop (2022)
Manga (<i>Mangifera indica</i>)	- Segundo Carvalho <i>et al</i> (2004), no processamento industrial das matérias-primas vegetais, as cascas e caroços que representam 16,0% do fruto são desprezados - Para o cálculo foi colocado que dos 16%, 4% representa a casca e 12% o caroço - Casca s/umidade 78,7%	Andrade (2015) Florêncio <i>et al.</i> , (2012) Marques <i>et al.</i> , (2010) Santos (2013)

	- Caroço s/umidade 11,23% - Teor de carbono = 45,95% para 500 graus caroço	
Batata doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	- A depender do espaçamento utilizado, as linhas duplas podem resultar em populações de até 49.600 plantas por hectare (utilizando 20 cm entre ramas). - O teor de umidade da batata-doce in natura variou de 67,21% até 76,25, para as cultivares Cuia e Amélia, - Casca 2% (ton/ano) - Casca s/umidade 61,74% (ton/ano) - teor de carbono 61% maniva 500 graus	Jesus (2017) Oliveira <i>et al.</i> , (2006)
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	- Média de vagem por pé de feijão = 18 unid - Nº de planta por hectare = 250 mil - Peso médio das vagens s/sementes = 0,0000285 ton - Área colhida semiárido = 5.959 hectares - Utilizou o teor de umidade do grão 15% - Teor de carbono = 35,47% a 500 graus casca	Bispo (2018) Lima <i>et al.</i> , (2012) Oliveira <i>et al.</i> , (2012) PAS (2019) Mondo e Nascente (2017)
Coco-da-baía (<i>Cocos nucifera</i>)	- Percentual da casca do coco = 85% - Teor de umidade da casca = 20% - Teor de carbono = 80,1% para 550 graus casca	Rosa <i>et al.</i> , (2001) Spokas (2011)
Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	- Porcentagem de cascas de 53,0% - Teor de umidade 89,09% - Teor de carbono = 18,28% a 500 graus - O cálculo da casca foi feito encima do valor de R\$ 19,80 o saco de farinha de casca com 500g	Araújo (2017) Rezende <i>et al.</i> , (2015) Mercado Livre (2022)
Laranja (<i>Citrus sinensis</i>)	- Casca, bagaço e sementes 60% - Casca, bagaço e sementes s/umidade 75,62% - Teor de carbono 42,4% a 500 graus - O cálculo utilizou como base a casca cristalizada no valor de R\$ 7,50 a quantia de 100g	Muttoni <i>et al.</i> , (2015) Quatro estrelas impório (2019)

Organização: Autor (2024).

As informações extraídas permitiram analisar os seguintes pontos: culturas e disponibilidade hídrica; massa residual por cultura; massa de CO₂ sequestrada; e monetização do resíduo produzido pelas culturas.

(a) Culturas e Disponibilidade hídrica

A identificação das culturas e da produção regional baseou-se nos documentos do Perfil da Agricultura Sergipana (PAS), utilizando as edições mais recentes (2017-2022). O PAS fornece dados detalhados sobre a produção de diversas culturas nos municípios sergipanos, permitindo a análise específica das cidades e culturas do semiárido. Após a identificação, realizou-se uma triagem para selecionar a cultura mais adequada aos objetivos do Projeto Semiárido Forte, com foco na inclusão da agricultura familiar. O estudo estimou a geração de massa residual, a produção de biocombustíveis de 2ª geração, o aproveitamento energético e o sequestro de CO₂.

A quantificação da produção por cultura, utilizou os cinco documentos mais recentes do PAS, visando minimizar o impacto das oscilações anuais na produção. A média aritmética dos dados desses documentos foi calculada para representar a produção anual média por cultura. O levantamento identificou 30 municípios e 12 culturas com potencial para o Projeto Semiárido Forte.

Como a pesquisa foi realizada no semiárido sergipano, a área se caracteriza pela deficiência hídrica, com precipitações anuais muitas vezes entre 500 e 700 mm, sofrendo muita variabilidade, com apenas dois ou três meses adequados para as atividades agrícolas. Nesse aspecto, a disponibilidade hídrica é um fator determinante para o desenvolvimento das culturas. A visualização da capacidade hídrica na região utilizou o Relatório de Atividades Anuais da EMDAGRO para o ano de 2020. O relatório traz um panorama das atividades hídricas realizadas no semiárido e outras regiões.

(b) Massa residual, CO₂ sequestrado e Monetarização

A identificação da massa residual envolveu a análise dos principais resíduos gerados, seguida pela quantificação individual de cada resíduo. Os cálculos estimados da massa residual por cultura (Eq. 1 e 2) foram realizados com base em dados de produção, percentual de resíduos, área por hectare, peso dos resíduos e área cultivada no semiárido sergipano.

$$\text{Massa Residual} = C * VPR \quad \text{Eq. 1}$$

Ou

$$\text{Massa Residual} = VPH * AS * PR \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

C = Cultura

VPR = Valor Percentual do Resíduo

VPH = Valor por Hectare

PR = Peso do Resíduo

AS = Área usada

Para a mandioca, cultura escolhida pelo projeto Semiárido Forte, os dados para o cálculo da massa residual foram obtidos por meio de visitas de campo aos municípios de Lagarto e Campo do Brito. Adicionalmente, para a produção de biocarvão, foi necessário determinar o teor de umidade da biomassa residual. Essa informação foi obtida em artigos, dissertações e teses. O cálculo da produção de biocarvão, desconsiderando a umidade, resultou em 30,8% da massa residual. Além disso, foram calculados os valores de produção de bio-óleo e gás de pirólise.

Na estimativa de CO₂ sequestrada pela produção de biocarvão foi empregado o teor de carbono a 61%, multiplicado pela massa de biocarvão dividido pela massa do carbono (0,000012 ton) e multiplicado novamente pela massa de CO₂ (0,000044 ton). A equação 3 demonstra o cálculo para massa de CO₂ sequestrada.

$$massa\ CO_2\ sequestrada\ (ton) = \left(\frac{mb * tc}{mc} \right) * massa\ CO_2 \quad Eq. 3$$

Onde:

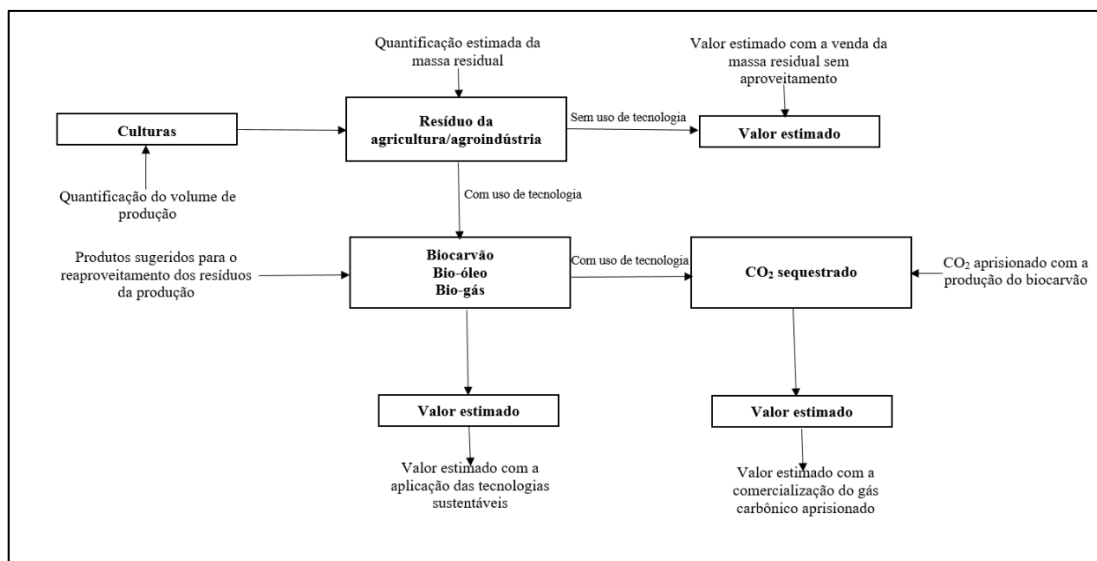
mb = massa de biocarvão (ton)

tc = teor de carbono (%)

mc = massa do carbono (ton)

Além das estimativas de massa residual, biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise, aproveitamento energético e sequestro de CO₂, a pesquisa também considerou os valores monetários para demonstrar os benefícios econômicos da incorporação de novas tecnologias no reaproveitamento da massa residual. A Figura 2.2 ilustra o processo de identificação das culturas, resíduos e reaproveitamentos aplicados na pesquisa.

Figura 2.2 – fluxograma de estimativas para aplicação da massa residual das culturas.



Organização: Autor, 2023.

A Figura 2.2 demonstra a monetização da massa residual, tanto em seu estado natural quanto após a aplicação de tecnologias, evidenciando o valor agregado do resíduo. Em ambos os casos, o reaproveitamento, reutilização ou reciclagem da biomassa contribui positivamente para o meio ambiente. A pesquisa quantificou os ganhos econômicos decorrentes do tratamento da biomassa descartada, comparando cenários com e sem a utilização de tecnologias.

Para a construção das tabelas apresentadas nos resultados e discussões, foram utilizadas 51 fontes, incluindo artigos científicos, dissertações, teses e documentos, além de 23 websites com informações relevantes sobre as culturas analisadas.

2.3. Resultados e Discussões

Os resultados e discussões foram organizados em duas seções principais: o cenário da agricultura no semiárido sergipano e os aspectos produtivos e econômicos dos resíduos agrícolas. O objetivo final da pesquisa foi identificar as culturas com maior potencial econômico para aproveitamento da massa residual na região, com foco na cultura selecionada para o Projeto Semiárido Forte. Os valores apresentados nas tabelas são estimativas baseadas na realidade do semiárido sergipano.

2.3.1. Cenário da agricultura no semiárido sergipano

Segundo informações contidas no PAS são 9 culturas temporárias e 9 permanentes praticadas no Estado. A Tabela 2.1 abaixo expõe as culturas divididas entre temporárias e permanentes e o principal município produtor.

Tabela 2.1 – Principais culturas agrícolas no Estado de Sergipe

Divisão	Cultura (ton)	Principal Município de produção	Quant. Produzida no município (Ano)	Quant. produzida em Sergipe (Ano)	Valor de produção (R\$/Ano)
Temporária	Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>)	Riachão do Dantas	14.400	22.220	32.725,00
	Amendoim (<i>Arachis hypogaea L</i>)	Itabaiana	115	384	2.127,00
	Arroz em casca (<i>Oryza</i>)	Ilha das Flores	12.896	34.153	-
	Batata-doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	Itabaiana	23.750	56.749	60.169,00
	Cana (<i>Saccharum officinarum</i>)	Laranjeiras	409.200	2.057.934	187.954,00
	Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Poço Verde	800	3776	9.959,000
	Mandioca (<i>Manihot esculenta c.</i>)	Lagarto	28.800	136.438	59.377,00
	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Lagarto	1.800	5.060	6.231,00
	Milho (<i>Zea mays</i>)	Simão Dias	177.408	904.506	940.512,00
Permanente	Banana (<i>Musaceae</i>)	Japoatã	2.694	25.076	32.104,00
	Coco-da-baía (<i>Cocos nucifera</i>)	Estância	37.455	161.113.000	136.843,00
	Goiaba (<i>Psidium guajava</i>)	Poço Redondo	1.925	3.597	5.301,00
	Laranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Cristinápolis	50.755	378.422	214.496,00
	Limão (<i>Citrus limon</i>)	Itabaianinha	2.160	12.686	15.034,00
	Mamão (<i>Carica papaya</i>)	Santana do S. F.	374	1.518	1.801,00
	Manga (<i>Mangifera indica</i>)	Neópolis	9.870	18.113	23.532,00
	Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	Lagarto	1.980	8.757	14.312,00
	Tangerina (<i>Citrus reticulata</i>)	Indiaroba	2.448	5.190	5.549,00

Fonte: Perfil da Agricultura Sergipana, 2020.

Os dados sobre a agricultura em Sergipe revelam que 231.000 pessoas estão ocupadas em estabelecimentos agropecuários. Destas, 77,5% possuem algum vínculo familiar com o produtor, evidenciando a forte base familiar da agricultura no estado (Censo Agropecuário, 2017). Além disso, 22,5% dos trabalhadores não possuem laços de parentesco, 27,02% são contratados permanentes e 69,5% são temporários.

A Tabela 2.1 destaca a cana-de-açúcar, o milho, a laranja, a mandioca e o coco-da-baía como culturas de grande relevância na produção agrícola de Sergipe, que se destaca como o quinto maior produtor de laranja em nível nacional (Perfil da Agricultura Sergipana, 2020). Enquanto a cana-de-açúcar, o milho, a laranja e o coco-da-baía são predominantemente comercializados por grandes produtores e agroindústrias, a produção de mandioca é fortemente vinculada à agricultura familiar e a pequenos agricultores.

A mandioca se destaca na agricultura familiar, especialmente no Norte e Nordeste do Brasil, regiões que são grandes produtoras e consumidoras de seus produtos primários e

secundários. O diferencial dessa cultura reside no seu potencial de aproveitamento integral, incluindo folhas, caules e raízes, tornando-a uma fonte essencial de energia e alimento para agricultores familiares e comunidades que dependem da mandioca (Lima *et al.*, 2020).

Ainda segundo os estudos de Lima *et al.* (2020), 73% dos agricultores das comunidades Jacarequara e Capanema optam pela produção de mandioca em casas de farinha, impulsionados tanto pela tradição herdada de seus pais quanto pela falta de outras oportunidades. Essa forte influência familiar reforça o caráter tradicionalmente familiar da cultura da mandioca.

A Tabela 2.2 apresenta dados específicos sobre as culturas produzidas no semiárido sergipano, detalhando o comportamento da produção ao longo de um período de cinco anos.

Tabela 2.2 – Culturas agrícolas produzidas no semiárido sergipano

Cultura	Produção por ano (tonelada)						Média anual
	2017	2018	2019	2020	2022	Total	
Cana (<i>Saccharum officinarum</i>)	43.896	67.057	139.918	67.200	82.500	400.571	80.114,2
Milho (<i>Zea mays</i>)	785.142	70.511	646.525	832.698	720.246	3.055.122	611.024,4
Mandioca (<i>Manihot esculenta c.</i>)	68.091	50.946	49.386	45.150	62.487	276.060	55.212
Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>)	5.980	5.545	5.270	4.945	5.433	27.173	5.434,6
Arroz (<i>Oryza</i>)	60	4.811	0	13.121	6.382	24.374	4.874,8
Banana (<i>Musaceae</i>)	6.432	4.840	4.768	4.567	4.705	25.312	5.062,4
Manga (<i>Mangifera indica</i>)	1.914	2.657	3.081	2.663	2.689	13.004	2.600,8
Batata doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	1.944	1.456	0	4.094	4.772	12.266	2.453,2
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	12.206	1.303	2.704	2.633	1.285	20.131	4.026,2
Coco-da-baía (<i>Cocos nucifera</i>)	2.447	1.536	1.328	1.477	1.353	8.141	1.628,2
Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	1.287	2.408	2.637	2.215	3.402	11.949	2.389,8
Laranja (<i>Citrus sinensis</i>)	44.596	28.647	36.486	39.521	45.057	194.307	38.861,4

Elaborado pelo: AUTOR, 2022. Fonte: PAS (2017, 2018, 2019, 2020)

A Tabela 2.2 revela que milho, cana-de-açúcar, mandioca, laranja e abacaxi são as culturas de maior produção média anual no semiárido sergipano. A EMDAGRO tem incentivado o investimento em tecnologias para a produção de milho, devido à sua importância global como alimento e matéria-prima industrial. No entanto, a presente pesquisa foca no fortalecimento da agricultura familiar, que tem na mandioca sua principal cultura, tanto para consumo próprio quanto para comercialização.

A pesquisa concentra-se na agricultura familiar, com destaque para a produção de mandioca, abacaxi e feijão. O último Censo Agropecuário do IBGE (2017) revelou que Sergipe possui 93.333 estabelecimentos agropecuários, totalizando 1.456.813,20 hectares. Desses,

77.984 são classificados como produtores individuais, ocupando 1.202.058,79 hectares. Notavelmente, 97,34% dos estabelecimentos, totalizando 90.859, possuem áreas de até 100 hectares, representando 51% da área total do estado e caracterizando-se como agricultura familiar.

Nesses imóveis, as atividades produtivas são conduzidas por agricultores(as) e criadores(as) portadores de declaração de aptidão ao Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF e, porquanto, são prioritariamente, também em Sergipe, o público-alvo que depende dos serviços públicos do aparato de estado no âmbito da Secretaria da Agricultura e de suas vinculadas, EMDAGRO e Cohidro.

Em 2018 a EMDAGRO apresentou como resultado deste serviço o atendimento a 25.000 agricultores familiares os quais representam em torno de 27% dos estabelecimentos agropecuários beneficiados diretamente com ações da Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) oficial. Esta oferta de atendimento ainda é bastante reprimida, considerando-se as limitações de capacidade hídrica da região semiárida.

Em relação a disponibilidade hídrica, a irrigação como tecnologia de produção agrícola é desenvolvida em sete perímetros públicos de irrigação, Califórnia, Jacarecica I, Jacarecica II, Jabiberi, Piauí, Ribeira e Platô de Neópolis, sendo que neste último a exploração e gestão é feita por um grupo empresarial de produtores, sob contrato firmado com o Estado.

A assistência técnica em irrigação e a gestão geral das atividades nos perímetros irrigados de Sergipe são de responsabilidade da Seagri/Cohidro, que também arca com os custos operacionais, incluindo energia e manutenção (Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe, 2018). Dentre os perímetros, o Califórnia é o único localizado no semiárido sergipano, e a Tabela 2.3 apresenta informações sobre sua capacidade.

Tabela 2.3 – Perímetro irrigado de Canindé do São Francisco (Semiárido)

Perímetro Irrigado	Área plantada (ha)	Área colhida (ha)	Produção Anual (ton)	Estima de receita do produtor (R\$ 1,00)
Califórnia (Canindé do S.F)	678	2.203	18.025	22.971.496

Fonte: EMDAGRO, 2018.

Em geral, estes perímetros irrigados que foram implantados pelo Poder Público desde os anos 80, possuem características e problemas comuns. O baixo nível de inversões em manutenção das infraestruturas físicas de armazenamento e de captação de água de irrigação ao

longo dos anos levou a uma consecutiva deterioração, e somente em anos mais recentes, a partir do Programa Águas de Sergipe e o Programa de Apoio ao Investimento dos Estados e Distrito Federal – PROINVESTE começou a se efetuar investimentos de reforma, recuperação e modernização.

Em relação à racionalidade econômica, os sistemas produtivos são guiados pela oferta, isto é, a determinação sobre o que produzir é exclusivamente tomada pelo produtor irrigante, deslocadas quase sempre das pretensões do mercado consumidor, com iniciativas mais pontuais que seguiram a lógica do mercado e respaldada em orientações técnicas do Estado, a exemplo da bovinocultura leiteira, no perímetro Jabiberi e a goiaba no perímetro Califórnia.

Nesse território (semiárido) é onde ocorre o mais alto risco de desertificação, com sinais que demonstram indicadores de insustentabilidade, com respeito a existência de estoque de tecnologias sustentáveis, a Embrapa Semiárido ao longo de décadas de análise desenvolve pesquisas para os produtores familiares de leite. Nesse contexto, o processo de desertificação apresenta taxas de desaborrização preocupantes ou da retirada de componente arbóreo dos agroecossistemas (Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe, 2018). Como a agropecuária é um dos principais setores de produção no semiárido, ocorre o desmatamento de áreas para pastagem do gado como aponta o documento da Emdagro.

Visando solucionar os desafios da região, o projeto Semiárido Forte selecionou a mandioca, cultura central na agricultura familiar, para a conversão da biomassa da colheita e beneficiamento em biocombustíveis de 2ª geração. Essa iniciativa visa melhorar os aspectos produtivos, econômicos e sociais dos pequenos agricultores familiares. O objetivo é o reaproveitamento da massa residual, seguindo os princípios de um modelo circular de produção e consumo, para a produção de bioprodutos e sequestro de CO₂, promovendo a agricultura sustentável e a redução de resíduos e emissões.

A mandioca se destaca como a terceira cultura mais produzida no semiárido sergipano, com 20.543,25 toneladas anuais, superada apenas pelo milho e pela cana-de-açúcar. Durante a colheita e o consumo da mandioca, a matéria orgânica resultante é aproveitada para alimentação animal e melhoria do solo, conforme constatado em visitas a agricultores nas comunidades de Gameleira (Campo do Brito) e Lagarto, principal polo produtor de farinha de mandioca.

A massa residual com a colheita da mandioca é a maniva (Caule, rizomas e folhas) que é triturada em uma forrageira e armazenada em sacos plásticos, e a manipueira um líquido de aspecto leitoso, proveniente da produção de farinha, obtido após a prensagem da massa da

mandioca triturada. No caso da maniva sozinha ou em mistura com milho (farelo) é utilizada para alimentação de bovinos e a manipueira é também utilizada na ração animal, 8 dias após sua extração pois é altamente perigosa se ingerida no momento que é gerada.

A utilização de tecnologias para a reciclagem da maniva e sua transformação em biocombustíveis de 2ª geração contribui para a construção da economia circular na agricultura, promovendo melhorias sociais, ambientais e econômicas para os agricultores familiares. A aplicação do biocarvão no cultivo, com a correção de nutrientes e retenção de água, visa aumentar os ganhos de produtividade.

Tanto no beneficiamento da farinha de mandioca quanto na produção de biocarvão, há oportunidades para o aproveitamento energético do bio-óleo e do gás de pirólise, que podem alimentar os fornos de produção de farinha ou suprir a demanda energética da indústria de biocombustíveis de 2ª geração. Além disso, os agricultores podem obter renda adicional com a comercialização de biocarvão, bio-óleo e créditos de carbono, provenientes do sequestro de CO₂, para outros países.

2.3.2. Aspectos produtivos e econômicos dos resíduos da agricultura

O processo de colheita e beneficiamento das culturas no semiárido gera diversos resíduos. A Tabela 2.4 apresenta uma estimativa da quantidade de massa residual, biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise gerados por cada cultura, bem como a massa de CO₂ sequestrada pelo biocarvão.

Tabela 2.4 – Estimativa da biomassa residual e produtos das culturas agrícolas do semiárido

Culturas	Massa Residual da Agricultura/Agroindústria Semiárido Sergipano					
	Resíduo (ton/ano)	Resíduo s/umidade (ton/ano)	Biocarvão (ton/ano)	Bio-óleo (m ³ /ano)	Gás de pirólise (ton/ano)	CO ₂ sequestrado (ton/ano)
Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>)	25.980,99	4.765,18	1.467,68	**	**	2.309,19
Arroz (<i>Oryza</i>)	982,43	88,79	27,35	**	**	57,46
Banana (<i>Musaceae</i>)	19.666,80	3.285,92	1.012,06	**	**	1.595,69
Batata doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	275,98	182,81	56,3	**	**	125,93
Cana (<i>Saccharum officinarum</i>)	35.330,36	12.734,55	3.922,24	**	**	10.786,17
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	1.383,97	276,79	85,25	**	**	250,39
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	71.242,44	10.686,37	3.291,40	**	**	4.280,69
Laranja (<i>Citrus × sinensis</i>)	23.316,84	17.632,19	5.430,72	**	**	8.442,95
Mandioca (<i>Manihot Esculenta Crantz</i>)	4.325,85	1.950,83	600,86	304,5	635,39	1.343,91
Manga (<i>Mangifera indica</i>)	416,13	116,92	36,01	**	**	60,67

Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	1.266,59	1.128,41	347,55	**	**	232,95
Milho (<i>Zea mays</i>)	562.662,81	74.324,38	22.891,91	**	**	67.149,60
Total	746.851,19	127.173,14	39.169,33	304,5	635,39	96.635,60

** Só a cultura do projeto semiárido forte contém esse dado.

A tabela estima a produção de 746.851,19 toneladas anuais de resíduos no semiárido sergipano, que podem ser transformados em 39.169,33 toneladas de biocarvão, 304,5 toneladas de bio-óleo, 635,39 toneladas de gás de pirólise e sequestrar 96.635,60 toneladas de CO₂. Esses dados revelam o enorme potencial de impacto ambiental, social e econômico do descarte inadequado de resíduos, mas também demonstram as oportunidades de reaproveitamento, contribuindo para o alcance de metas do ODS 12.

A implementação das práticas propostas contribui para o alcance de diversas metas do ODS 12, incluindo: a gestão sustentável e o uso eficiente de recursos naturais na agricultura/agroindústria (meta 12.2); a redução do desperdício de alimentos (meta 12.3); a redução da geração de resíduos (meta 12.5); a promoção de compras públicas sustentáveis (meta 12.7); e o fortalecimento das capacidades científicas e tecnológicas para a produção e consumo sustentáveis, incluindo o uso de combustíveis sustentáveis (Mundo, 2016).

Ao analisar a mandioca, cultura selecionada, os valores estimados são: 4.325,85 ton/ano de massa residual, 600,86 ton/ano de biocarvão, 304,5 ton/ano de bio-óleo, 635,39 ton/ano de gás de pirólise e 1.343,91 ton/ano de CO₂ sequestrado. Para os agricultores familiares, a transformação dos resíduos da mandioca em biocombustíveis de 2ª geração representa um significativo aumento na qualidade da produção e desenvolvimento social e econômico, tanto pela venda quanto pela utilização dos biocombustíveis. A Tabela 2.5 detalha os valores estimados para os resíduos e biocombustíveis de 2ª geração.

Tabela 2.5 – Estimativa sobre o valor econômico da biomassa residual e produtos

Culturas	Massa Residual da Agricultura/Agroindústria Semiárido Sergipano				
	Massa Residual (R\$/ano)	Biocarvão (R\$/ano)	Bio-óleo (R\$/ano)	Gás de pirólise (R\$/ano)	CO ₂ sequestrado (R\$/ano)
Abacaxi (<i>Ananas comosus</i>)	**	44.030.400,00	**	**	842.854,35
Arroz (<i>Oryza</i>)	2.144.912,00	820.500,00	**	**	20.972,90
Banana (<i>Musaceae</i>)	**	30.361.800,00	**	**	582.426,85
Batata doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	136.152,00	1.689.000,00	**	**	45.964,45
Cana (<i>Saccharum officinarum</i>)	4.116.996,64	117.667.200,00	**	**	3.936.952,05
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	171.612.280,00	2.557.500,00	**	**	91.392,35
Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	**	98.742.000,00	**	**	1.562.451,85

Laranja (<i>Citrus × sinensis</i>)	17.487.630.000,00	162.921.600,00	**	**	3.081.676,75
Mandioca (<i>Manihot Esculenta Crantz</i>)	939.150,00	18.025.663,19	11.899.138,62	*	490.528,37
Manga (<i>Mangifera indica</i>)	**	1.080.300,00	**	**	22.144,55
Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	100.314.244,80	10.426.500,00	**	**	85.026,75
Milho (<i>Zea mays</i>)	63.552.647,84	686.757.300,00	**	**	24.509.604,00
Total	17.830.446.383,28	1.175.079.763,19	11.899.138,62	*	35.271.995,22

* Não existe preço fixo para o gás de pirólise

** Não possui valor de venda.

A comparação entre os valores de venda da massa residual da mandioca, com e sem tratamento, revela que a produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise oferecem rendimentos significativamente maiores do que a venda dos resíduos *in natura*. Os valores obtidos com a venda dos resíduos da mandioca processados são particularmente promissores para os pequenos agricultores familiares da região, que dependem dessa cultura. Considerando que a maior parte dos resíduos é atualmente utilizada para alimentação animal, com apenas uma pequena parcela sendo reaproveitada no solo ou pela indústria, a transformação em biocombustíveis representa uma significativa oportunidade de valorização.

Conforme observado por Maia (2020), o descarte inadequado de cascas, bagaços e caroços de frutas, devido à falta de aproveitamento, gera impactos ambientais negativos, como a produção de metano (CH₄) e a contaminação do solo e da água. Nesse contexto, a adoção de tecnologias sustentáveis e acessíveis na agricultura é crucial para melhorar o processo de cultivo e beneficiamento de resíduos, além de proporcionar benefícios significativos ao meio ambiente.

Um aspecto significativo é o valor obtido com o sequestro de CO₂ através da produção de biocarvão. A Tabela 2.5 demonstra que a venda de créditos de carbono pode gerar uma receita estimada de R\$ 35.271.995,22. Além dos benefícios econômicos da comercialização de créditos de carbono, a produção de biocarvão contribui para a mitigação das mudanças climáticas, transformando o CH₄ em CO₂ e armazenando gases nocivos no solo.

Estudos de Jat *et al.* (2022) indicam que o biocarvão tem o potencial de compensar 12% das emissões de gases de efeito estufa, estabilizando a matéria orgânica liberada pelo CO₂. No âmbito social, a aplicação do biocarvão pode aumentar o rendimento das culturas, melhorando a qualidade de vida dos agricultores que permanecem na região.

A adoção de mecanismos de tratamento ambientalmente corretos pode gerar benefícios significativos nos três pilares da sustentabilidade, posicionando o Brasil como um líder em agricultura sustentável e facilitando o alcance das metas dos ODS. Essas práticas estão

alinhadas com os princípios da economia circular, promovendo um modelo de produção e consumo sustentável.

2.4 Considerações Finais

Neste cenário, o desenvolvimento da agricultura sustentável exige uma mudança do modelo linear de economia, baseado na extração e descarte de recursos naturais, para um modelo circular. A economia circular, através da produção de biocombustíveis de 2ª geração, surge como uma alternativa promissora para construir uma agricultura sustentável e fornecer soluções para os pequenos agricultores em regiões de baixa produtividade, onde predominam culturas familiares.

Na região semiárida sergipana, as condições climáticas adversas representam um desafio constante para a agricultura. No entanto, a adoção de práticas ambientalmente corretas pode impulsionar a produtividade. Nesse sentido, a utilização dos resíduos da colheita e beneficiamento para a produção de bioprodutos surgem como uma solução promissora, permitindo o aproveitamento energético e o aumento da produtividade. Esse processo garante o aproveitamento total dos resíduos e reduz significativamente a emissão de poluentes.

Os resultados desta pesquisa demonstram que, além dos benefícios ambientais proporcionados pelo sequestro de CO₂ e pelo reaproveitamento de resíduos agrícolas, há um potencial significativo para melhorar a qualidade de vida dos agricultores familiares na região. A mandioca se mostrou uma cultura promissora para a aplicação da massa residual, beneficiando diretamente os agricultores que necessitam de melhores condições de produção. Além disso, os benefícios econômicos da produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise superam consideravelmente a venda *in natura* dos resíduos, com a possibilidade adicional de comercialização de créditos de carbono.

A difusão da economia circular, através da produção de biocombustíveis de 2ª geração, tem o potencial de impulsionar o alcance das metas propostas pelos ODS, incluindo a erradicação da fome, a promoção da agricultura sustentável e o estímulo à produção e consumo ambientalmente conscientes. Essa abordagem fortalece os três pilares da sustentabilidade: ambiental, econômico e social.

Para avançar nessa área, pesquisas futuras podem explorar novas tecnologias para o aproveitamento da massa residual, além de incentivar a participação dos governos locais na implementação de políticas públicas que promovam a aplicação da biomassa gerada durante a

colheita e o beneficiamento. Adicionalmente, estudos sobre a comercialização de créditos de carbono, provenientes do sequestro de CO₂ pelas atividades agrícolas na região, seriam de grande relevância.

REFERENCIAS

AGROPECUÁRIO, IELDE. **Censo Agropecuário**. 2017.

ALEXANDRE, H. V.; DA SILVA, F. L. H.; GOMES, J. P., DA SILVA, O. S.; CARVALHO, J. P. **Isotermas de dessorção de resíduos de abacaxi**. In *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química–COBEQ* (pp. 3472-3479). 2014. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-0422-25562-181058

ALVES, J. L. F.; **Valorização de resíduos agroindustriais de mamona e de algaroba por meio do processo de pirólise**. 2016. Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira. Coorientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo. Mestrado (Mestrado em Química) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129390>

ANDRADE, L. O.; **Aproveitamento do caroço de manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar**. 2015. Orientador: Humberto Jorge José. Coorientador: Rênio Felix de Sena. Mestrado (Mestrado em Química) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, 2015. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.57>.

ARAÚJO, S. E.; **Caracterização de farinha da casca de maracujá amarelo e maracujá-do-cerrado**. *Revista Científica Semana Acadêmica*. 2017. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/caracterizacao-de-farinha-da-casca-de-maracuja-amarelo-e-maracuja-do-cerrado>. Acesso em: 21/06/2024.

BARATI, Z.; LATIF, S.; MÜLLER, J.; **Enzymatic hydrolysis of cassava peels as potential pre-treatment for peeling of cassava tubers**. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101247. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101247>

BARROS, L. A.; **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas**. 2012. Orientador: Ailton Teixeira do Vale. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) da Universidade de Brasília, 2012. <https://bdm.unb.br/handle/10483/4448>

BISPO, D. F.; **Efeito do pré-tratamento ultrassônico com k3po4 para a produção de bio-óleo de vagem de feijão**. 2018. Orientadora: Lisiane dos Santos Freitas. Mestrado (Mestrado em Química) Programa de Pós-Graduação em Química - Universidade Federal de Sergipe, 2018. <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/7817>

CANAONLINE. **Cana-de-açúcar. UDOP**. 2022. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/tonelada-de-bagaco-de-cana-chega-a-custar-400-reais-em-2021.html#:~:text=Esses%20fatores%20fizeram%20com%20que,400%20reais%20no%20interior%20paulista..> Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

CARDOSO, C. E. L.; **Competitividade e inovação tecnológica na cadeia agroindustrial de fécula de mandioca no Brasil**. 2003. Orientador: Geraldo de Sant'ana de Camargo Barros. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Superior de Agricultura da Universidade Federal de São Paulo, 2003.
<https://doi.org/10.11606/T.11.2003.tde-04122003-151241>

CASARA, V.; BOHN, L.; DRESCH, A.; MIBIELLI, G.; BENDER, J. **Caracterização físico-química da biomassa de milho**. XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. São Carlos – SP. 2017. DOI: 10.5151/chemeng-cobeqic2017-236

CASTIGLIONI, G. L.; SOARES JÚNIOR, M. S.; SOUZA, T. A. C.; SILVA, F. A. D.; CALIARI, M.; **Tamanho dos alvéolos e tamanho de padrões de forma enriquecida com farelo de mandioca**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44, 127-134. 2014.
<https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000200003>

CONERSHOP. **Coração de banana orgânico Unidade Direto do Produtor**. Conershop by uber. 2022. Disponível em: <https://cornershopapp.com/pt-br/products/1hg08-direto-do-produtor-coracao-de-banana-organico-unidade>. Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

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*, 76, 823-827. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.017>

ELY, M. F.; WOLTER, R. C. D.; TRINDADE, J. K.; PIAZZETTA, D.; MARTINS, G.; HOLZ, T. V.; LOPES, S. I. G. **Densidade de semeadura para as cultivares IRGA 424 RI E IRGA 431 CL**. In *CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO* (Vol. 11, pp. 98-101). 2019.
https://www.researchgate.net/publication/335364403_DENSIDADE_DE_SEMEADURA_PARA_AS_CULTIVARES_IRGA_424_RI_E_IRGA_431_CL

EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO DE SERGIPE - EMDAGRO. **Relatório de Atividades 2020**. Sergipe. 2018.

FAUSTINO, F. C.; SANTANA JÚNIOR, J. A.; CERQUEIRA, D. A.; ATAÍDE, C. H.; CARDOSO, C. R.; **Avaliação do Potencial Pirolítico dos Resíduos Agroindustriais de Arroz e Milho**. *Rev Virtual Quim*, 11, 1882-1893. 2019. DOI: 10.21577/1984-6835.20190131

FIELDVIEW. **Por que o sequestro de carbono pode ser bom negócio para a agricultura brasileira?**. Blog FieldView. 2020. Disponível em: <https://blog.climatefieldview.com.br/descubra-por-que-o-sequestro-de-carbono-pode-ser-bom-negocio-para-a-agricultura-brasileira#:~:text=da%20agricultura%20digital.-,O%20que%20%C3%A9%20sequestro%20de%20carbono%3F,pelos%20oceanos%2C%20florestas%20e%20solos>. Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

FIGUEIREDO, E. B.; **Balanço de gases de efeito estufa e emissões de Co₂ do solo nos sistemas de colheita da cana-de-açúcar manual queimada e mecanizada crua.** 2012. Orientador: Newton La Scala Júnior. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciencias Agrarias e Veterinarias – UNESP, 2012. <http://hdl.handle.net/11449/105155>

FLORENCIO, I. M.; SOUZA, M.; SHEILA, S. R.; GONDIM, S.; CAVALCANTI, M. T.; FLORENTINO, E.; **Farinha do caroço da manga como ingrediente na elaboração de produtos de panificação.** *ENCONTRO NACIONAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA/UEPB*, 1-10. 2012. <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/1658>

GRUTZMACHER, P.; **Estoque de carbono no solo e emissão de gases de efeito estufa em sistema de produção de milho com uso de lodo de esgoto.** 2016. Orientador: Cristiano Alberto de Andrade. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) Concentração Gestão de Recursos Agroambientais - Instituto Agrônômico, 2016. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1065436>

HAMMER, J., PIVO, G. **Teoria e prática do triple bottom line e do desenvolvimento econômico sustentável.** *Economic Development Quarterly* , 31 (1), 25-36. 2017. <https://doi.org/10.1177/0891242416674808>

HU, Q.; JUNG, J.; CHEN, D.; LEONG, K.; SONG, S.; LI, F.; WANG, C. **Biochar industry to circular economy.** *Science of The Total Environment*, 757, 143820. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>

JAT, M. L.; CHAKRABORTY, D.; LADHA, J. K.; PARIHAR, C. M.; DATTA, A.; MANDAL, B.; GERARD, B. **Carbon sequestration potential, challenges, and strategies towards climate action in smallholder agricultural systems of South Asia.** *Crop and Environment*.. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.03.005>

JESUS, N. A. L. D.; **Biomassas alternativas para a produção de bio-óleo por pirólise catalisada.** 2017. Orientadora: Ana Paula Vieira Soares Pereira Dias. Coorientador: Jaime Filipe Borges Puna. Mestrado (Mestrado em Química) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa). 2017. <http://hdl.handle.net/10400.21/8328>

JÚNIOR, C. M. V.; SILVA SANTOS, H.; SANTOS, S. T. O.; DRUMMOND, A. R. F.; SILVA, S. P. R. **Produção e análise do Syngas a partir do sabugo de milho.** *Brazilian Journal of Development*, 6(6), 33116-33123. 2020. DOI:10.34117/bjdv6n6-023

KROHL, D. R.; **Oxidative fast pyrolysis of banana leaves in fluidized bed reactor.** 2014. Orientadora: Noeli Sellin. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Da Região De Joinville, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.032>

LIMA, M. B.; SILVA, S. D. O.; FERREIRA, C. F.; **Banana: o produtor pergunta, a Embrapa responde.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2012. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/101787/1/500perguntasbanana.pdf>

LIMA, M. B.; SILVA, S. D. O.; FERREIRA, C. F.; **Feijão-Caupi: o produtor pergunta, a Embrapa responde.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Cruz das Almas:

Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2017.

<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1075578>

MAIA L. B. L. **Viabilidade para a produção de biocarvão de resíduos agroindustriais usando o sistema de informação geográfica (SIG)**. 2020. Orientador: Danielle Goveia.

Dissertação (Mestrado Profissional), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2020.

<https://repositorio.unesp.br/bitstreams/9551b7ac-d720-4dda-8f15-a8d529df9947/download>

MARQUES, A.; CHICAYBAM, G.; ARAUJO, M. T.; MANHÃES, L. R. T.; SABAA-S. R. U. R.; AU; **Composição centesimal e de minerais de casca e polpa de manga (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins**. *Revista Brasileira de fruticultura*, 32, 1206-1210. 2010.

<https://doi.org/10.1590/S0100-29452010005000117>

MERCADO LIVRE. **Farinha De Casca De Maracujá C2 Alimentos Com Laudo 500gr**.

MERCADO LIVRE. 2022. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1420752228farinhadecascademaracujac2alimentoscomlaudo500gr_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=5bfc2a8a-7f20-4247-8454-22b2f13abebd. Acesso em:

18 de Outubro de 2022.

MFRURAL. **Palha de Arroz Ensacada - Casca de arroz o ano inteiro**. MFRURAL. 2022.

Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/227204/palha-de-arroz-ensacada-casca-de-arroz-o-ano-inteiro>. Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

MFRURAL. **Fardo para nutrição animal com milho, sabugo e palha de milho**.

MFRURAL. 2022. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/121969/palha-de-milho-palha-e-milhosabugosilagemdemilhotrituradoeoprensado#:~:text=Cada%20fardo%20cont%C3%A9m%20aproximadamente%20200,fardo%20%C3%A9%20R%2460%2C00..> Acesso em: 18 de

Outubro de 2022.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agricultura Familiar**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em: 18 de outubro de 2022.

MODESTO JUNIOR, M. S.; ALVES, R. N. B.; **Cultura da mandioca: apostila editores técnicos**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2014.

<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1000910>

MORENO-PIRAJÁN, J. C.; GIRALDO, L.; **Study of activated carbons by pyrolysis of cassava peel in the presence of chloride zinc**. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 87 (2), 288-290. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.12.003>

MUNDO, T. N. **A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Recuperado em, 15, 24. 2016.

MÜHLEN, C. V.; ROLL, A. P.; DIAS, R. C.; FREITAS, B. K.; XAVIER, E. G.; ROLL V. F.; **Características físicas e absorptivas da casca de arroz e da maravalha usadas como**

cama avícola. Congresso de Iniciação Científica. UFPEL. 2021.
https://cti.ufpel.edu.br/siepe/arquivos/2021/CA_03208.pdf

MURARO, P.; DE OLIVEIRA CAMELO, C.; DENIS, F. A. **Aproveitamento e valorização da casca de arroz: uma revisão bibliométrica uso e avaliação da casca de arroz (rh): a bibliometric.** 2018. https://www.ufrgs.br/cienagro/wp-content/uploads/2018/10/Aproveitamento-e-Valoriza%C3%A7%C3%A3o-da-Casca-de-Arroz-CA_Uma-Revis%C3%A3o-Bibliom%C3%A9trica-Caeverton-Camelos.pdf

MUTTONI, M.; DECOSTA, D. T.; RAMOS, A. L.; ARGENTA, N.; PICCIN, J. F.; **Estudo de secagem convectiva de albedo de laranja.** IX Simpósio de Alimentos. Universidade de Passo Fundo. 2015. https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/simposio-sial-anais/2015/engenharia/e37.pdf

NEVES, H. O.; **Feno da Folha de Bananeira Tratado com de Hidróxido de Sódio Na Alimentação de Ovinos.** 2018. Orientador: Dorismar David Alves. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) Programa de Pós-Graduação em Zootecnia – Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. <https://www.posgraduacao.unimontes.br/ppgz/wp-content/uploads/sites/24/2019/11/H%C3%A9lio-Oliveira-Neves.pdf>

O GLOBO. **Biogás, o combustível ecológico que é mais barato e considerado mais eficiente que o GNV.** Fecombustíveis. 2021. Disponível em:
<https://www.fecombustiveis.org.br/noticia/biogas-o-combustivel-ecologico-que-e-mais-barato-e-considerado-mais-eficiente-que-o-gnv/246641>. Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

OLIVEIRA, A. P. D.; SILVA, J. E. L. D.; PEREIRA, W. E.; BARBOSA, L. J. D. N.; OLIVEIRA, A. N. P. D.; **Características produtivas da batata-doce em função de doses de P2O5, de espaçamentos e de sistemas de plantio.** *Ciência e Agrotecnologia*, 30, 611-617. 2006. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000400003>

OLIVEIRA, M. E. D. S.; SILVA, E. R. D.; CARVALHO, F. V. A. D.; WANDERLEY, P. A.; SOUSA, E. B. D.; FARIAS, J. C.; **Características físicas e morfológicas de vagens e sementes de feijão-bravo (*Capparis flexuosa* L.).** No VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. 2012.
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/99334405/3050.pdf?1677777018=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCARACTERISTICAS_FISICAS_E_MORFOLOGICAS_D

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** ODS, p. 31, 2015.

PEREIRA, M. A. F.; **Fracionamento da casca de banana para valorização de carboidratos.** 2020. Orientadora: Patrícia Poletto. Coorientador: Sidnei Emilio Bordignon Jr. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos – Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215841>

QUATRO ESTRELAS IMPORIO. **Casca de laranja cristalizada.** 2019. QUATRO ESTRELAS IMPORIO. Disponível em: <https://www.emporioquatroestrelas.com.br/casca-de-laranja-cristalizada-100g10825-6/p>. Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

QUEIROGA, V. D. P.; BELTRÃO, N. D. M.; **Produção e armazenamento de sementes de mamona (*Ricinus communis* L.)**. *Embrapa Algodão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)*. 2004. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPA/19627/1/COMTEC206.PDF>

REZENDE, F. A.; GROFF, A. M.; FRANÇA, G.; **Características físicas do fruto e composição química da casca de maracujá azedo**. 2015. http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2015/anais/fabiane_avanzi_rezende.pdf

ROSA, M. D. F.; SANTOS, F. D. S.; MONTENEGRO, A. A. T.; ABREU, F. D.; CORREIA, D.; ARAÚJO, F. D.; NORÕES, E. D. V.; **Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola**. 2001. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/423156>

SANDOVAL, V.P.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. **Economía circular**. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (15), pp.85-95. 2017. https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/53653/1/Economia_Circular.pdf

SANTANA, T. P.; SOBRAL, A. J. S.; SOUZA, E.; MUNIZ, E.; RANGEL, J. D. A.; CASTRO FILHO, E. S.; SANTOS, D. D. O.; **Caracterização bromatológica da casca de mandioca e da manipueira para utilização na alimentação animal**. In *Embrapa Tabuleiros Costeiros-Artigo em anais de congresso (ALICE)* . In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS, 4., 2014, Aracaju. Anais... Brasília, DF: Embrapa, 2014. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/110575/1/273.pdf>

SANTOS A. C.; **Avaliação do uso da farinha de casca da manga tomy atkins na reologia da farinha de trigo e na aceitabilidade do pão de forma**. 2013. Orientadora: Manuel Oviedo Plata. Trabalho de Conclusão de Curso (curso superior de tecnologia de alimentos) – universidade tecnologica federal do parana, 2013. <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1425>

SANTOS M. L. G.; **Processo pirolítico da massa residual do abacaxi**. 2018. Orientadora: **Luciana Rezende Alves de Oliveira**. Coorientador: Marcelo Mendes Pedroza. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Tecnologia Ambiental Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Universidade de Ribeirão Preto, 2018. <https://repositorio.unaerp.br/handle/12345/165>

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2018.

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2019.

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2020.

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2021.

SERGIPE. **Panorama nacional e regional da agricultura 2024**. Observatório de Sergipe. 2024.

SILVA, H. A. D.; MURRIETA, R. S. S.; **Mandioca, a rainha do Brasil? Ascensão e queda da *Manihot esculenta* no estado de São Paulo**. *Boletim do Museu Paraense Emílio*

Goeldi. *Ciências Humanas*, 9, 37-60. 2014. <https://doi.org/10.1590/S1981-81222014000100004>

SPOKAS, K. A.; NOVAK, J. M.; STEWART, C. E.; CANTRELL, K. B.; UCHIMIYA, M.; DUSAIRE, M. G.; RO, K. S.; **Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar**. *Chemosphere*, 85(5), 869-882. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.108>

TOZATTI, P.; RIGO, M.; BEZERRA, J. R. M. V.; CÓRDOVA, K. R. V.; TEIXEIRA, Â. M.; **Utilização de oferta de compra na oferta de biscoitos tipo cracker**. *RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais*, 15 (1), 135-150. 2013. <https://doi.org/10.53393/rial.2016.v75.33512>

VALVERDE, M. **Caratinga pode ganhar planta de biochar**. Diário do Comercio. 2022. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/agronegocio/caratinga-pode-ganhar-planta-debiochar/#:~:text=No%20mercado%20nacional%2C%20os%20pre%C3%A7os,a%20R%24%2035%20o%20quilo..> Acesso em: 18 de Outubro de 2022.

VIEIRA, F. R.; **Estudo experimental da pirólise lenta da casca de arroz em reator de leito fixo**. 2018. Orientadora: Ivonete Ávila. Coorientador: Carlos Manuel Romero Luna. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista, 2018. <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/6aaf042d-e6e9-493c-9866-53698e8986cf/download>

Análise de Viabilidade técnica, econômica e energética com a transformação da massa residual

RESUMO

A produção agrícola gera grandes quantidades de resíduos, resultando em emissões de gases e contaminação ambiental. Nesse contexto, a agricultura sustentável surge como solução, oferecendo benefícios ambientais e econômicos. O estudo analisou a viabilidade técnica, econômica e energética da implantação de uma indústria para reaproveitar resíduos de mandioca, produzindo biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise e sequestrando CO₂. Através de ferramentas e indicadores, foram realizadas estimativas de viabilidade, demonstrando o potencial positivo para a construção de tal indústria no semiárido sergipano, com benefícios sociais, econômicos e ambientais para agricultores familiares. Espera-se que essa iniciativa se expanda, fortalecendo biocombustíveis de segunda geração, protegendo recursos naturais e diversificando a matriz energética, com o apoio governamental por meio de políticas públicas para uma economia sustentável. Diante disso, projeta-se que, no futuro, mais unidades desse tipo sejam implementadas em todo o país, possibilitando a introdução de modelos circulares de produção e a realização de novos estudos, tecnologias e políticas públicas inovadoras no setor de biocombustíveis, com base nos valores positivos encontrados com a introdução da unidade de produção.

Palavra-chave: Agricultura sustentável, Biocombustíveis, sequestro de CO₂.

ABSTRACT

Agricultural production generates large quantities of waste, resulting in gas emissions and environmental contamination. In this context, sustainable agriculture emerges as a solution, offering environmental and economic benefits. This study analyzed the technical, economic, and energy feasibility of implementing an industry to reuse cassava waste, producing biochar, bio-oil, pyrolysis gas, and sequestering CO₂. Through tools and indicators, feasibility estimates were made, demonstrating the positive potential for the construction of such an industry in the semi-arid region of Sergipe, with social, economic, and environmental benefits for family farmers. It is expected that this initiative will expand, strengthening second-generation biofuels, protecting natural resources, and diversifying the energy matrix, with government support through public policies for a sustainable economy. Therefore, it is projected that, in the future, more units of this type will be implemented throughout the country, enabling the introduction of circular production models and the development of new studies, technologies, and innovative public policies in the biofuel sector, based on the positive values found with the introduction of the production unit.

Key words: Sustainable agriculture, Biofuels, CO₂ sequestration.

3.1. Introdução

Os processos de produção, historicamente, têm gerado impactos ambientais, sociais e econômicos significativos, desde o desmatamento e a contaminação de áreas até a emissão de poluentes na atmosfera. No setor agrícola global, estimativas apontaram a geração de 7,26 Gt de resíduos e um volume de biomassa vegetal seca equivalente a 140 Gt (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019). Apesar da abundância de recursos, mais de um bilhão de pessoas enfrentam a fome devido ao descarte inadequado e à falta de aproveitamento desses resíduos.

Para o banco Mundial (2020) o desenvolvimento da agricultura representa uma poderosa ferramenta para acabar com a pobreza extrema, aumentar a prosperidade de alimentos para 9,7 bilhões de pessoas até 2050, impactando em um terço do produto interno produto (PIB) global. Ademais, essa abordagem contribui diretamente alcançar os ODS 2 e 12, que visam erradicar a fome, garantir a segurança alimentar, melhorar a nutrição, promover a agricultura sustentável e assegurar padrões de consumo sustentáveis (Organização das Nações Unidas, 2015).

A geração global de resíduos da produção agrícola em larga escala representa uma ameaça significativa aos impactos ambientais, sociais e econômicos, devido ao manejo precário da biomassa (Tripathi *et al.*, 2019). O Brasil se destaca como o quarto maior produtor de biomassa agrícola (451 Mt), atrás apenas da China, Estados Unidos e Índia (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020). Esses países são líderes mundiais na produção agrícola e possuem um comércio bem estabelecido.

Os impactos causados pela geração de resíduos da agricultura/agroindústria em larga escala evidenciam a necessidade urgente de políticas públicas que incentivem práticas de tratamento sustentáveis. O descarte e a decomposição inadequada da matéria orgânica no meio ambiente resultam na emissão de poluentes como metano e dióxido de carbono. No âmbito social, essa contaminação afeta diretamente a produção dos pequenos agricultores e a qualidade de vida das comunidades locais. Do ponto de vista econômico, a desvalorização da massa residual e os custos de correção dos impactos representam um fardo significativo.

Nesse sentido a agricultura/agroindústria no Brasil é conhecida pela alta competitividade e geração de empregos, renda e bioenergia por outros países. Sendo um dos setores que mais contribui para o crescimento nacional, respondendo por 21% de toda riqueza produzida, além de um quinto de todos os empregos e 43,2% das exportações (EMBRAPA, 2020). Já as informações da agricultura familiar mostram que mais de 70% da produção é utilizada para o abastecimento da população brasileira, e metade desses estabelecimentos estão localizados no Nordeste (Lima, Silva e Iwata, 2019).

Sob esse aspecto, o desafio consiste na introdução de práticas sustentáveis na agricultura/agroindústria, onde os produtores(as) possam adotar medidas ambientalmente corretas e respeitadas, fazendo o uso de tecnologias acessíveis e regulamentáveis. Desse modo, para Silva *et al.* (2020) a questão central para chegar na agricultura sustentável passa pela educação agrícola para torná-la mais eficaz e eficiente na contribuição da sustentabilidade. Além da realização de estudos que demonstrem a viabilidade na introdução de unidades desse tipo.

Essa visão limitada muitas vezes pertence aos agricultores(as) que não tiveram nenhuma formação agrícola e possuem idade avançada. Porém, dados da Comissão Europeia (2015) mostram que 60% dos agricultores(as) jovens são afetados pela falta de formação e precisam buscar por conhecimento especializado. Neste caso, a falta de formação agrícola acaba impactando de forma negativa no meio ambiente e na desvalorização da biomassa produzida. Nesse sentido o uso de novas tecnologias pode agregar valor aos resíduos gerados na colheita e beneficiamento, evitando que grandes quantidades de biomassa residual deixem de ser aproveitadas. Para tanto é necessária a realização de estudos que demonstrem a viabilidade na introdução de unidades de transformação para biomassa da colheita e beneficiamento.

Nesse contexto, tecnologias sustentáveis são fundamentais para construir uma agricultura alinhada aos princípios da EC, promovendo o desenvolvimento econômico através do uso inteligente de recursos naturais e priorizando insumos duráveis, recicláveis e renováveis. A EC enfatiza a conservação de recursos naturais e incentiva o uso de tecnologias para reaproveitar e reciclar materiais no processo produtivo. Assim, os avanços ambientais podem impulsionar melhorias nas condições sociais e econômicas dos pequenos agricultores.

A luz disto, a EC incentiva o uso consciente de recursos naturais e assegura benefícios econômicos através da transformação de insumos utilizados nos processos de produção e consumo. A análise de viabilidade técnica, econômica e energética é um passo crucial para demonstrar o potencial da aplicação de tecnologias, evidenciando a redução de gastos e a menor

dependência de novas matérias-primas (Almeida e Díaz, 2020). Além disso, a EC estabelece como prioridade a transição para o uso de fontes de energias renováveis. Alinhada a este princípio fundamental, esta pesquisa explora o potencial dos biocombustíveis de segunda geração que são uma forma de energia renovável visando o aproveitamento e a valorização eficiente de resíduos agrícolas.

Nesse sentido, o estudo realizou uma análise da viabilidade técnica, econômica e energética mediante a reciclagem dos resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca para a produção de biocombustíveis de segunda geração e, conseqüentemente, para a estimativa do CO₂ sequestrado pelo processo. O caráter social desse estudo envolve beneficiar os pequenos agricultores familiares do semiárido sergipano, os quais atuam em condições de baixa produtividade devido às condições climáticas locais. Para demonstrar a viabilidade da unidade de produção, calcularam-se os seguintes indicadores financeiros: Ebitda, Capex, TIR, VPL e *Payback*.

3.2 Metodologia

A área da pesquisa está localizada no semiárido sergipano, composto por 30 municípios (EMDAGRO, 2020). Nessa região são produzidas 12 culturas: milho, feijão, mandioca, batata doce, arroz, abacaxi, banana, coco, laranja, mandioca, manga e maracujá. Dentre as culturas citadas, houve a seleção de uma que tivesse como base a agricultura familiar e o aproveitamento mínimo ou nenhum dos resíduos da colheita e beneficiamento.

Com base nesses critérios, a mandioca foi a cultura selecionada, por ser cultivada em todos os municípios do semiárido sergipano. Essa escolha permitiu a realização de uma análise abrangente da viabilidade técnica, econômica e energética para a produção de biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise e sequestro de CO₂ a partir dos resíduos da mandioca.

Nessa perspectiva, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos destaca o potencial energético dos resíduos da agricultura para produção de biogás especificamente (BRASIL, 2022). A tabela 3.1 traz informações sobre os resíduos que se destacaram para geração de biogás.

Tabela 3.1 – Fator de geração de Biogás

Resíduo para biodigestão	Fator de geração de resíduo (%)	Biogás gerado por tonelada (m³)
Casca de café	50	92,50
Casca de banana	50	92,50
Bagaço de laranja	50	92,50
Casca coco-da-baía	60	111,00

Casca de castanha de caju	73	135,00
Resíduo de uva	40	74,00
Resíduo de soja	73	135,05
Resíduo de milho	58	107,30
Vinhaça (etanol)	13 litros/litro de etanol (13tOH)	11,85
Resíduo de feijão	53	98,05
Casca de arroz	149	275,65
Resíduo de mandioca	66,1	122,30

Fonte: Deublein & Steinhauser (2011). Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2022).

Dentre os resíduos para biodigestão listados na tabela 3.1, oito são gerados no semiárido sergipano, com destaque para a mandioca, que apresenta um fator de geração de 66,1% e produz 122,30 toneladas/m³. A mandioca é o quarto resíduo mais produzido na região. Esses dados reforçam a importância e a necessidade de aproveitar os resíduos para impulsionar o desenvolvimento de um modelo de produção e consumo circular.

A metodologia adotada para esta pesquisa se baseou em uma pesquisa bibliográfica e cálculos estimados, divididos em dois eixos principais: primeiro, a construção de uma linha do tempo que mapeia a evolução da matriz energética no Brasil e o crescimento dos biocombustíveis, visando entender o progresso e as perspectivas no reaproveitamento de resíduos agrícolas; segundo a análise de viabilidade técnica, econômica e energética para a produção de biocombustíveis.

Para a construção da linha do tempo, foram realizadas pesquisas em artigos e *websites* que respondessem às questões cruciais: de onde partimos, onde estamos e onde queremos chegar? A partir disso, foi possível traçar uma linha sobre a evolução dos biocombustíveis no país e identificar as medidas necessárias para fortalecer o setor, incluindo a formulação de políticas públicas e a promoção de uma economia sustentável, com foco na circularidade das matérias-primas.

Para ilustrar os resultados desta etapa da pesquisa, foi elaborada uma figura que apresenta a linha evolutiva das fontes de energia renováveis e não renováveis no Brasil. Para responder às questões de pesquisa, foi construído um quadro que sintetiza as informações relevantes para cada um dos três biocombustíveis de 2ª geração: biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise.

A análise de viabilidade técnica, econômica e energética avaliou diversos aspectos para a implantação de uma indústria de reciclagem da massa residual da mandioca na produção de bioprodutos (quadro 3.1). As estimativas iniciais foram focadas nos resíduos da

colheita e beneficiamento da mandioca na região semiárida de Sergipe. A análise de viabilidade demonstrou o potencial da mandioca e o tempo necessário para o retorno do investimento.

Quadro 3.1 – Aspectos analisados na viabilidade técnica, econômica e energética dos resíduos da agricultura/agroindústria

Técnico	Econômico	Energético
- Equipamentos. - Produção. - Transporte.	- Capital Expenditure (Capex)/custo do investimento. - Custo operacional. - Receita Líquida Esperada. - Ebitda ou Lajida (Lucro Antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização). - Valor Presente Líquido (VPL). - Taxa Interna de Retorno (TIR). - Payback.	- Gasto de energia com a indústria - Energia gerada com a produção dos biocombustíveis - CO₂ sequestrado com a produção de biocombustíveis

Organização: Autor (2023)

Nestes termos a viabilidade técnica analisou as especificações dos equipamentos de produção e transporte com a identificação das empresas que fabricam os equipamentos para produção e transporte do biocarvão (Apêndice B). A partir disto, foram feitos cálculos estimados sobre a capacidade de produção com base nos equipamentos escolhidos.

Na análise econômica, foram avaliados os custos de investimento (CAPEX), os custos operacionais, a receita líquida esperada e indicadores financeiros como EBITDA, VPL, TIR e Payback. O objetivo era determinar a viabilidade econômica com a implantação da indústria no semiárido sergipano.

O cálculo do VPL foi realizado em duas etapas: primeiro, os fluxos de caixa atualizados foram calculados no Excel (utilizando valores previstos, conforme a equação 1); segundo os valores dos fluxos de caixa atualizados, o investimento inicial e a taxa Selic (14,75%) foram inseridos no aplicativo © Aspose Pty Ltd 2024 para obter o VPL. A TIR foi calculada utilizando as funções do Excel. O Payback, que representa o tempo de retorno do investimento, foi calculado utilizando as funções do Excel na equação 2. O período mínimo de análise do investimento foi de 10 anos, mas o tempo de retorno pode ser inferior a esse período.

$$FCA (R\$) = \frac{FC}{(1+Taxa)^A} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,

FCA = Fluxo de caixa atualizado

FC = Fluxo de caixa

$Taxa$ = taxa Selic

A = Ano

$$Payback (ano) = A - \frac{ST}{FCA} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde,

A = Ano

ST = Saldo total

FCA = Fluxo de caixa acumulado

Resultados positivos no VPL e na TIR indicam que o investimento possui um alto potencial de retorno financeiro, ao contrário de resultados negativos. Além desses três indicadores, o EBITDA foi avaliado para reforçar a solidez da implantação da indústria de biocombustíveis de 2ª geração no semiárido sergipano. O EBITDA representa o lucro da empresa antes de juros, impostos, depreciação e amortização (equação 3), e valores superiores a 1 indicam a rentabilidade do negócio.

$$Ebitda (R\$) = LL + D + A + I + J \quad \text{Eq. 3}$$

$$Margem ebitda = \frac{Ebitda}{LL}$$

Onde,

LL = Lucro líquido

D = Depreciação

A = Amortização

I = Imposto

$Juro$ = Juros

Por fim, foi realizada uma análise dos gastos energéticos na produção e transporte do biocarvão, bem como da quantidade de CO₂ emitida, considerando os impactos negativos desse gás na qualidade de vida do planeta. Esse monitoramento permite avaliar a sustentabilidade da indústria.

No mais, as estimativas se estendem a quantidade de energia gerada e toneladas de CO₂ sequestrado pelo processo de colheita e beneficiamento. Os cálculos dessa etapa foram extraídos de artigos e documentos especializados na produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise. O quadro 3.2 traz as referências utilizadas para construção dos cálculos de viabilidade técnica, econômica e energética com a introdução da indústria no semiárido sergipano.

Quadro 3.2 – Informações para os cálculos da viabilidade técnica, econômica e energética

Aspecto	Informações	Referências
Técnico	- Equipamentos - Produção	https://www.bestongroup.com/pt/mobile-biochar-machine/ https://www.cetro.com.br/moinho-cts-80/ https://www.rotochopper.com/product/gb-250/ https://www.machinefinder.com.br/ww/pt-BR/machines/9953472 https://www.agrotama.com.br/produtos/gerador-de-energia-a-diesel-72-kva-trifasico-110-220v-silenciado-com-qta-nd72100es3qta/nagano-ND72100ES3QTA,26,878/ https://cltcontabilidade.com.br/o-que-e-depreciacao-aprenda-a-fazer-o-calculo/#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20linha%20reta%20divide,estimada%20(anos%20ou%20meses). Milanez <i>et al.</i> (2018) Nematian <i>et al.</i> (2021) Kumar e Gupta (2023)
Econômico	- Capex - Taxa Selic - VPL - TIR - Payback	https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic Oliveira e Shinohara (2014) Serrão <i>et al.</i> (2021) https://excelgenial.com.br/como-calcular-vpl-no-excel/ https://www.dicionariofinanceiro.com/valor-presente-liquido/ https://capitalresearch.com.br/blog/como-calcular-a-tir/ https://blog.nubank.com.br/payback/
Energético	- Gasto de energia com a indústria - Energia gerada com a produção dos biocombustíveis - CO₂ sequestrado com a produção de biocombustíveis	Han <i>et al.</i> (2023) Tripathi <i>et al.</i> (2019) Vaz Junior (2020) EPE (2023)

Organização: Autor (2024)

Esta pesquisa busca incentivar e evidenciar os benefícios econômicos, ambientais e sociais do reaproveitamento de resíduos agrícolas, que muitas vezes não têm utilidade após a colheita. Os resultados da análise de viabilidade técnica, econômica e energética contribuem para os ODS 2 e 12, para a construção de um modelo circular e para a avaliação da eficácia das políticas públicas de incentivo à agricultura sustentável.

3.3. Resultados e Discussões

A seção apresenta os resultados e discussões em duas partes distintas: a primeira, dedicada à construção de uma linha do tempo da matriz energética brasileira, detalha a evolução dos tipos de energia utilizados por década e responde a questões sobre a situação dos biocombustíveis no país e o papel das políticas públicas no fortalecimento do setor; a segunda parte apresenta uma análise estimada da viabilidade técnica, econômica e energética da transformação da massa residual da mandioca em biocombustíveis de 2ª geração (biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise), além da quantificação do CO₂ sequestrado pelo processo.

3.3.1. Evolução da matriz energética no Brasil

Os combustíveis fósseis ainda são amplamente utilizados em todo o mundo para geração de energia. Entretanto, esses recursos têm uma capacidade limitada e podem acabar de acordo com a quantidade utilizada. Além disto, existem os impactos socioambientais causados pela transformação e utilização desses recursos. Para suprir essa deficiência Pinheiro (2020) aponta que investimentos em tecnologias devem ser feitas na escolha de recursos que diversifiquem a matriz energética e causem menos impactos socioambientais.

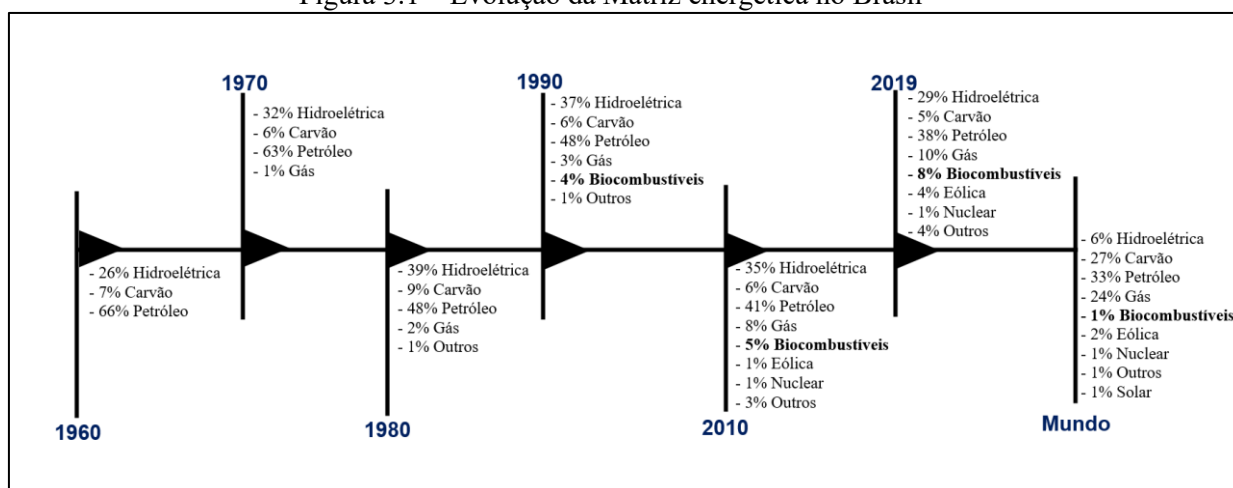
Nesse sentido, um dos maiores desafios e preocupação mundial recentemente é a emissão de gases do efeito estufa devido as mudanças globais do clima provenientes especificamente do aquecimento global. Os impactos podem ser vistos no aumento da temperatura do planeta e na qualidade do ar que é respirado.

Nos estudos de Souza e Nogueira (2022) em 2018 o Brasil emitiu cerca de 85% a menos que a China, 76% a menos que os Estados Unidos e 69% menos que a União Europeia para produzir cada MWh. Esses resultados só foram possíveis pela matriz energética brasileira

possuir uma participação de fontes renováveis de energia diversificada, com destaque para os derivados da aplicação da cana-de-açúcar.

Para ilustrar a evolução da matriz energética no Brasil, a figura 3.1 apresenta uma linha do tempo da participação das fontes de energia, organizada por década, evidenciando a predominância inicial dos combustíveis fósseis.

Figura 3.1 – Evolução da Matriz energética no Brasil



Elaborado por: Santos Jr., 2023. Retirado da: Fundação Getúlio Vargas (FGV), 2020.

Entre 1960 e 2019 houve uma diversificação da matriz energética, partindo de uma fonte predominantemente fóssil para fontes mais renováveis. Nesse panorama, segundo informações mais recentes do Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (2021) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as fontes renováveis da matriz energética brasileira são: biomassa de cana (19,1%), hidráulica (12,6%), lenha e carvão vegetal (8,9%) e outras renováveis (7,7%). Enquanto as não renováveis como petróleo e derivados (33,1%), gás natural (11,8%), carvão mineral (4,9%), urânio (1,3%) e outras (0,6%).

Essas informações mostram que a matriz energética brasileira é diversificada e a presença de energias renováveis se tornam cada vez mais presentes. De acordo com os dados do EPE, a matriz atual é composta por 48,4% de fontes renováveis e 51,6% não renováveis. Já quando se fala da matriz elétrica é bem mais limpa, com 82,9% da energia proveniente de fontes renováveis. Nesse caso, a maior participação é das hidroelétricas (65,2%), seguida pela biomassa (9,1%) e eólica (8,8%), a energia solar (1,7%) aos poucos vem ganhando destaque.

Nesse cenário, o Brasil contribui positivamente para o alcance dos objetivos da COP 27, ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa e preservar recursos não renováveis. A

comparação da matriz energética brasileira com a mundial revela a nossa relativa sustentabilidade, com destaque para a participação das hidrelétricas, que representam 29% da nossa matriz, em comparação com apenas 6% no cenário global.

Outra fonte de energia que tem ganhado destaque são os biocombustíveis, que na figura 3.1 começam a surgir com maior relevância a partir da década de 90. No Brasil, a cana-de-açúcar se destaca na produção de etanol e seus subprodutos. No entanto, a produção pode ser obtida a partir de diversas fontes, como milho, mamona e beterraba. Além disso, existem os biocombustíveis de 2ª geração, como biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise. Esta pesquisa se concentra nos biocombustíveis de 2ª geração.

Apesar da pouca participação na matriz energética (8%), o Brasil é referência na produção de biocombustíveis. Para incentivar e expandir a produção, em 2016 o Ministério de Minas e Energia (MME) criou o RenovaBio e a Política Nacional de Biocombustíveis instituída pela Lei nº 13.576/2017. Nesse contexto, o objetivo do RenovaBio é fornecer importantes contribuições para o cumprimento dos compromissos feitos no Acordo de Paris, promover a expansão dos biocombustíveis na matriz energética e assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, levando a ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção e comercialização e uso de biocombustíveis.

O funcionamento do RenovaBio consiste no estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização do setor de combustíveis, de maneira a estimular o aumento da produção e participação dos biocombustíveis na matriz energética do país. As metas de redução de emissões para a matriz de combustíveis foram definidas para o período de 2019 a 2029 pela resolução CNPE nº 15, de junho de 2019.

O RenovaBio ainda coloca que as distribuidoras de combustíveis deverão confirmar o cumprimento de metas individuais compulsórias por meio da compra de Créditos de Descarbonização (CBIO), ativo financeiro negociável em bolsa, devido a certificação do processo produtivo de biocombustíveis, com relação aos respectivos níveis de eficiência alcançados sobre as emissões.

Nessa visão, a nível nacional o RenovaBio juntamente com a Lei 13.576 representa um importante avanço no que desrespeito a implementação de políticas públicas voltada para os biocombustíveis. Dessa maneira para compreender melhor a evolução do biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise foi elaborado o quadro 3.3 que responde a três questionamentos referentes aos biocombustíveis de 2ª geração.

Quadro 3.3 – Panorama dos biocombustíveis no Brasil

Biocombustível	Situação
	De onde se partiu?
Biocarvão	Na virada do milênio pesquisadores internacionais e nacionais estudaram as chamadas Terras Pretas do Índio (TPI). Uma solução seria estocar carbono no solo pela adição de carvão. A ideia da palavra carvão remetia a ideia de desmatamento, trabalho escravo e ideias ambientalmente negativas.
	Onde se está?
	No Brasil, a empresa <i>Biochar do Brasil Sustentabilidade (BBS)</i> acredita ser a “segunda revolução verde”. A nível nacional, são particularmente os discursos de 'melhoria da fertilidade do solo' e 'melhoria da gestão dos resíduos das colheitas' que motivaram as relações e práticas dos atores. No entanto, o discurso biocarvão/tecnologia (ainda) não foi formalmente institucionalizado no Brasil. Houve a implantação da primeira <i>start-up</i> que vai transformar anualmente 16.000 toneladas de resíduos da cafeicultura.
	Onde se quer chegar?
	Implantação de novas fábricas e expansão na produção para outras regiões do Brasil. O mercado potencial de biocarvão no Brasil é de R\$ 8,8 bilhões ao ano e, somado à produção de energia, pode chegar a aproximadamente R\$ 15 bilhões anuais.
Bio-óleo	De onde se partiu?
	As políticas energéticas no Brasil começaram a ser implementadas a partir do início da década de 1970. Em 2005, o biodiesel foi introduzido na matriz energética brasileira, através da Lei 11.097.
	Onde se está?
	O Brasil é o segundo maior produtor e consumidor mundial de biodiesel; de acordo com dados da ANP (2020). O Brasil possui elevada disponibilidade de biomassa que pode ser aproveitada para produção de combustíveis de segunda geração e assim agregar valor à cadeia produtiva e contribuir para a diversificação da matriz energética do País.
Biogás ou gás pirólise	Onde se quer chegar?
	O desenvolvimento do setor de biocombustíveis no mundo tem sido dependente de apoio governamental. O envolvimento do setor privado, em geral, acompanha o engajamento dos Governos. As estratégias mais usadas são: a criação de demanda, a oferta de incentivos aos produtores e de garantias aos investidores; A demanda por biocombustíveis deverá ser maior nos países em desenvolvimento, nos quais, cada vez mais são implementadas políticas públicas que favorecem o uso dos biocombustíveis. O Brasil continua com papel de destaque no cenário mundial de produção e consumo de biocombustíveis.
	De onde se partiu?
	Entre a década de 90 e os anos 2000, o biogás voltou a ser pauta como alternativa para redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e os Créditos de Carbono. A partir do século 21, o governo federal e empresas privadas começaram a dar mais atenção para o biogás, facilitando o desenvolvimento do biogás na América do Sul.
	Onde se está?
	Segundo o biogasmap a quantidade de produção chega a 2,82 bilhões Nm ³ /ano. Com 811 plantas em funcionamento.
	Onde se quer chegar?

	Metas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE), a certificação da produção de biocombustíveis e o Crédito de Descarbonização (CBIO).
--	---

Elaborado por: AUTOR, 2024.

O quadro oferece uma visão abrangente do passado, presente e futuro do uso de biocombustíveis. No caso do biocarvão, os estudos são relativamente recentes, mas estão se tornando cada vez mais difundidos. Em nível internacional, o biocarvão ganhou destaque em premiações, como no caso de duas estudantes de pós-graduação do Instituto Pratt, em Nova York, que desenvolveram a linha de filtros de água compostáveis *Strom*.

Para o produto, utilizaram cascas de bananas, ossos de ovelhas e outros resíduos de cozinha que foram queimados em um forno, após isso foi feita a magnetização em um banho de sal ferroso para extrair metais pesados da água, enquanto os ossos foram usados para filtrar o flúor. Ainda a própolis e a resina da árvore incorporados a composição, evitam o acúmulo de sujeira e crescimento de bactérias, além de atuar como aglutinantes. Mais o principal benefício socioambiental é o tempo de decomposição que demora cerca de um mês, onde os filtros convencionais de plástico demoram centenas de anos para se decompor (Cardias, 2023).

Outra aplicação importante do biocarvão é na agricultura, onde ele pode substituir fertilizantes químicos, melhorar a produtividade e aumentar a resiliência das plantas à seca. No Brasil, existe uma empresa em Minas Gerais que produz biocarvão a partir da massa residual da plantação de café, fornecida pela Cooperativa dos Cafeicultores da Região de Lajinha (COOCAFÉ).

Nesse contexto, a aplicação do biocarvão representa um avanço significativo para o alcance das metas do ODS 2, especificamente as metas 2.3 e 2.4, que visam dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos, incluindo mulheres, povos indígenas e agricultores familiares, além de promover sistemas sustentáveis de produção de alimentos e práticas agrícolas sustentáveis (Organização das Nações Unidas, 2022).

Além dos benefícios econômicos e sociais do biocarvão, há também os benefícios ambientais, como o sequestro de CO₂, incentivado pelo RenovaBio. Estima-se que a capacidade de produção anual ultrapasse 4.500 toneladas, permitindo armazenar cerca de 6.500 toneladas de CO₂ equivalente. Atualmente, a empresa é administrada pela NetZero, uma empresa francesa que iniciou aplicações em plantações de café, com resultados positivos de produtividade. A perspectiva futura é expandir o número de fábricas de biocarvão no Brasil, devido ao seu potencial econômico e ambiental (Nascimento, 2023).

O sequestro pelo biocarvão acontece, pois, a estrutura interna inerte que é semelhante ao grafite, faz o sequestro do carbono no solo por centenas ou até milhares de anos, já a estrutura externa ou reativa atua como matéria orgânica natural do ambiente proporcionando o desenvolvimento das plantas. Dentre as funções desempenhadas pelo biocarvão destacam-se, o fortalecimento do solo pela sua estruturação, retenção da água da chuva e de irrigação para ser usada em períodos de estiagem e desmoronamento de terrenos em períodos chuvosos (Valenga *et al.*, 2024).

A produção de biocarvão gera como subprodutos o bio-óleo e o gás de pirólise. As aplicações do bio-óleo foram incorporadas à matriz energética brasileira em 2005 pela Lei nº 11.097. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor e consumidor de biodiesel do mundo. A perspectiva futura é que o país continue sendo um dos principais produtores, com a demanda por esse biocombustível aumentando principalmente em países em desenvolvimento.

Segundo especialistas do departamento de agricultura e energia dos Estados Unidos a utilização do bio-óleo pode reduzir em até 30% o consumo anual de petróleo (Serrão *et al.*, 2021). Pela possibilidade real das reservas de petróleo acabarem, o bio-óleo se torna um importante recurso para substituir o petróleo na produção de combustíveis.

O gás de pirólise é gerado durante a queima da massa residual para a produção de biocarvão. Historicamente, sua principal aplicação tem sido a geração de energia para alimentar o próprio processo de produção. É importante esclarecer que o gás de pirólise difere do biogás, que é produzido pela decomposição biológica da matéria orgânica na ausência de oxigênio.

No país atualmente segundo o Biogasmap a quantidade de produção chega a 2,82 bilhões Nm^3/ano . Com 811 plantas em funcionamento. As principais fontes de produção são aterros sanitários (51%), indústria de alimentos e bebidas (25%), suinocultura (14%) e lodo de esgoto (6%) (Milanez *et al.*, 2018). Segundo a EPE (2023), a produção futura aponta que o Brasil possui relevante potencial de produção de biogás a partir dos resíduos da agricultura/agroindústria, em adição os resíduos sólidos efluentes urbanos também podem ser utilizados para produção. Estimasse que em 2031 o potencial técnico supere os 97 bilhões Nm^3/ano .

Diante do exposto, é evidente que a utilização de biocombustíveis de 2ª geração pode gerar impactos positivos nas esferas social, econômica e ambiental. Os dados apresentados demonstram o potencial na adoção de um modelo circular, focada na preservação dos recursos naturais através da reciclagem/reaproveitamento dos resíduos. A próxima etapa da pesquisa

apresenta evidências que comprovam os benefícios da utilização dos resíduos da mandioca na produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise, por meio de uma análise de viabilidade técnica, econômica e energética.

3.3.2. Análise de viabilidade técnica, econômica e energética

Esta etapa da pesquisa visa comprovar a viabilidade técnica, econômica e energética da reciclagem dos resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca. As análises foram divididas em três partes: técnica, que avalia equipamentos, produção e transporte; econômica, que analisa custos de investimento (CAPEX), custos operacionais, receita líquida esperada, EBITDA, VPL, TIR e payback; e energética, que avalia o gasto de energia na produção, a energia gerada pelos biocombustíveis e o CO₂ sequestrado. É importante ressaltar que os valores trabalhados de forma estimada para a implantação da indústria no semiárido sergipano.

A produção de biocarvão requer equipamentos específicos para transformar a massa residual. Os equipamentos indispensáveis incluem: um triturador para reduzir o tamanho dos resíduos e auxiliar na secagem, um trator para o transporte interno do material, um reator para a pirólise da biomassa, uma ensacadeira para embalar o biocarvão e um gerador para o aproveitamento energético.

Além desses equipamentos é preciso uma carreta para realizar o transporte dos resíduos para indústria de transformação. A tabela 3.2 ilustra o itinerário pensado para coleta dos resíduos no semiárido sergipano.

Tabela 3.2 - Percorso de transporte da biomassa residual

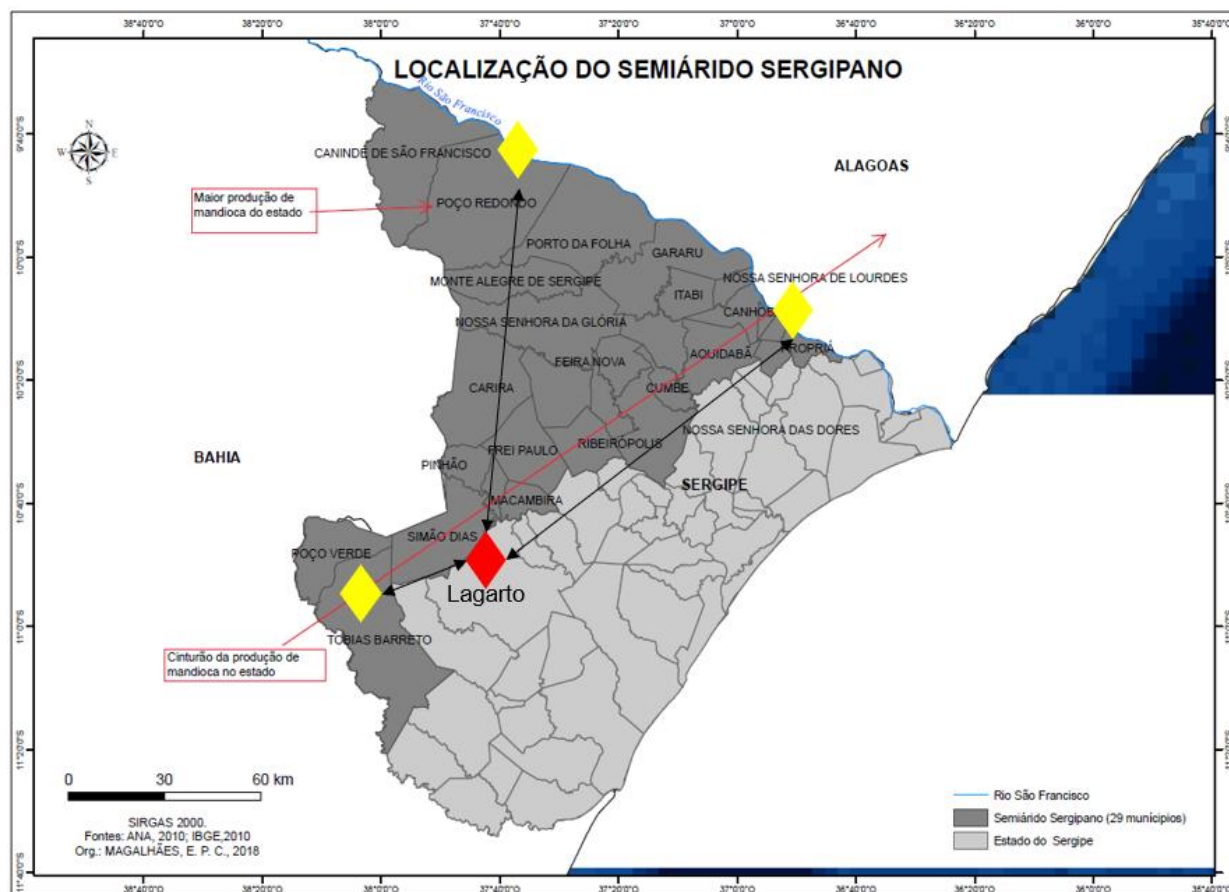
Descrição	Detalhe	Unidade	Qtd./mês
Capacidade de Transporte	Quantidade de massa armazenada	tonelada	30
Deslocamento (4 vezes em um mês)	Lagarto <-> Poço Redondo	km	1.264,80
Deslocamento (4 vezes em um mês)	Lagarto <-> Propriá	km	1.282,40
Deslocamento (4 vezes em um mês)	Lagarto <-> Tobias Barreto	km	421,6
Deslocamento total das três regiões	Poço Redondo/Propriá/Tobias Barreto	km	2.968,80

Organização: Autor, 2024.

A coleta dos resíduos de mandioca seria realizada em três municípios estratégicos do semiárido: Poço Redondo (norte), Propriá (leste) e Tobias Barreto (sul), que serviriam como bases de apoio. Cada base de apoio disporia de um local para armazenar os resíduos até a

chegada da carreta, com capacidade de 30 toneladas. Os municípios vizinhos poderiam enviar seus resíduos para essas bases. O polo de transformação estaria localizado em Lagarto. As coletas ocorreriam quatro vezes por mês, totalizando 2.968,8 km percorridos (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Transporte dos resíduos da mandioca no semiárido sergipano



Fonte: Observatório UniFG do Semiárido Nordestino (2019).

No processo de produção, a indústria teria um funcionamento contínuo por 30 dias, em um período de 24 horas por dia. De acordo com o modelo de reator, a capacidade de entrada é de 0,3 ton/h de resíduos processados. Com 30% de entrada para biocarvão, 8% para bio-óleo e 21,4% para gás de pirólise. Ao realizar uma estimativa sobre a quantidade de resíduos da mandioca gerados, o valor seria de 256 ton/mês, o que resulta no processamento de 76,8 ton/mês de biocarvão, 20,48 ton/mês bio-óleo e 54,78 ton/mês de gás de pirólise.

Para garantir a continuidade da produção de biocarvão, mesmo durante os períodos de entressafra da mandioca, e considerando o funcionamento contínuo do reator, é essencial ter uma segunda cultura para processamento. O coco surge como uma excelente opção, com produção anual de 1.384 toneladas. Estudos de Liell e Faria (2021) revelam que a casca do

coco, diferentemente dos resíduos domésticos, apresenta grande volume, peso e resistência, podendo levar de 8 a 12 anos para se decompor, além de ocupar grandes espaços e emitir gases de efeito estufa.

Nesse cenário, a transformação da casca de coco em biocarvão representa uma solução eficaz para os problemas de acúmulo de resíduos e emissão de gases poluentes. Segundo a tabela 2.4, a produção de biocarvão pode atingir 85 toneladas por ano, com o sequestro de 250 toneladas de CO₂ equivalente. A utilização da casca de coco na produção de biocarvão é apenas uma das muitas medidas que podem ser adotadas para construir um modelo de produção e consumo circular. Além disso, a produção contínua é justificada pelos altos custos energéticos e econômicos associados ao religamento do reator.

As informações obtidas nesta pesquisa representam avanços promissores para a Agenda 2030, especialmente para o ODS 12, que visa padrões de consumo e produção sustentáveis. A produção de biocarvão contribui para o manejo ambientalmente adequado dos resíduos, reduzindo a liberação de poluentes no ar, água e solo, além de transformar a massa residual das culturas em um produto de valor. A venda e o uso de bioprodutos pela agricultura familiar, juntamente com a adoção de práticas sustentáveis por aqueles que implementarem a indústria na região, são ações cruciais para o alcance do ODS 12 (Organização das Nações Unidas, 2022).

A viabilidade econômica consistiu em demonstrar o CAPEX ou custo para o investimento, custo operacional e receita líquida. E com base nos valores obtidos, descobrir os indicadores econômicos Ebitda, VPL, TIR e payback para comprovar a viabilidade da indústria.

Para melhor entendimento, a produção de biocarvão como uma unidade de pirólise móvel é uma tecnologia relativamente nova, e exige inúmeros cálculos de custos de produção. Devido a grande quantidade de informações para introdução da unidade o estudo segue o método feito pela maioria das pesquisas com a estimativa de custos determinísticos com a suposição de dados disponíveis (Keske e Ng'ombre, 2021), nesse sentido a tabela 3.3 traz o capex inicial da empresa.

Tabela 3.3 – Capex ou custo de investimento para produção de biocombustíveis de segunda geração

Item	Detalhe	Unidade	Preço Unit	Qtd	Valor/R\$
Equipamentos	Reator	R\$	338.250,00*	1	338.250,00
	Ensacadora de biocarvão	R\$	235.725,00	1	235.725,00
	Trator Utilitário	R\$	568.345,00	1	568.345,00
	Triturador	R\$	32.990,00	1	32.990,00
	Gerador para aproveitamento energético	R\$	45.000,00	1	45.000,00

	Carreta	R\$	205.000,00	1	205.000,00
Imposto aduaneiro	Impostos que incidem sobre transações do comércio exterior 15%	R\$	187.920,00	1	187.920,00
Transporte do Equipamento	Da China até o Brasil	R\$	451.000	1	451.000,00
	Porto brasileiro até o local	R\$	29.060,00	1	29.060,00
	Transporte do triturador	R\$	3.299	1	3.299,00
Instalação do reator	Salário de técnico	Dia	499	50	24.950,00
	Passagens de ida e volta	R\$	12.075,80	2	24.151,60
	Visto	R\$	1.746,50	1	1.746,50
	Soldador local (dois profissionais)	Dia	324,35	100	32.435,00
	Encanador local	Dia	324,35	20	6.487,00
	Mão de obra local	Dia	83,83	50	4.191,50
	Empilhadeira de guindaste etc.	Dia	399,20	30	11.976,00
Materiais	Material para instalação	R\$	17.465	1	17.465,00
Licença	Licença para operação	R\$	9.980	1	9.980,00
Área de Instalação	Local de funcionamento	m ²	798,40	500	399.200,00
	Galpão de armazenamento	R\$	245.605,00	1	245.605,00
	Toailete portátil	R\$	6.386,75	2	12.773,50
	fossa séptica portátil	R\$	2.500,00	1	2.500,00
Custo total do investimento = CAPEX					2.890.050,10

* Valor do dólar US\$ 5,50. Organização: Autor, 2025.

O CAPEX inicial do negócio é de R\$ 2.890.050,10, com a compra dos equipamentos, imposto sobre as transações do comércio exterior devido o reator ser transportado de outro país, o transporte dos equipamentos, e custo para instalação do reator, onde nessa parte é preciso contratar soldadores, encanadores e mão de obra local, materiais para instalação, licença para operação no local da indústria e a compra da área para instalação.

Nessa parte, o principal investimento é a compra e instalação do reator com R\$ 1.542.111,00. O valor do reator é consideravelmente alto, entretanto, o modelo de reator escolhido é o mais em conta no mercado e é específico para atender empresas que buscam começar com esse tipo de unidade de produção. Seguindo os estudos de Nematian e Ng'ombro (2021), os custos operacionais foram estimados, como mostra a tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Custo operacional na produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise

Item	Detalhe	Unidade	Preço Unit	Qtd/mês	Valor/R\$
Custo operacional fixo para produção de biocarvão	Água utilizada no reator para 30 dias	Litro	8,78	3.600,00	31.608,00
	Eletricidade para manter o reator funcionando 24h em 30 dias	kWh	0,66	87.660	57.855,60
	Eletricidade para manter o triturador funcionando 24h em 30 dias	kWh	0,66	2.880	1.900,80
	Eletricidade para manter o ensacador funcionando 24h em 30 dias	kWh	0,66	10.908	7.199,28
	Combustível utilizado (gás natural)	Litro	36,17	8.100	292.977,00

	Salário do(a) diretor(a)	Pessoas	8.000	1	8.000,00
	Trabalho	Pessoas	1.400,00	6	8.400,00
	Manutenção do reator (uma vez ao mês)	Mês	424,15	1	424,15
	Manutenção do gerador (a cada três meses)	Trimestral	324,00	4	1.296,00
	Depreciação ensacadora para o biocarvão	Dia	65,48	30	1.964,40
	Depreciação triturador	Dia	9,16	30	274,80
	Depreciação gerador	Dia	12,50	30	375,00
	Depreciação do reator (8 anos)	Dia	1.044,40	30	31.332,00
	Depreciação trator	Dia	394,68	30	11.840,40
	Depreciação carreta	Dia	142,36	30	4.270,80
	Depreciação galpão de armazenamento (25 anos)	Dia	27,28	30	818,40
	Impostos (lucro presumido de 0,54% em cima do faturamento)	Mês	6.633,64	30	6.633,64
Parcial do custo operacional de produção do biocarvão					467.170,27
Custo fixo com transporte	Custo para recolher a massa residual da mandioca	km	2,59	2.968,80	7.689,19
	Custo mensal com óleo do motor	km	0,0589	2.968,80	174,86
	Custo mensal com óleo da transmissão	km	0,164	2.968,80	486,88
	Custo mensal com óleo hidráulico	km	0,01	2.968,80	29,69
	Custo mensal com graxa	km	0,019	2.968,80	56,41
	Custo de manutenção com caminhão	Mês	0,95	2.968,80	2.820,36
	Custo com pneus	Mês	0,64	2.968,80	1.900,03
Parcial do custo fixo com transporte					13.157,42
Custo fixo					480.327,69
Custo variável com a matéria prima	Massa residual da mandioca	Tonelada	600,00	368	220.800,00
Trator	Trator responsável por movimentar a matéria prima	Litro	5,15	108	556,20
Embalagem	Bolsas para o biocarvão	Tonelada	228,95	4	915,80
Custo Variável					222.272,00
Custo Total					702.599,69

Organização: Autor, 2025.

O custo operacional da unidade de produção foi dividido em custos fixos e variáveis. Os custos fixos, totalizando R\$ 480.327,69, incluíram despesas com água, energia, salários, manutenção, depreciação, impostos e transporte da massa residual por carreta. Os custos variáveis, totalizando R\$ 222.272,00, abrangem a compra de matéria-prima, materiais para ensacar o biocarvão e combustível para o trator. O custo operacional total, que é a soma dos custos fixos e variáveis, foi de R\$ 702.599,69.

A receita líquida com a comercialização dos biocombustíveis é vista na tabela 3.5. As quantidades produzidas são vendidas em grande quantidade, onde o objetivo é a venda em atacado, com a venda por tonelada.

Tabela 3.5 - Receita com a produção de biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise e CO₂ sequestrado

Item	Detalhe	Unidade	Preço Unit	Qtd/mês	Valor/R\$
Biocarvão	30% de entrada	Tonelada	7.549,00	108	833.409,60
Óleo de alcatrão (bio-óleo)	8% de entrada	Tonelada	4.404,00	29,44	129.653,76
Gás de Pirólise	21,4% de entrada	Tonelada	-	-	-
Sequestro de Carbono	CO ₂ sequestrado pelo processo de produção	Tonelada	435,00	119,54	51.999,90
Receita Mensal bruta					1.015.063,26
Lucro Líquido					312.463,57

Organização: Autor, 2025.

A receita bruta proveniente da venda dos biocombustíveis e do CO₂ sequestrado totalizaria R\$ 1.015.063,26, quase um milhão de reais por mês. A transformação dos resíduos agrícolas e agroindustriais em biocarvão proporcionaria uma significativa valorização, com a tonelada sendo vendida a R\$ 7.549,00, em comparação com os R\$ 600,00 por tonelada da massa residual não processada. Isso demonstra os excelentes resultados da transformação da massa residual.

Para comprovar o valor comercial do biocarvão os estudos de Rex *et al.* (2023) enfatizam que a pirólise da massa residual pode acrescentar valor econômico aos resíduos, e além disto gerar produtos adicionais como bio-óleo e o gás de pirólise. Esse gás pode ser aplicado na indústria para o aproveitamento energético e economia de energia.

Com base nos valores apresentados, foram calculados os indicadores de viabilidade econômica. O VPL de R\$ 8.099.281,72, um valor positivo, indica a lucratividade da unidade em operação. A TIR de 97%, um valor consideravelmente alto, também demonstra a rentabilidade do empreendimento. A margem EBITDA de 1,26, próxima de 1, indica que o negócio é rentável. Por fim, o payback de um ano demonstra a rápida recuperação do investimento inicial. Esses resultados corroboram as expectativas de pesquisas anteriores, como Rex *et al.* (2023) e Nematian e Ng'ombro (2021), sobre os impactos positivos da introdução de indústrias desse tipo na construção de modelos produção circular como estratégia na busca da sustentabilidade.

Os resultados obtidos nessa etapa da pesquisa conversam e servem como resposta para as evidências extraídas no quadro 1.5 sobre os desafios e limitações para incorporação da EC na gestão dos resíduos da agricultura/agroindústria. A pesquisa incentiva a inovação e uso de tecnologias sustentáveis aplicadas na agricultura para transformação dos resíduos em novas fontes de oportunidades, mostrou a necessidade de políticas públicas que fortaleçam o setor de biocombustíveis, principalmente mostrando o potencial que esse mercado tem para o futuro.

O estudo também aborda a dimensão social, enfatizando a participação dos agricultores familiares no cultivo e beneficiamento da mandioca. O objetivo é introduzir práticas de produção sustentáveis que beneficiem diretamente as comunidades onde esses agricultores estão inseridos. Além disso, o estudo responde à preocupação com o aspecto financeiro, demonstrando, através de indicadores de viabilidade econômica, resultados favoráveis para a criação de indústrias desse tipo.

Os biocombustíveis de 2ª geração surgem como uma solução eficaz para a gestão de resíduos, promovendo o tratamento adequado através da reciclagem de resíduos agrícolas e minimizando os impactos sociais, econômicos e ambientais. Além disso, eles contribuem para a sustentabilidade da produção, melhorando a qualidade do solo.

Seguindo adiante, a última parte analisou a viabilidade energética com a unidade de produção. O primeiro passo foi o levantamento dos gastos energéticos pela atividade de transporte e operação de equipamentos e máquinas (tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Gasto energético com a indústria de biocarvão

Descrição	Detalhe	Unidade	Qtd./mês
Operacional	Elettricidade para manter o reator funcionando 24h em 30 dias	kWh	26.640
Operacional	Elettricidade para manter o triturador funcionando 24h em 30 dias	kWh	2.880
Operacional	Elettricidade para manter o ensacador de biocarvão ligado	kWh	10.908
Operacional	Combustível utilizado (gás natural)	Litro	8.100
Transporte	Transporte da massa residual entre as cidades	km	2.968,80
Transporte	Diesel gasto para transporte da massa residual entre as cidades	Litro	534,38
Transporte	Transporte interno da massa residual e biocarvão pelo trator	km	600
Transporte	Combustível utilizado no trator	Litro	108

Organização: Autor, 2025.

Durante a operação, foram consumidos 29.520 kWh de eletricidade e 8.742,38 litros de combustível, percorrendo 3.568,8 km. Esse processo de operação e transporte resulta na emissão de gases, como o dióxido de carbono, que podem prejudicar a saúde e contribuir para as mudanças climáticas através do efeito estufa.

Nesse cenário, os efeitos econômicos e socioambientais positivos da produção de biocarvão se tornam mais evidentes quando o custo do carbono é incorporado ao sequestro de CO₂. Além disso, a aplicação do biocarvão para correção do solo ganha relevância quando o custo de conservação da água é considerado.

Com a identificação dos gastos energéticos para produção do biocarvão é calculado se existem benefícios ambientais com o sequestro de CO₂ e aproveitamento energético pela utilização do gás de pirólise. Para tanto, as tabelas 3.7 e 3.8 apresentam a quantidade de CO₂ sequestrada com a unidade de produção e energia gerada pela utilização do gás de pirólise.

Tabela 3.7 – Estimativa do CO₂ gerado e sequestrado com a produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise

Item	Detalhe	Unidade	Qtd./mês
CO ₂ produzido com a operação	Gás natural para funcionamento do reator (Mês)	Tonelada	15,39
	Transporte da massa residual entre as cidades	Tonelada	1,44
	Transporte interno do trator	Tonelada	0,29
	Total de CO ₂ produzido	Tonelada	17,12
CO ₂ sequestrado com a operação	CO ₂ sequestrado com a aplicação do biocarvão	Tonelada	119,54
Balanco de carbono*		Tonelada	-102,42

* O valor negativo indica que a quantidade sequestrada com a produção e aplicação do biocarvão é maior que a quantidade produzida pelo processo de funcionamento da unidade de produção. Organização: Autor, 2025.

Tabela 3.8 - Energia gerada com a produção de biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise

Item	Detalhe	Unidade	Qtd./mês
Energia consumida com a operação	Eleticidade para manter o reator funcionando 24h em 30 dias	kWh	87.660
	Eleticidade para manter o ensacador de biocarvão	kWh	10.908
	Eleticidade para manter o triturador funcionando 24h em 30 dias	kWh	2.880
	Total de energia consumida	kWh	101.448
Energia produzida com a operação	Energia produzida pela queima da massa residual	kWh	1.386.389
Balanco energético*		kWh	-1.284.940

* O valor negativo indica que a quantidade produzida de energia com a queima da massa residual é maior que o gasto energetico para o funcionamento da unidade de produção. Organização: Autor, 2025.

A produção total de CO₂ foi de 17,12 toneladas/mês, enquanto o sequestro atingiu 119,54 toneladas/mês, resultando em um balanço de carbono positivo de -102,42 toneladas/mês. Esse resultado evidencia benefícios ambientais e econômicos significativos devido ao acúmulo de CO₂. Na tabela 3.8, o consumo de energia da unidade foi de 101.448 kWh/mês, enquanto a produção de energia pela pirólise da massa residual alcançou 1.386.389

kWh/mês, resultando em um balanço energético positivo de -1.284.940 kWh/mês. Esse valor corrobora os benefícios positivos na questão energética.

A viabilidade energética do projeto responde a duas evidências do quadro 1.5: o aprisionamento de CO₂ no solo pela aplicação de biocarvão, que diminui a emissão de poluentes na atmosfera, e o aproveitamento energético do processo de produção de biocombustíveis de 2ª geração.

A construção de uma unidade como esta poderia ser viabilizada por meio de incentivos públicos e privados. No setor público, o incentivo viria de financiamentos governamentais, de organizações ou de outras entidades. No setor privado, o incentivo partiria dos próprios agricultores, que buscariam formas de implementar a unidade de pirólise.

Diante da análise de viabilidade técnica, econômica e energética, conclui-se que a introdução de uma unidade de pirólise para resíduos agrícolas e agroindustriais no semiárido sergipano traria benefícios significativos para os agricultores da região, especialmente os pequenos agricultores familiares, que teriam acesso a essa tecnologia. Além disso, a tecnologia de produção promove um processo circular e sustentável.

No entanto, a construção da economia circular só será possível com a participação ativa dos governos, através da implementação de políticas que priorizem a sustentabilidade como pilar central. Estudos como o de Rex *et al.* (2023) demonstram que a implantação de programas e subsídios para unidades de produção de biocarvão e descarbonização pode gerar impactos positivos na divulgação e conscientização do público sobre o descarte correto de resíduos.

3.4 Considerações Finais

As observações indicam que a matriz energética brasileira pode ser considerada predominantemente sustentável, devido à sua composição majoritariamente renovável. Destacam-se a produção de energia hidrelétrica, gás natural, biocombustíveis e eólica. Ao comparar a produção nacional com a mundial, fica evidente como a matriz brasileira atende aos critérios de sustentabilidade na preservação dos recursos.

Nesse contexto, o país tem intensificado a produção de energia a partir de biocombustíveis, visando diversificar a matriz energética e gerar impactos ambientais positivos. Para isso, foram criados o RenovaBio e a Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela Lei nº 13.576/2017, com o objetivo de expandir e aprimorar a produção no país.

A utilização de biocombustíveis assegura ganhos econômicos e ambientais, além de reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Esta pesquisa concentrou-se na produção de biocombustíveis de 2ª geração e no processo de descarbonização. No Brasil, existe uma unidade de processamento de resíduos para produção de biocarvão, que iniciou suas atividades em maio de 2023 na cidade de Lajinha Minas Gerais, representando um marco importante no setor e outra em construção.

Neste cenário de pouca informação sobre unidades desse tipo, foi demonstrada a viabilidade técnica, econômica e energética com a introdução a unidade de produção no semiárido sergipano. Os resultados mostraram-se promissores para incorporação da indústria a partir dos resíduos da mandioca, com benefícios sociais, econômicos e ambientais para os pequenos(as) agricultores(as) familiares. Os indicadores financeiros mostram que o financiamento da unidade de produção teria resultados positivos para os agricultores.

Diante disso, espera-se que, no futuro, mais unidades desse tipo sejam implementadas em todo o país, possibilitando a introdução de modelos circulares de produção e a realização de novos estudos, tecnologias e políticas públicas inovadoras no setor de biocombustíveis.

REFERENCIAS

AGROTAMA. **Gerador de Energia a Diesel 72 Kva Trifásico 110-220v Silenciado com QTA - ND72100ES3QTA - Nagano**. 2023. Disponível em: <https://www.agrotama.com.br/produtos/gerador-de-energia-a-diesel-72-kva-trifasico-110-220v-silenciado-com-qta-nd72100es3qta/nagano-ND72100ES3QTA,26,878/>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

ALMEIDA-GUZMÁN, M.; DÍAZ-GUEVARA, C. **Economia circular, uma estratégia para o desenvolvimento sustentável. Avança no Equador**. Estudios de la Gestión: revista internacional de administración, (8), 34-56, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.10>

ASPOSE. **Calculadora de VPL. 2024**. Disponível em: [https://products.aspose.app/cells/pt/npv-calculator#:~:text=Cells%20Calculadora%20de%20VPL,\(VPL\)%20com%20um%20toque](https://products.aspose.app/cells/pt/npv-calculator#:~:text=Cells%20Calculadora%20de%20VPL,(VPL)%20com%20um%20toque). Acesso em: 20 de junho de 2024.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa SELIC**. 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 20 de junho de 2024.

BESTON GROUP. **Máquina biochar móvel**. 2024. Disponível em: <https://www.bestongroup.com/pt/mobile-biochar-machine/>. Acesso em: 20 de junho de 2024.

BRASIL. Lei nº 11.097 de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 2005.

BRASIL. Lei nº 13.576 de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 2017.

CAPITAL NOW. **Como calcular a TIR e usar a Taxa Interna de Retorno para investir**. 2019. Disponível em: <https://capitalresearch.com.br/blog/como-calcular-a-tir>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

CARDIAS, B. B. **Biocarvão: alternativa para remediação de água e solos**. Revista Blog do Profissão Biotec, v.10, 2023. Disponível em: <<https://profissaobiotec.com.br/biocarvao-alternativa-para-remediacao-agua-solos/>>. Acesso em: 10/07/2023.

CETRO. **Moinho CTS – 80. 2023**. Disponível em: <https://www.cetro.com.br/moinho-cts-80/>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

CTT CONTABILIDADE. **O que é depreciação? 2023**. Disponível em: [https://cltcontabilidade.com.br/o-que-e-depreciacao-aprenda-a-fazer-o-calculo/#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20linha%20reta%20divide,estimada%20\(anos%20ou%20meses\)](https://cltcontabilidade.com.br/o-que-e-depreciacao-aprenda-a-fazer-o-calculo/#:~:text=O%20m%C3%A9todo%20linha%20reta%20divide,estimada%20(anos%20ou%20meses).). Acesso em: 10 de outubro de 2023.

DICIONARIO FINANCEIRO. **O que é VPL e como calcular**. 2022. Disponível em: <https://www.dicionariofinanceiro.com/valor-presente-liquido/>. Acesso em; 10 de outubro de 2023.

EMBRAPA. **VII Plano Diretor da Embrapa: 2020–2030 / Embrapa**. – Brasília, DF : Embrapa, 2020.

EMDAGRO. **Relatório de Atividades 2020**. Sergipe. 2018.

EPE. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2021: ano base 2020**. Brasília, 2021.

EPE. **Potencial técnico do biogás de resíduos**. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília. 2023.

EXCEL GENIAL. **Como calcular VPL no EXCEL**. 2021. Disponível em: <https://excelgenial.com.br/como-calcular-vpl-no-excel/>. Acesso em 10 de outubro de 2023.

FAO. **Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura**. Faostat. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QD>. Acesso em: 25 de julho de 2023.

FARIAS NETO, A. L.; NASCIMENTO, A. F.; ROSSONI, A.; MAGALHÃES, C. D. S.; ITUASSU, D.; HOOGERHEIDE, E.; INGO ISERNHAGEN, C. P. A. M. T. **Embrapa Agrossilvipastoril: primeiras contribuições para o desenvolvimento de uma agropecuária sustentável**. 2019.

HAN, K. H.; YUN, S. I.; KWAK, J. H.; LEE, S. I. **A Review on International Carbon Credit Certification Methodologies for Biochar as a Soil Amendment**. Korean Journal of

Soil Science and Fertilizer, 56(4), 572-594. 2023.
<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.4.572>

KUMAR, N.; GUPTA, S. K. **Advances in Thermochemical Valorization of Agricultural Waste**. In Agricultural Waste to Value-Added Products: Technical, Economic and Sustainable Aspects (pp. 159-176). Singapore: Springer Nature Singapore. 2023.
<https://doi.org/10.1007/978-981-99-4472-9>

LIELL, C.; FARIA, A. **Possibilidades de utilização da casca de coco verde**. OLIVEIRA, R. Gestão de resíduos e a elaboração de bioprodutos para uso na agricultura: pesquisa e aplicação. Guarujá: Científica Digital. 2021.
<https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/210805827.pdf>

LIMA, A. F.; ASSIS SILVA, E. G.; FREITAS IWATA, B. **Agriculturas e agricultura familiar no Brasil: uma revisão de literatura**. Retratos de Assentamentos, 22(1), 50-68, 2019. DOI: <https://doi.org/10.25059/2527-2594/retratosdeassentamentos/2019.v22i1.332>

MACHINEFINDER. **2023 John Deere 5125R**. 2023. Disponível em:
<https://www.machinefinder.com.br/ww/pt-BR/machines/9953472>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. S.; SOUZA, J. A. P.; LEMOS, M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47 , p. [221]-275, 2018. <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15384>

NASCIMENTO, A. **MG ganha fábrica de produto a base de café que melhora o solo para agricultura. Minas Gerais**. 2023. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/economia/mg-ganha-fabrica-de-produto-a-base-de-cafe-que-melhora-o-solo-para-a-agricultura-1.2853558>. Acesso em: 26 de julho de 2023.

NEMATIAN, M., KESKE, C., & NG'OMBE, J. N. **A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass**. Waste Management, 135, 467-477, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.014>

NU. **Payback o que é e como calcular?** 2022. Disponível em:
<https://blog.nubank.com.br/payback/>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

UNIFG. **Observatório UniFG do Semiárido Nordeste**. 2019 Disponíveis em:
<http://observatorio.faculdadeguanambi.edu.br>. Acesso em: 26 ago. 2019

OLIVEIRA, M. A. C.; SHINOHARA, A. H. **A experiência com gás natural/GLP no polo gesseiro do Araripe, PE**. *Cerâmica*, 60, 243-253. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000200013>

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. ODS, p. 31, 2015.

PINHEIRO, M. B. C. **Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Economia Rural. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. <http://dx.doi.org/10.51861/ded.dmvu.2.013>

REX, P.; MOHAMMED ISMAIL, K. R.; MEENAKSHISUNDARAM, N.; BARMAVATU, P., SAI BHARADWAJ, A. V. S. L. **Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy**. ChemEngineering, 7(3), 50, 2023. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>

ROTOCHOPPER. GB – 250. 2023. Disponível em: <https://www.rotochopper.com/product/gb-250/>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

SILVA, L. L.; BAPTISTA, F.; CRUZ, V. F.; SILVA, J. R. M. **Aumentar as competências dos agricultores para a prática de uma agricultura sustentável**. Revista de Ciências Agrárias, 43(2), 240-252, 2020. <https://doi.org/10.19084/rca.19942>

SERRÃO, A. C. M.; SILVA, C. M. S.; COSTA, A. F. P.; SILVA, H. J. R.; SANTOS, M. C.; SILVA, H. A; MACHADO, N. T. **Análise do processo de pirólise de sementes de Açaí (Euterpe Oleracea, Mart): Influência da temperatura no rendimento dos produtos de reação e nas propriedades físico-químicas do Bio-Óleo**. Brazilian Journal of Development, 7(2), 18200-18220, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-453>

SOUZA, T. A., & NOGUEIRA, F. J. **Fontes alternativas de energia no brasil: biomassa, eólica e solar**. Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica, 4(1), 2022.

TRIPATHI, N.; HILLS, C. D.; SINGH, R. S.; ATKINSON, C. J. **Biomass waste utilization in low-carbon products: harnessing a major potential resource**. Nature NPJ / Climate and Atmospheric Science, n. 35, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>

VAZ JUNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. – Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 1 ed., 1-29, 2020. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1126255/1/S-VAZ-Aproveitamento-de-resi769duos-agroindustriais.pdf>

VALENGA, M. G. P.; GEVAERD, A.; MARCOLINO-JUNIOR, L. H.; BERGAMINI, M. F. **Biochar from sugarcane bagasse: Synthesis, characterization, and application in an electrochemical sensor for copper (II) determination**. Biomass and Bioenergy, 184, 107206. 2024. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4586821>

Resíduos da Mandioca no Semiárido Sergipano: Análise de Cenários Linear e Circular

RESUMO

O modelo econômico, baseado na extração, produção e descarte de materiais, tem causado sérios problemas ambientais. No setor agrícola, o impacto é evidenciado pela geração de resíduos decorrente da colheita e do beneficiamento das culturas. Neste contexto, a Economia Circular emerge como uma alternativa para a construção de um sistema agrícola sustentável, por meio da valorização e do reaproveitamento dos resíduos gerados no processo. O objetivo do estudo foi demonstrar o potencial ambiental, social e econômico da biomassa vegetal da mandioca. Para tal fim, a pesquisa utilizou a Dinâmica de Sistemas (DS) na construção de cenários baseados nos modelos de economia linear e circular. Os resultados evidenciam que, no cenário linear, os impactos negativos são maiores para o meio ambiente e a sociedade. Embora um maior valor econômico seja obtido, não há mercado estabelecido para a comercialização da biomassa crua. Em contraste, o cenário circular apresentou benefícios significativos nos três pilares da sustentabilidade, decorrentes da transformação da biomassa em biocombustíveis de segunda geração. Em conclusão, a incorporação do modelo circular de produção e consumo representa avanços significativos no alcance dos ODS 2 e 12, viabilizando a adoção de um novo paradigma de gestão pautado na Economia Circular para os resíduos da agricultura.

Palavra-chave: Agricultura sustentável, biomassa vegetal, dinâmica de sistemas, economia circular.

ABSTRACT

The economic model, based on the extraction, production, and disposal of materials, has caused serious environmental problems. In the agricultural sector, the impact is evidenced by the generation of waste resulting from the harvesting and processing of crops. In this context, the Circular Economy emerges as an alternative for building a sustainable agricultural system, through the valorization and reuse of waste generated in the process. The objective of this study was to demonstrate the environmental, social, and economic potential of cassava plant biomass. To this end, the research used System Dynamics (SD) in the construction of scenarios based on linear and circular economy models. The results show that, in the linear scenario, the negative impacts are greater for the environment and society. Although a higher economic value is obtained, there is no established market for the commercialization of raw biomass. In contrast, the circular scenario presented significant benefits in the three pillars of sustainability, resulting from the transformation of biomass into second-generation biofuels. In conclusion, incorporating the circular production and consumption model represents significant progress in

achieving SDGs 2 and 12, enabling the adoption of a new management paradigm based on the Circular Economy for agricultural waste.

Key words: Sustainable agriculture, plant biomass, system dynamics, circular economy.

4.1. Introdução

O desenvolvimento humano sempre esteve intrinsecamente ligado à exploração dos recursos naturais, seja para fins de alimentação, produção de bens essenciais ou geração de energia. Os avanços obtidos impulsionaram a expansão e o crescimento demográfico global. Este crescimento está atrelado à crescente urbanização e ao consumo, fatores que promovem a extração de recursos naturais não renováveis e a produção e disposição final de um volume expressivo de resíduos (Moreira *et al.*, 2020). Neste cenário, o setor agrícola desempenha um papel central na geração e no descarte desses resíduos, em conformidade com os padrões de consumo vigentes.

A projeção de uma população global de 11,2 bilhões até 2100, com concentração majoritária na Ásia e África (United Nations, 2017), impõe uma reflexão crítica sobre a demanda alimentar futura. Em âmbito nacional, a intensificação da concentração populacional em núcleos urbanos agrava o acúmulo de resíduos e sobrecarrega a capacidade dos aterros sanitários (Zorpas *et al.*, 2018). Diante desse cenário complexo, a produção de alimentos necessita de adequação para suprir os padrões de consumo, o que resulta inevitavelmente na geração de subprodutos e resíduos. Tal dinâmica configura um imperativo para a adoção de soluções sustentáveis, visando à mitigação dos impactos ambientais.

No âmbito nacional, o setor agrícola constitui um dos pilares que alicerçam a economia do país, desempenhando um papel crucial no abastecimento interno e nas exportações. Sua relevância se estende à agricultura familiar, a qual é responsável por uma parcela significativa do fornecimento de alimentos e matérias-primas ao mercado. Nesse contexto, 85% dos estabelecimentos rurais brasileiros são classificados como de base familiar (Del Fiori, 2017). O país detém uma área cultivada de cerca de 850 milhões de hectares, distribuída em diversas condições climáticas e tipos de solos, o que o posiciona na quarta colocação do *ranking* mundial em área produtiva (Ministério de Minas e Energia, 2019).

Nesse panorama, quando dispostos no meio ambiente, os resíduos agrícolas podem deflagrar impactos ambientais de elevada magnitude, notadamente a contaminação de corpos d'água e a poluição atmosférica. Essa degradação compromete a qualidade hídrica, sobretudo pelo processo de eutrofização. Este é desencadeado pelo excesso de matéria orgânica e pela proliferação algal, resultantes dos altos teores de nutrientes como o fósforo (P) e o nitrogênio (N) presentes na biomassa residual. Adicionalmente, ocorre a emissão de metano (CH₄) na atmosfera, um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global superior ao dióxido de carbono (CO₂). Conforme dados apresentados na reunião do G20 em 2024, as emissões de CH₄ provenientes do setor agrícola alcançaram 3,5 bilhões de toneladas no período até 2020 (Brasil, 2024).

Segundo Moreira *et al.* (2020), a população mundial confronta a crescente complexidade dos desafios ambientais, sociais e econômicos, cuja intensidade é agravada pela limitação da capacidade produtiva de alimentos. Esta limitação é decorrente de fatores como as mudanças climáticas, a poluição atmosférica, a degradação edáfica (do solo) e a perda de biodiversidade.

Tais desafios são catalisados pelas práticas de extração, produção, consumo e disposição final de resíduos, inerentes ao modelo econômico linear, que prioriza o benefício econômico em detrimento da sustentabilidade. Consequentemente, este modelo alicerça-se na exploração contínua e exaustiva dos recursos naturais, conduzindo à sua degradação.

Embora o solo seja classificado como um recurso renovável no setor agrícola, sua taxa de renovação não se coaduna com o tempo humano. Consequentemente, sua recuperação demanda um período prolongado devido às práticas realizadas. Adicionalmente, fatores climáticos impactam a qualidade edáfica para as atividades agrícolas, podendo induzir a escassez de recursos e a elevação dos custos de extração da matéria-prima. Por fim, são gerados resíduos ao término do ciclo produtivo, cuja gestão e disposição final devem ser sustentáveis para mitigar os riscos de dano ambiental (Esposito *et al.*, 2017; Korhonen *et al.*, 2018).

O esgotamento dos recursos naturais e a degradação ambiental demandam a adoção de um novo paradigma econômico. Nesse contexto, emerge a EC, caracterizada como um modelo de produção inerentemente restaurativo e regenerativo (Burger *et al.*, 2019). O objetivo primordial desse novo modelo é transcender os padrões de consumo vigentes, estabelecendo um equilíbrio sustentável entre os âmbitos econômico, ambiental e social.

Na perspectiva de Weetman (2019), a EC apresenta uma ambição que transcende a mera reciclagem de materiais ou o objetivo de descarte zero em aterros sanitários. O conceito simboliza a expansão da cadeia de valor, englobando a totalidade do ciclo de vida do produto. Isso implica o redesenho dos produtos e a otimização do uso de matérias-primas, abrangendo novas estratégias para renovar, reparar, remanufaturar e distribuir o produto para comercialização.

A EC pode ser comparada a sistemas biológicos que, inerentemente, se autorregulam, se auto mantêm e se autorrenovam. O princípio da circularidade reside na interconexão de todo o processo produtivo, no qual o resíduo gerado é reintroduzido no sistema, realimentando-o por meio da reciclagem ou da recuperação energética. A implementação da EC promove impactos positivos na geração de empregos devido à demanda por mão de obra qualificada em áreas como remanufatura, serviços técnicos, inovação e logística reversa (*Ellen MacArthur Foundation*, 2018).

Adicionalmente, a *Fundação Ellen MacArthur* destaca benefícios ambientais como a redução na emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e, sobretudo, a diminuição do volume de resíduos dispostos em aterros sanitários. Tais benefícios estendem-se à redução no consumo de insumos primários, englobando fertilizantes sintéticos, pesticidas, recursos hídricos para irrigação e combustíveis.

A transição paradigmática do modelo linear para o circular é essencial para enfrentar os desafios ambientais, econômicos e sociais contemporâneos e para a consecução de um desenvolvimento sustentável integral. A adoção da Economia Circular representa um passo crucial para a fundamentação de um futuro mais equilibrado e resiliente (Espinoza, 2023).

No setor agrícola, a transição para o modelo circular fomenta uma série de oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e práticas de comercialização lucrativas com os subprodutos gerados durante a produção. Moreira *et al.* (2020) estabelecem que essa transição deve ser guiada por três princípios fundamentais: minimização de insumos externos ao sistema produtivo; mitigação das descargas negativas no meio ambiente; e ciclagem de nutrientes e valorização dos resíduos agrícolas.

A dependência da agricultura de insumos externos, como fertilizantes minerais, herbicidas e defensivos agrícolas, elevou-se substancialmente nas últimas décadas. Dobermann (2016) ressalta a baixa eficiência de uso de muitos desses insumos, citando o exemplo dos

fertilizantes nitrogenados, no qual se estima que até 50% do nitrogênio aplicado seja perdido (lixiviado ou volatilizado), o que acarreta impactos ambientais negativos.

A ciclagem eficiente de nutrientes exige a reincorporação dos resíduos agrícolas no sistema produtivo, seja como cobertura vegetal, fertilizante ou condicionador edáfico. Adicionalmente, esses resíduos podem ser valorizados por meio da produção de energia, insumos químicos ou pela comercialização dos subprodutos da transformação da biomassa residual, como biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise, fomentando uma bioeconomia mais abrangente.

Neste contexto, a simulação de cenários emerge como uma ferramenta estratégica para visualizar os problemas inerentes ao modelo linear e os resultados advindos da adoção do modelo circular de produção agrícola. Para este fim, os cenários demonstram o comportamento da gestão dos resíduos provenientes do processo de colheita e beneficiamento, comparando as situações sem e com a produção de biocombustíveis de segunda geração. A valorização desses resíduos não apenas promove a circularidade do sistema agrícola, mas também proporciona benefícios ambientais, econômicos e sociais (Tiossi e Simon, 2021). Especificamente, as simulações permitem a visualização dos impactos ambientais, sociais e econômicos resultantes da transformação da biomassa de mandioca.

A pesquisa realizou uma análise da transformação dos resíduos da cultura da mandioca (parte aérea, casca e manipueira) no semiárido sergipano em biocombustíveis de segunda geração. Para tal, foram construídos cenários comparativos, baseados nos modelos econômicos linear e circular, com o objetivo de demonstrar o potencial de valorização dos resíduos provenientes da colheita e do beneficiamento. Tais cenários ilustraram os princípios da linearidade da produção, contrastando-os com os da circularidade. A modelagem dos cenários foi conduzida em um *software* especializado em Dinâmica de Sistemas, apto a simular sistemas complexos.

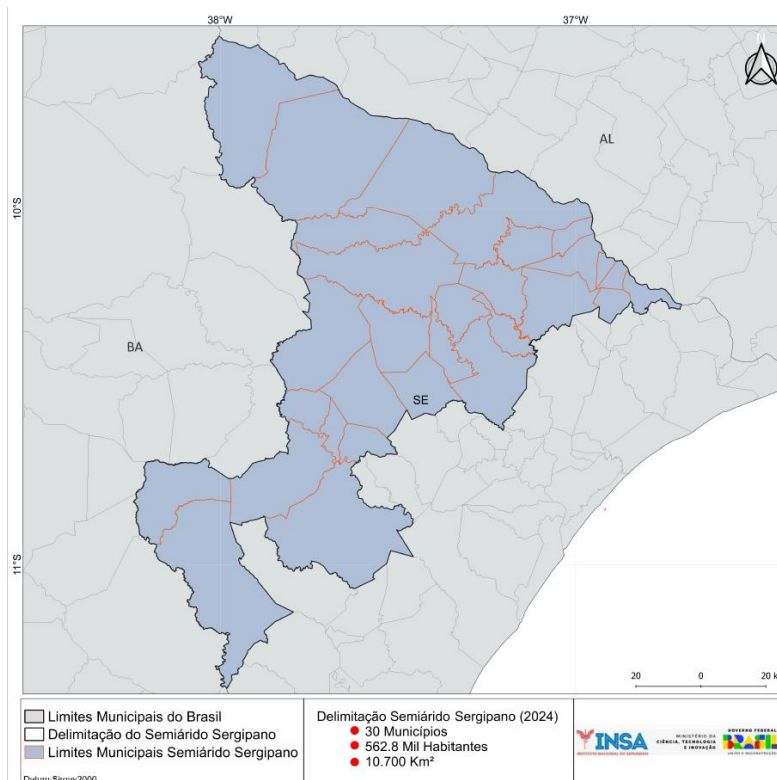
4.2 Metodologia

O estudo empregou a Dinâmica de Sistemas como ferramenta metodológica para a construção de cenários prospectivos para biomassa da colheita e beneficiamento da mandioca produzida no semiárido sergipano. A modelagem da pesquisa utilizou dois cenários: um linear, que mantém o modelo produtivo tradicional, e um circular, que avalia a valorização dos resíduos da colheita e do beneficiamento da mandioca. A comparação entre esses cenários permitiu analisar os impactos socioeconômicos e ambientais da transição para EC.

4.2.1 Delimitação da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida no semiárido sergipano, território que compreende 30 municípios (figura 4.1). Nessa região, a cultura da mandioca se sobressai, sendo cultivada principalmente por agricultores familiares, o que a torna um elemento central da economia local (Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe, 2020).

Figura 4.1 – Localização da região semiárida sergipana



Fonte: Instituto Nacional do Semiárido, 2024.

Dentro desse contexto a mandioca desempenha um papel fundamental na agricultura familiar, especialmente em regiões como o semiárido brasileiro, por diversos motivos: segurança alimentar, geração de renda, adaptação, resiliência e cultura de tradição.

Por ser uma cultura resistente e adaptável a diferentes condições climáticas, como a seca, a mandioca se torna uma fonte segura de alimento para as famílias que vivem em áreas de escassez de água. Além do consumo próprio, ela pode ser comercializada de diversas maneiras: *in natura*, como farinha, fécula, polvilho bem como outros produtos, gerando renda para as famílias de agricultores. Por ser uma cultura que exige poucos cuidados, a mandioca se torna apta para agricultura familiar que dispõe de recursos limitados, além de ser uma cultura resiliente, capaz de se desenvolver em climas adversos e solos pobres. Por fim, o cultivo da mandioca é algo cultural passado de geração para geração por comunidades rurais, sendo utilizada em receitas e pratos culinários (Lemos; Santiago, 2020).

A mandioca se destaca no cenário agrícola brasileiro, ocupando a sétima posição no ranking de valor de produção, com R\$ 19.178.164 em 2023. Este dado, divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023), ressalta a importância econômica da cultura, que figura entre as principais do país, superada apenas por soja, cana-de-açúcar, milho em grão, café, algodão e laranja.

A mandioca desempenha um papel significativo na agricultura sergipana, com uma produção total de 156.980 toneladas. Destaca-se o semiárido, responsável por 62.487 toneladas, o que representa 39,8% da produção estadual. Este dado evidencia o expressivo potencial da cultura na região semiárida, que contribui com 46,2% do valor arrecadado com a produção de mandioca em Sergipe, totalizando R\$ 55.376 dos R\$ 119.829 (Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe, 2022).

4.2.2 Hipótese dinâmica

A dinâmica de sistemas (DS) é uma técnica que serve para analisar, modelar, simular e identificar comportamentos em sistemas dinâmicos com uma complexidade grande ao longo do tempo. A DS serve para representar modelos de sistemas reais que existem na natureza. Com base nisso, existe a possibilidade de compreensão do desempenho do sistema e realizar ajustes com base nas simulações realizadas (Santos, 2019).

O entendimento da DS passa pelos conceitos de “sistema” e “dinâmica”. De modo, que sistema representa um conjunto de componentes interdependentes, inter-relacionados e estruturados, podendo gerar novos sistemas, não possuindo limitação de tamanho e nem número de componentes, se organizando conforme o modelo (Galavote *et al.*, 2023).

A DS serve como uma excelente ferramenta aplicada na construção de cenários e análises feitas a longo prazo, através de várias observações no modelo construído. Ela serve para pensar possíveis consequências de ações realizadas pelas pessoas. A dinâmica avalia o comportamento das variáveis em função do tempo, mesmo ela sendo uma constante que não se altera em função do tempo (Felício, 2010).

Ao trabalhar com a DS é preciso construir uma hipótese dinâmica, que tem como interesse cogitar a teoria que gira em torno do problema, analisando o seu modo de se comportar e observando quais as variáveis envolvidas dentro do sistema (Rizzetti *et al.*, 2016). Para a pesquisa foram escolhidas oito variáveis básicas na simulação dos cenários: geração de resíduos sólidos, geração de resíduo líquido, metano (CH₄), bio-óleo, gás de pirólise, biocarvão, aproveitamento energético, sequestro de CO₂.

Nesse cenário, a hipótese dinâmica criada para explicar as interações internas entre as variáveis ficou sendo: “A implementação de um sistema circular de produção e consumo sustentável no semiárido sergipano, baseado na valoração e quantificação da biomassa

residual da agricultura/agroindústria, pode gerar um ciclo de feedback positivo que impulsiona a sustentabilidade ambiental, econômica e social da região”.

4.2.3 Coleta e análise de dados

Os dados para a construção dos cenários foram obtidos de fontes confiáveis, incluindo documentos, teses, dissertações, artigos e *websites* especializados, que forneceram os valores das taxas utilizadas nas simulações. As simulações foram executadas em um notebook Galaxy Book 4, equipado com processador Intel Core i5, 8GB de memória RAM e armazenamento SSD de 512GB, configurado para suportar o processamento dos dados com o *software* utilizado.

Para a realização das simulações, optou-se pelo software *Vensim* versão PLE 10.2.2, desenvolvido pela *Ventana Systems*. Reconhecido como uma ferramenta de simulação robusta para sistemas complexos, o *Vensim* destaca-se pela capacidade de otimizar sistemas reais, priorizando a qualidade da modelagem, a integração de dados e a implementação flexível de algoritmos avançados. A versão PLE, de acesso gratuito, atende às demandas de uso comercial, governamental e educacional, conforme referenciado em Santos *et al.* (2024).

Nesse contexto, foram desenvolvidos dois cenários de simulação para os resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca. Um baseado na economia linear, chamado de “Cenário Linear” (CL) e outro para economia circular, com o título de “Cenário Circular” (CC). O período de simulação foi de 2025 até 2044.

Em ambos os cenários tanto a área de produção, como a produção sofreram variações ao longo do tempo.

4.2.3.1 Cenário Linear (CL)

O CL trabalha o contexto atual de produção, colheita e beneficiamento da mandioca. Nesse cenário os resíduos da produção possuem pouca utilização, sendo apenas utilizados para consumo animal e aplicação como adubo. O quadro 4.1 descreve as variáveis, equações, informações e referências utilizadas para construção dos cenários.

Quadro 4.1 – Variáveis, equações, informações e referências dos cenários lineares

Cenário Linear 1 (CL1) – Variação da Área de Produção			
Variável	Equação	Informações	Referência

Mandioca (ton/ano)	$CM = APM * QH$ $M = CM$	Houve a colocação de um time no APM para realizar a variação da área de produção. $QH = 16,1$ ton/hect	Barreto <i>et al.</i> (2005)
Planta (ton/ano)	$CP = APP$	Com variação da APP.	-
Manipueira (m³/ano)	$RM = M * QPM$ $MA = RM$	1 ton de mandioca gera QPM = 250 L de manipueira	Diniz <i>et al.</i> (2018)
Casca (ton/ano)	$RC = M * \%C$ $C = RC$	Percentual da casca 5% Valor monetário da casca = R\$ 200,00 tonelada	Santana <i>et al.</i> (2014) MFRURAL (2024)
Maniva (ton/ano)	$RMV = P * QH * MV$ $MV = RMV$	Quantidade de maniva por hectare 20 ton/hect Valor monetário = R\$ 600,00	Burgos <i>et al.</i> (2021)
Disposição Líquida (m³/ano)	$MA = GL$ $DL = GL * 0,75$	Taxa de disposição líquida 75%	Neto (2013)
Disposição Sólida (ton/ano)	$GS = C + MV$ $DS = GS * 0,30$	Taxa e disposição sólida 30%	-
Ácido Cianídrico HCN (m³/ano)	$HCN = DL * 0,25$	Taxa de geração de HCN 25%	Ferreira <i>et al.</i> (2001)
Metano CH ₄ (ton/ano)	$CH_4 = DS * 0,917$	Taxa de produção de metano 91,7%	Cunha-Santino <i>et al.</i> (2016)
Cenário Linear 2 (CL2) – Variação da Produção			
Variável	Equação	Informações	Referência
Mandioca (ton/ano)	$CM = M$	Utiliza-se um “time” para fazer a variação da produção.	PAS (2019 a 2022)
Planta (ton/ano)	$CP = P$	Utiliza-se um time para fazer a variação da produção.	PAS (2019 a 2022)
Manipueira (m³/ano)	$RM = M * QPM$ $MA = RM$	Mesma informação do CL1	Diniz <i>et al.</i> (2018)
Casca (ton/ano)	$RC = M * \%C$ $C = RC$	Mesma informação do CL1	Santana <i>et al.</i> (2014) MFRURAL (2024)
Maniva (ton/ano)	$RMV = P * QH * MV$ $MV = RMV$	Mesma informação do CL1	Burgos <i>et al.</i> (2021)
Disposição Líquida (m³/ano)	$MA = GL$ $DL = GL * 0,75$	Mesma informação do CL1	Neto (2013)
Disposição Sólida (ton/ano)	$GS = C + MV$ $DS = GS * 0,30$	Mesma informação do CL1	-
Ácido Cianídrico HCN (m³/ano)	$HCN = DL * 0,25$	Mesma informação do CL1	Ferreira <i>et al.</i> (2001)
Metano CH ₄ (ton/ano)	$CH_4 = DS * 0,917$	Mesma informação do CL1	Cunha-Santino <i>et al.</i> (2016)

Colheita da mandioca (CM), área de produção da mandioca (APM), quantidade por hectare (QH), mandioca (M), área de produção planta (APP), colheita planta (CP), planta (P), resíduo da manipueira (RM), quantidade por tonelada processada de manipueira (QPM), manipueira (MA), resíduo da casca (RC), percentual de casca (%C), casca (C), maniva (MV), resíduo maniva (RMV), quantidade por hectare de maniva (QH * MV), geração líquida (GL), disposição líquida (DL), geração sólida (GS), disposição sólida (DS), metano (CH₄).

Para construir a simulação do modelo linear, se utilizou como base os dados do Perfil da Agricultura Sergipana (PAS) de 2019 a 2022. O processo envolveu duas etapas: primeiro, esses dados foram empregados no Excel para prever a demanda no período de 2025 a 2044; em seguida, os valores resultantes foram inseridos no Vensim para a geração dos cenários.

4.2.3.2 Cenário Circular (CC)

O cenário circular (CC) trabalha o contexto da economia circular com a reciclagem e valorização da biomassa gerada pelo processo de colheita e beneficiamento. Ao contrário do que ocorre no CL, com a utilização dos resíduos líquidos e sólidos apenas para alimentação animal e reutilização na plantação. O quadro 4.2 mostra as variáveis, equações, informações e referências para o CC.

Quadro 4.2 – Variáveis, equações, informações e referências dos cenários circulares

Cenário Circular 1 (CC1) – Variação da Área de Produção			
Variável	Equação	Informações	Referência
Mandioca (ton/ano)	$CM = APM * QH$ $M = CM$	Mesma do cenário linear.	Barreto <i>et al.</i> (2005)
Planta (ton/ano)	$CP = APP$	Mesma do cenário linear	-
Consumo animal (m³/ano)	$CA = GL * 0,5$	Foi assumida uma proporção de 50% para consumo animal	-
Biodigestor (m³/ano)	$BD = GL * 0,5$	Foi assumida uma proporção de 50% para o biodigestor	-
Biofertilizante (m³/ano)	$BF = BD$	A quantidade de biofertilizante é proporcionar a quantidade gerada no biodigestor.	-
Biogás (m³/ano)	$BG = BD * 0,7688$	A taxa de produção para o biogás é de 76,88%	Barana, Cereda (2000) Fecombustíveis (2021)
Gás de pirólise (m³/ano)	$GSSU = (C * 0,646) + (MV * 0,104)$ $GP = (GSSU * 0,214) / 0,00152$	Percentual de gás de pirólise 21,4%. Densidade do gás de pirólise 0,00152 kg/m³	Silva <i>et al.</i> (2024) Bulmau <i>et al.</i> (2019)
Bio-óleo (m³/ano)	$BO = (GSSU * 0,104) / 1,2$	Percentual de bio-óleo produzido 10,4% Densidade do bio-óleo 1,2 kg/m³ Valor monetário R\$ 4.404,00	Silva <i>et al.</i> (2024) Schneider (2018) Procurement Resource (2023) Rodrigues <i>et al.</i> (2011)
Biocarvão (ton/ano)	$BI = GSSU * 0,308$	Percentual de biocarvão produzido a 500° para mandioca 30,8% Valor monetário R\$ 7.549,00	Silva <i>et al.</i> (2024) Trapero <i>et al.</i> (2025)
Aproveitamento energético (kWh/ano)	$AE = (BG * 0,217) + (GP * 0,217)$	Poder calorífico da biomassa 21,7%	Silva <i>et al.</i> (2024)
Sequestro de CO ₂ (ton/ano)	$SCO = BI * 0,61$	Teor de carbono 61%	Spokas <i>et al.</i> (2011) Migo-Sumagang <i>et al.</i> (2024)
Cenário Circular 2 (CC2) – Variação da Produção			
Variável	Equação	Informações	Referência
Mandioca (ton/ano)	$CM = M$	Mesma do cenário linear	PAS (2019 a 2022)
Planta (ton/ano)	$CP = P$	Mesma do cenário linear	PAS (2019 a 2022)
Consumo animal (m³/ano)	$CA = GL * 0,5$	Foi assumida uma proporção de 50% para consumo animal	-
Biodigestor (m³/ano)	$BD = GL * 0,5$	Foi assumida uma proporção de 50% para o biodigestor	-
Biofertilizante (m³/ano)	$BF = BD$	A quantidade de biofertilizante é proporcionar a quantidade gerada no biodigestor.	-
Biogás (m³/ano)	$BG = BD * 0,7688$	A taxa de produção para o biogás é de 76,88%	Barana, Cereda (2000)

			Fecombustíveis (2021)
Gás de pirólise (m ³ /ano)	$GSSU = (C*0,646) + (MV*0,104)$ $GP = (GSSU*0,214) / 0,00152$	Percentual de gás de pirólise 21,4%. Densidade do gás de pirólise 0,00152 kg/m ³	Silva <i>et al.</i> (2024) Bulmau <i>et al.</i> (2019)
Bio-óleo (m ³ /ano)	$BO = (GSSU*0,104) / 1,2$	Percentual de bio-óleo produzido 10,4% Densidade do bio-óleo 1,2 kg/m ³	Silva <i>et al.</i> (2024) Schneider (2018) Procurement Resource (2023) Rodrigues <i>et al.</i> (2011)
Biocarvão (ton/ano)	$BI = GSSU*0,308$	Percentual de biocarvão produzido a 500° para mandioca 30,8% Valor monetário R\$ 7549,00	Silva <i>et al.</i> (2024) Trapero <i>et al.</i> (2025)
Aproveitamento energético (kWh/ano)	$AE = (BG*0,217) + (GP*0,217)$	Poder calorífico da biomassa 21,7%	Silva <i>et al.</i> (2024)
Sequestro de CO ₂ (ton/ano)	$SCO = BI*0,61$	Teor de carbono 61%	Spokas <i>et al.</i> (2011) Migo-Sumagang <i>et al.</i> (2024)

Consumo animal (CA), biodigestor (BD), biofertilizante (BF), biogás (BG), gás de pirólise (GP), geração sólida sem umidade (GSSU), bio-óleo (BO), biocarvão (BI), aproveitamento energético (AE).

Ambos os cenários, lineares e circulares, utilizaram a mesma variação de área e produção de mandioca. Para o aproveitamento da manipueira, assumiu-se a premissa de uma divisão de 50% para consumo animal e 50% para uso em biodigestor. Com base nas simulações, obteve-se um claro entendimento do comportamento, tanto positivo quanto negativo, dos impactos ambientais e econômicos da biomassa vegetal da mandioca.

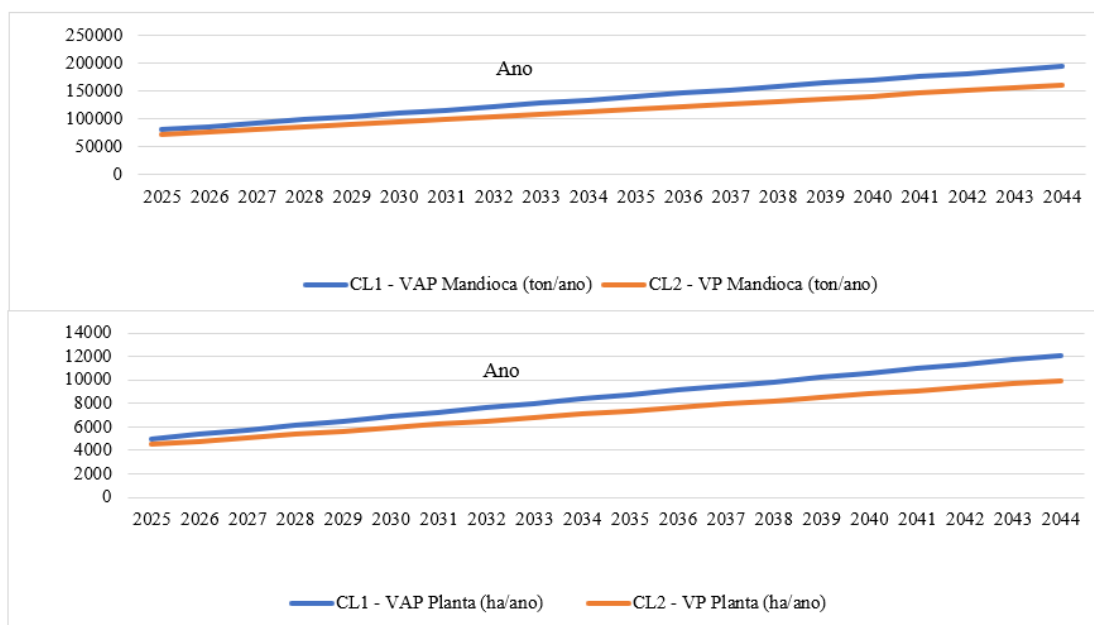
4.3. Resultados e Discussões

A seção consta os resultados e discussões referentes aos cenários linear e circular, focando nos resíduos gerados durante a colheita e o beneficiamento da mandioca. Os dados de produção utilizados foram extraídos de informações específicas do semiárido sergipano, região onde a pesquisa foi realizada e caracterizada por inúmeras deficiências. O objetivo desses resultados é sublinhar a importância de desenvolver medidas sustentáveis para a produção, beneficiando diretamente os agricultores familiares da área.

4.3.1. Análise de cenários lineares para a produção de mandioca

Os cenários lineares detalham a geração de resíduos sólidos e líquidos provenientes da colheita e do processamento da mandioca. No cenário linear (CL), o aproveitamento desses resíduos se restringe à alimentação animal e à aplicação no solo para replantio. A construção desses cenários baseou-se na variação da área e da produção de mandioca. A Figura 4.2 ilustra as quantidades de mandioca e da parte aérea da planta projetadas para um período de 19 anos.

Figura 4.2 – Quantidade de mandioca e planta superior no período de 19 anos

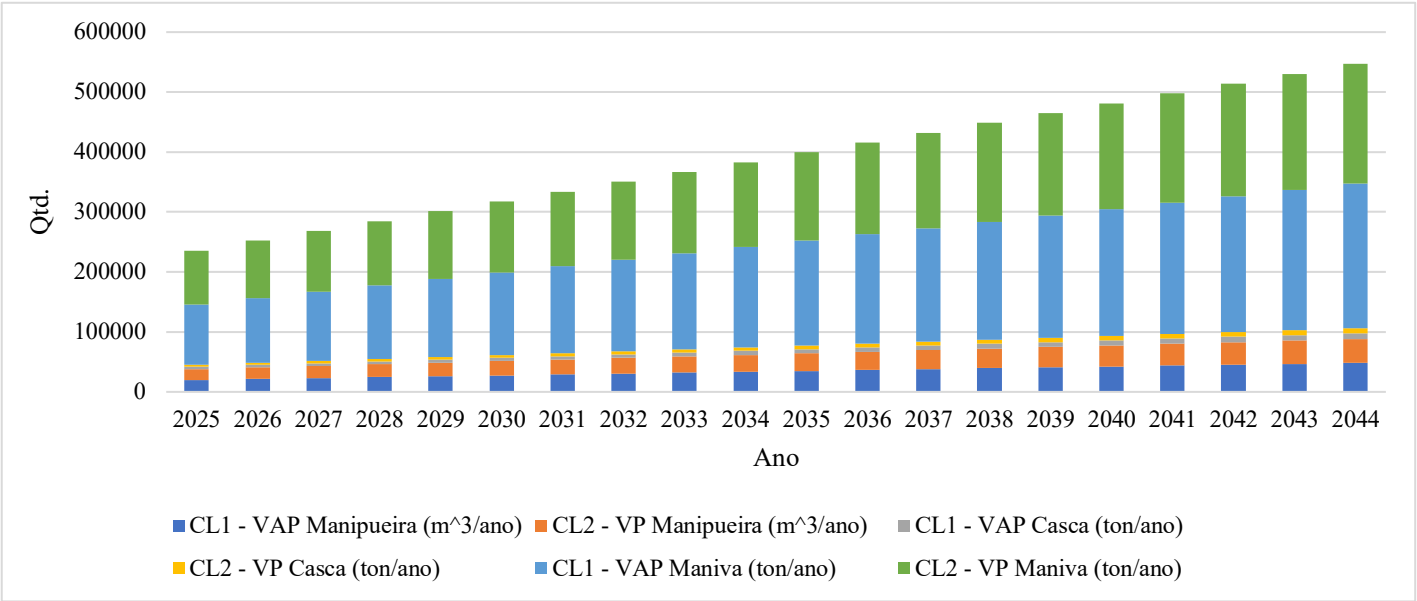


Fonte: Autor (2025).

O cenário onde houve a variação da área de produção (VAP) se mostrou superior ao cenário com a variação da produção (VP), todavia é preciso ressaltar que em Sergipe a área de produção da mandioca vem diminuindo, segundo dados da PAS de 2020 a produção em hectares foi de 11.026, sendo a região semiárida a maior produtora de mandioca com a cidade de Lagarto. Outra informação para justificar essa queda na área e produção da mandioca é a substituição pela cultura do milho que tem dominado o cenário sergipano.

Mesmo com a queda de produção ao observar os cenários a quantidade de resíduos geradas ainda é enorme, a figura 4.3 traz os resultados dos resíduos sólidos e líquidos da colheita e beneficiamento da mandioca para produção de farinha e consumo do tubérculo.

Figura 4.3 – Resíduos sólidos e líquido da colheita e beneficiamento da mandioca



Fonte: Autor (2025).

No contexto ambiental, o cenário que minimiza os impactos ao meio ambiente é o CL2. Ao longo de um período de 20 anos, a produção de manipueira no CL2 foi de 578.237,5 m³, uma diferença de 105.594,5 m³ em comparação com os 683.832 m³ do CL1.

Quanto à casca, o CL1 gerou 136.766,4 toneladas, enquanto o CL2 produziu 115.647,5 toneladas, resultando em uma diferença de 21.118,9 toneladas. Para a maniva, o CL1 totalizou 3.419.160 toneladas e o CL2, 2.891.200 toneladas, o que representa uma diferença de 527.960 toneladas.

Em suma, ao comparar os cenários, observa-se que o CL2 apresenta uma redução de 15,4% na quantidade total de resíduos sólidos e líquidos em relação ao CL1. No entanto para ambos os cenários existem impactos ambientais, tendo em vista que no modelo linear os resíduos são dispostos no meio ambiente, causando a emissão de gases que prejudicam a saúde e o meio ambiente. A tabela 4.1 apresenta os valores de disposição final sólida e líquida e as quantidades de poluentes gerados.

Tabela 4.1 – Valores de disposição final sólida, líquida e poluentes gerados

Tempo (ano)	CL1 - VAP Disposição final líquida (m³/ano)	CL2 - VP Disposição final líquida (m³/ano)	CL1 - VAP Disposição final sólida (ton/ano)	CL2 - VP Disposição final sólida (ton/ano)	CL1 - VAP “Poluente” Ácido cianídrico	CL2 - VP “Poluente” Ácido cianídrico	CL1 - VAP “Poluente” Metano CH4 (ton/ano)	CL2 - VP “Poluente” Metano CH4 (ton/ano)
-------------	---	--	---	--	---------------------------------------	--------------------------------------	---	--

					HCN (m ³ /ano)	HCN (m ³ /ano)		
2025	15.018	13.491,9	31.237,4	28.061,4	3.755	3.373	28.645	25.732
2026	16.137	14.354,2	33.565	29.858,3	4.034	3.589	30.779	27.380
2027	17.253	15.216,6	35.886,2	31.649,3	4.313	3.804	32.908	29.022
2028	18.372	16.078,9	38.213,8	33.446,3	4.593	4.020	35.042	30.670
2029	19.491	16.941,2	40.541,3	35.237,3	4.873	4.235	37.176	32.313
2030	20.610	17.803,5	42.868,8	37.034,3	5.153	4.451	39.311	33.960
2031	21.729	18.665,8	45.196,3	38.825,3	5.432	4.666	41.445	35.603
2032	22.848	19.528,1	47.523,8	40.616,2	5.712	4.882	43.579	37.245
2033	23.967	20.390,4	49.851,4	42.413,2	5.992	5.098	45.714	38.893
2034	25.083	21.252,8	52.172,6	44.204,2	6.271	5.313	47.842	40.535
2035	26.202	22.115,1	54.500,2	46.001,2	6.551	5.529	49.977	42.183
2036	27.321	22.977,4	56.827,7	47.792,2	6.830	5.744	52.111	43.825
2037	28.440	23.839,7	59.155,2	49.589,2	7.110	5.960	54.245	45.473
2038	29.559	24.702	61.482,7	51.380,2	7.390	6.176	56.380	47.116
2039	30.678	25.564,3	63.810,2	53.171,1	7.670	6.391	58.514	48.758
2040	31.797	26.426,6	66.137,8	54.968,1	7.949	6.607	60.648	50.406
2041	32.916	27.288,9	68.465,3	56.759,1	8.229	6.822	62.783	52.048
2042	34.032	28.151,2	70.786,6	58.556,1	8.508	7.038	64.911	53.696
2043	35.151	29.013,6	73.114,1	60.347,1	8.788	7.253	67.046	55.338
2044	36.270	29.875,9	75.441,6	62.144,1	9.068	7.469	69.180	56.986
Total	512.874	433.678	1.066.778	902.054	128.219	108.420	978.236	827.184

Fonte: Autor (2025).

A disposição final líquida da manipueira envolve seu tratamento por fermentação anaeróbica em recipientes, visando à redução do ácido cianídrico (HCN). A legislação exige esse tratamento antes do descarte no solo ou em corpos d'água.

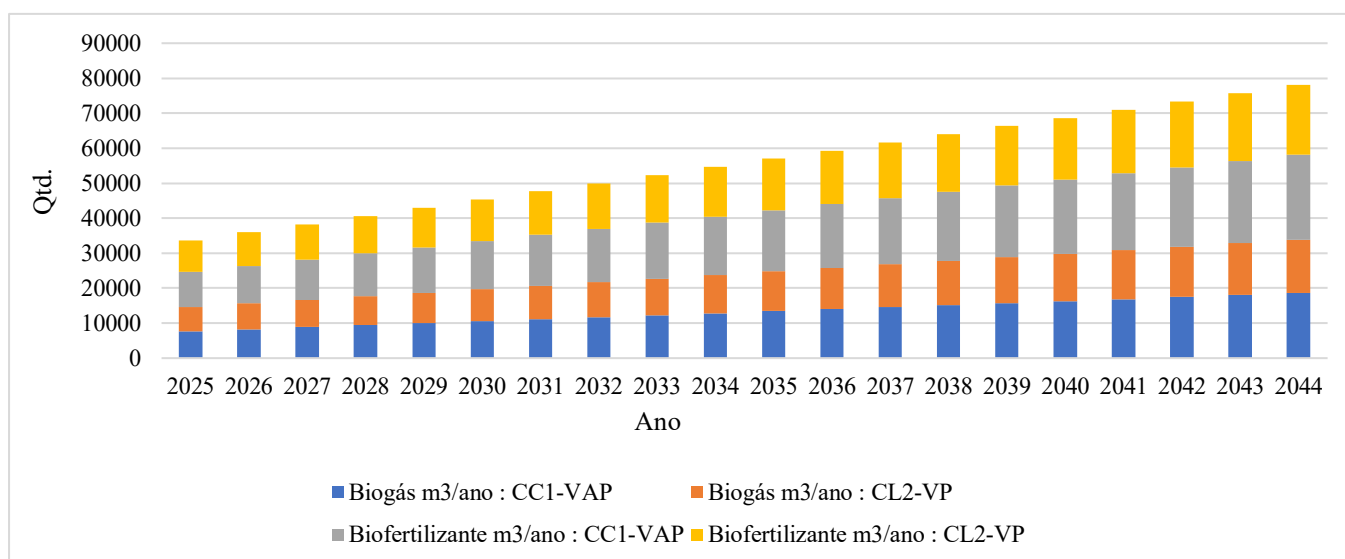
Assim como na geração de resíduos, o CL2 destaca-se como o cenário com as menores quantidades de disposição final, tanto líquida quanto sólida. No CL1, a disposição líquida totalizou 512.874 m³, enquanto no CL2 foi de 433.678 m³, uma diferença de 79.196 m³. Já para a disposição sólida, a diferença foi de 164.724 toneladas.

A disposição final dos resíduos sólidos e líquidos de fato acarreta a emissão de poluentes no meio ambiente. A tabela apresentada ilustra as quantidades de poluentes liberadas por essa prática. Nesse contexto, o CL1 mostrou-se o cenário com as maiores emissões, liberando 128.219 m³ de HCN e 978.236 toneladas de CO₂. Esses resultados dos cenários lineares reforçam a urgência de adotar medidas sustentáveis para mitigar os problemas decorrentes da disposição final da biomassa vegetal.

4.3.2. Análise de cenários circulares para a produção de mandioca

Os cenários circulares visaram realizar o aproveitamento de 100% da biomassa da mandioca, trabalhando a sustentabilidade do sistema de produção, buscando gerar resultados no contexto ambiental, social e econômico. Da mesma forma que o CL, ocorreu a variação da área de produção e da produtividade (CC1-VAP) e (CC2-VP). Para tanto, foram reincorporados os resíduos sólidos (maniva e casca) e o líquido (manipueira). A figura 4.4 mostra o gráfico com reaproveitamento do resíduo líquido gerado da produção da farinha de mandioca.

Figura 4.4 – Cenários circulares para o reaproveitamento do resíduo líquido da mandioca



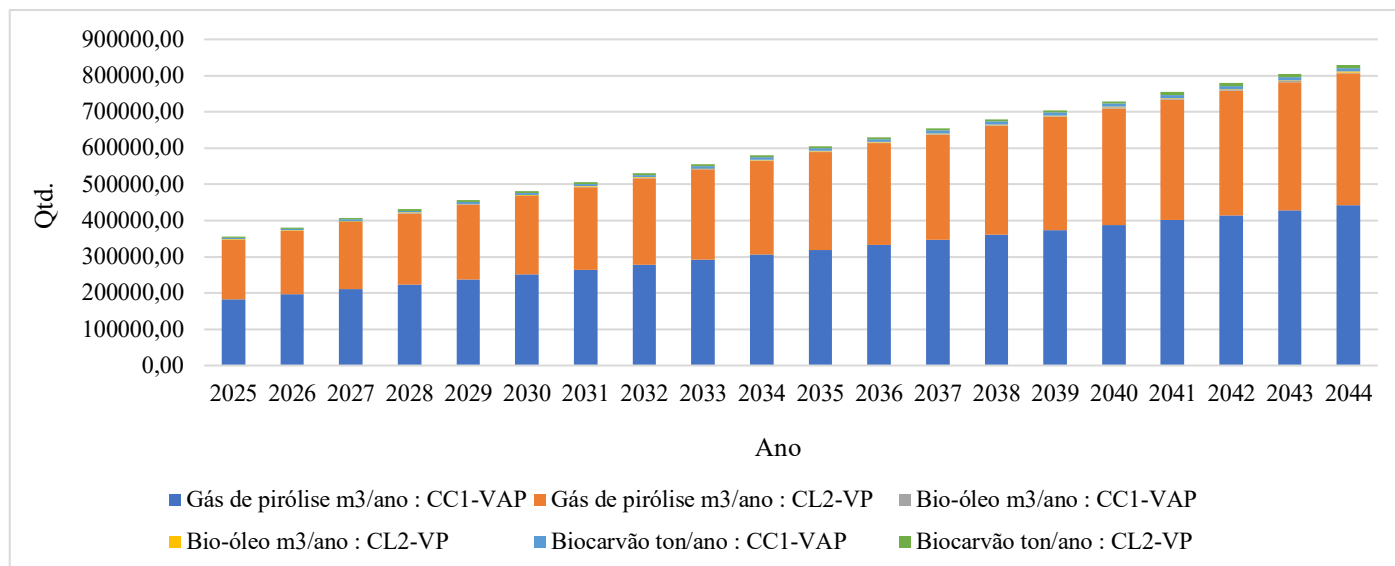
Fonte: Autor (2025).

Convencionalmente o resíduo líquido (manipueira) já é utilizado para alimentação animal e como fertilizante para o plantio. Nos cenários circulares propostos a produção de biogás seria uma nova alternativa, além do aproveitamento maior do biofertilizante. Ambos os cenários trariam benefícios ambientais, sociais e econômicos, mas o destaque com a reciclagem/reaproveitamento vai para o CC1-VAP com 262.864,97 m³ de biogás e 341.916 m³ de biofertilizante. La Hacienda Santa e Isabel (2024) mostram que a utilização do biogás promove a autossuficiência energética do processo, ou seja, é possível utilizar a energia do biogás para realimentar o processo de colheita e beneficiamento da mandioca em farinha.

Em relação aos resíduos sólidos, a Figura 4.5 apresenta os bioprodutos gerados a partir da pirólise da biomassa da maniva e casca da mandioca. O processo controlado dentro de um

reator produz biocarvão como produto principal, juntamente com bio-óleo (ou alcatrão) e gás de pirólise, após a combustão.

Figura 4.5 – Cenários circulares para os bioprodutos da pirólise da biomassa da mandioca.



Fonte: Autor (2025).

Seguindo a lógica o CC1-VAP se destaca com maior potencial de aproveitamento da biomassa vegetal. A diferença entre CC1-VAP e CC2-VP é de 965.124 m³ de gás de pirólise, 3.603,86 m³ de bio-óleo e 21.113,57 toneladas de biocarvão. Os bioprodutos mencionados são caracterizados como biocombustíveis de 2^a geração e podem ser aplicados de diversas maneiras. O biocarvão pode servir para enriquecimento de solos pobres em nutrientes, o gás de pirólise serve para realimentação energética do reator e o bio-óleo pode ser usado como combustível ou matéria-prima para produção de energia.

Todo processo de reciclagem/reaproveitamento da biomassa vegetal resulta em benefícios no aspecto ambiental visualizados na tabela 4.2. Os resultados apresentados nos modelos circulares servem para mitigar os impactos causados pelos poluentes gerados no CL, como o ácido cianídrico (HCN) e o metano (CH₄).

Tabela 4.2 – Cenários circulares para os ganhos ambientais com aproveitamento da biomassa.

Ganhos ambientais				
Tempo (ano)	CC1-VAP Aproveitamento	CL2-VP Aproveitamento	CC1-VAP Sequestro de CO ₂ ton/ano	CL2-VP 'Sequestro de CO ₂ ton/ano

	energético kWh/ano	energético kWh/ano		
2025	398.825	358.278	2.442,36	2.194,06
2026	428.541	381.214	2.624,34	2.334,51
2027	458.178	404.086	2.805,84	2.474,58
2028	487.895	427.021	2.987,82	2.615,04
2029	517.612	449.894	3.169,8	2.755,1
2030	547.328	472.829	3.351,78	2.895,56
2031	577.045	495.701	3.533,76	3.035,63
2032	606.762	518.574	3.715,75	3.175,69
2033	636.478	541.509	3.897,73	3.316,15
2034	666.115	564.381	4.079,22	3.456,21
2035	695.832	587.317	4.261,2	3.596,67
2036	725.548	610.189	4.443,19	3.736,74
2037	755.265	633.125	4.625,17	3.877,19
2038	784.982	655.997	4.807,15	4.017,26
2039	814.698	678.869	4.989,13	4.157,33
2040	844.415	701.805	5.171,11	4.297,78
2041	874.132	724.677	5.353,09	4.437,85
2042	903.769	747.613	5.534,59	4.578,31
2043	933.485	770.485	5.716,57	4.718,37
2044	963.202	793.421	5.898,55	4.858,83
Total	13.620.107	11.516.985	83.408,15	63.195,45

Fonte: Autor (2025).

Os ganhos ambientais são vistos pelo aproveitamento energético e sequestro de CO₂. O calor gerado durante a pirólise da biomassa vegetal é convertido em energia. A tabela 4.2 ilustra a energia total produzida a partir dessa transformação: 13.620.107 kWh para CC1-VAP e 11.516.107 kWh para CC2-VP. É importante ressaltar que a energia gerada em ambos os cenários supera significativamente as necessidades do processo de produção de biomassa para biocarvão.

A pirólise da biomassa vegetal, o metano (CH₄) é eliminado, produzindo dióxido de carbono (CO₂). Esse CO₂ é então capturado quando o biocarvão resultante é integrado ao solo. Consequentemente, CO₂ que de outra forma seriam liberados na atmosfera são retidos no solo por um período prolongado, levando a uma redução nas emissões de gases de efeito estufa. Em apoio a esse ponto de vista, Santos *et. al*, (2024) mostram que o mercado de carbono deve estar alinhado ao agronegócio com o objetivo de construir um sistema de produção que não comprometa o meio ambiente, proporcionando a adoção de um modelo sustentável que conserve o meio ambiente e traga benefícios econômicos e sociais.

4.3.3. Análise ambiental, social e econômica dos cenários

A análise dos cenários econômicos revelou os impactos ambientais, tanto negativos quanto positivos, associados ao descarte e à utilização da biomassa. O Quadro 4.3 fornece uma visão sobre o modelo linear e circular no contexto ambiental, social e econômico na agricultura/agroindústria.

Quadro 4.3 – Síntese ambiental, social e econômica do cenário linear e circular na agricultura

Aspecto	Cenário Linear	Cenário Circular
Ambiental	Aproveitamento mínimo da biomassa vegetal da mandioca. Sendo a utilização apenas para o consumo animal e aplicação no solo como fertilizante. Geração de ácido cianídrico (HCN) pela produção da farinha de mandioca e metano (CH ₄) pela decomposição da biomassa vegetal.	Aplicação da biomassa vegetal novamente no processo de cultivo e beneficiamento. Diminuição na emissão de gases do efeito estufa pelo aprisionamento do CO ₂ no solo.
Social	Desvalorização dos pequenos agricultores familiares. Baixa produtividade pela ausência de acesso a tecnologias. Incentivo para os grandes produtores e agroindústrias que concentram a renda e o poder. Exclusão social de mulheres e indígenas. Dependência por insumos externos e aumento na pressão sobre os recursos naturais.	Valorização e sustentabilidade na área de produção para os pequenos agricultores familiares. Aumento na qualidade e produtividade pela utilização do biocarvão. Inclusão social para mulheres e indígenas. Independência em insumos para produção e diminuição na necessidade de extração de recursos naturais.
Econômico	Foco em ganhos econômicos pelos grandes produtores. Baixa valorização da biomassa vegetal, e venda a preços baixos. Custos com tratamentos pela disposição de resíduos (embalagens, produtos de limpeza e restos de colheita).	Aumento na renda dos pequenos agricultores familiares pela utilização dos biocombustíveis de 2ª geração. Valorização da biomassa vegetal pela produção de biocarvão, gás de pirólise e bio-óleo. Redução na disposição final de resíduos como embalagens e restos de colheita.

Fonte: Autor (2025)

O modelo econômico linear predominante, caracterizado por uma abordagem "extrair-produzir-descartar" (Van Erkelens *et al.*, 2025), inegavelmente leva a diversas consequências ambientais negativas. Por outro lado, o modelo de economia circular oferece avanços significativos para a promoção de uma sociedade sustentável. Nesse aspecto, a construção de uma economia pautada pela circularidade representa avanços significativos na busca por padrões de consumo sustentáveis.

Nesses termos, os resultados apresentados no quadro 4.3 para o cenário circular visam a valorização principalmente dos aspectos sociais e ambientais praticados na agricultura. Com a valorização dos agricultores familiares e preservação dos recursos naturais. Nesse panorama, Oliveira (2022) ressalta que a intensificação da sustentabilidade na agricultura pode resultar na

diminuição da expansão por terras de cultivo, tendo em vista que a aplicação do biocarvão aumenta a qualidade do solo e produtividade.

Na visão de Cotto Vasquez e Manzano Cuenca (2024) a conscientização sobre práticas agrícolas sustentáveis visa reduzir os impactos no meio ambiente, com adoção de tecnologias que possibilitem conservação e manejo adequado, para tanto, é preciso seguir os três pilares da economia circular: proteger o capital natural, criando fluxos cíclicos de produção (reciclagem/reaproveitamento da biomassa vegetal no processo); conservar a utilidade dos materiais pelo maior número de tempo possível (aplicação do biocarvão no processo de cultivo); e por último enriquecer o sistema social pela eliminação dos efeitos prejudiciais a sociedade (valorização dos agricultores familiares).

No aspecto econômico, houve a divisão foram obtidos valores com e sem aplicação de tecnologias. Na aplicação sem tecnologia é feito apenas a venda da massa residual triturada da planta superior (maniva) e a casca da mandioca os valores totais obtidos foram de R\$ 211.090.368,00. Já com uso de tecnologias, os valores somados com a transformação em biocarvão, biogás, bio-óleo e sequestro de carbono foram de R\$ 124.398.302,20. Os valores obtidos sem aplicação de tecnologias se mostraram maiores, entretanto, não existe um mercado consolidado para uso da biomassa *in natura*, sendo o consumo apenas de forma interna, já os derivados produzidos têm um mercado definido e em expansão, além dos benefícios ambientais.

Nesses moldes, Miranda (2024) mostra que para além dos ganhos econômicos o uso dos bioinsumos favorecem a saúde do solo, aumentam a resistência das culturas e cria um cenário sustentável na agricultura/agroindústria. Além disso, a EC consegue se conectar aos ODS, trabalhando como ferramentas complementares para construir um futuro sustentável. Enquanto a EC oferece um modelo prático para repensar a produção e o consumo, os ODS criam uma estrutura com metas globais que precisam ser alcançadas.

Logo, os princípios da EC podem contribuir substancialmente para o progresso dos diversos ODS, especialmente aos relacionados a consumo, produção e meio ambiente. Como “Energia limpa e acessível” (ODS 7), a EC trabalharia otimizando o uso de recursos e reduzindo o desperdício, além de incentivar a transição para fontes renováveis, o “Trabalho decente e crescimento econômico” (ODS 8), gerando empregos em setores como da reciclagem e remanufatura, incentivando modelos de negócios resilientes e preocupados com a saúde e bem-estar dos envolvidos.

Servindo para promoção de “Cidades e comunidades sustentáveis” (ODS 11) com a redução da disposição final de resíduos e otimização no uso de recursos e o “Consumo e produção Responsável” (ODS 12) com este ODS sendo o principal para EC, pois ambos visam assegurar níveis de produção e consumo sustentáveis, diminuindo o desperdício e a extração de recursos.

Diante do que foi exposto, os cenários circulares demonstram ser o caminho correto para construção de economias sustentáveis. E com resultados positivos para atingir os ODS até 2030. A adoção de práticas sustentáveis pelos agricultores familiares representaria avanços significativos na construção de uma economia com princípios sustentáveis, tendo em vista os impactos causados pela produção do setor agrícola.

4.4 Considerações Finais

A mudança da EL para a EC não é apenas uma opção, mas uma necessidade urgente para garantir a sustentabilidade e o bem-estar da população. Enquanto na EL, a “extração-produção-uso-descarte” tem sido a força que movimenta o desenvolvimento industrial por séculos, se mostrando insustentável a longo prazo, esvaziando recursos naturais finitos e gerando um quantitativo de enorme de resíduos que poluem o meio ambiente.

Em contrapartida, a EC aparece como uma solução transformadora que ao invés de descartar, ela propõe reutilizar, reparar e reciclar, mantendo os materiais gerados na colheita e beneficiamento em uso pelo maior tempo possível. Mais do que isso, ela busca eliminar o conceito de “lixo”, promovendo a regeneração dos sistemas naturais e a utilização de energias renováveis. É um modelo que respeita os limites dos recursos naturais, e reconhece a necessidade de integração de todas as partes dos ecossistemas.

Os cenários mostraram o comportamento da EL e da EC em dezenove anos de aplicação para os resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca na realidade do semiárido sergipano. Os resultados mostraram os impactos com a variação da área de produção (VAP) e variação da produção (VP), no modelo linear houve a geração e disposição de final de uma grande quantidade de biomassa vegetal, gerando poluentes como HCN e CH₄ pela produção de farinha e decomposição da matéria orgânica. Entre os cenários lineares o que apresentou menor impacto no meio ambiente foi o CL2-VP, com a geração e menor quantidade de poluente emitido.

Como alternativa ao CL, os cenários circulares fizeram a reciclagem/reaproveitamento da biomassa vegetal produzida no processo de colheita e beneficiamento. No CC o destaque foi

para o CC1-VAP, com maior aproveitamento da massa residual gerada na produção de biocombustíveis de 2ª geração. Os resultados no modelo circular evidenciaram resultados positivos no aspecto ambiental pela minimização na emissão de poluentes e redução na disposição de resíduos, social com a valorização dos agricultores familiares pelo aumento na produtividade e aumento na renda e no econômico com a comercialização dos bioprodutos gerados (biocarvão, bio-óleo, biogás).

Portanto, o modelo circular demonstra ser o mais adequado para construção de uma economia sustentável. Esse modelo de economia impulsiona a inovação, cria chances de negócios e promove resiliência econômica. Além disto, a EC e os ODS estariam intrinsicamente ligadas como ferramentas complementares na construção deste futuro servindo para alcançar metas globais de erradicação da pobreza, combate à fome, promoção da saúde, acesso à água limpa e saneamento, e ação contra a mudança climática.

REFERENCIAS

BARANA, A. C.; CEREDA, M. P. Tratamento de efluentes de manipueira utilizando biodigestor anaeróbico bifásico. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 20 (2), 183-186, 2000.

BARRETO, B.; SOUSA, T. C. R. Produção, custos e rentabilidade da mandioca no Distrito Federal, 2005.

BRASIL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ranking - Agricultura - Valor da produção. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 16 de mar. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Potencial Energético dos Resíduos Agropecuários. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-492/EPE-DEA-IT%20006_2019%20-%20SIEnergia_Potencial%20Energ%C3%A9tico%20dos%20Res%C3%ADuos%20Agropecu%C3%A1rios.pdf. Acesso em 8 de mar. 2025.

BRASIL. Grupo de trabalho de Sustentabilidade Climática e Ambiental. Resíduos e Economia Circular. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/mma-e-mre-realizam-encontros-de-gt-de-sustentabilidade-ambiental-e-climatica-do-g20-com-sociedade-civil/G20_Economia_Circular_Oitiva_20240417.pdf. Acesso em 7 de jan de 2025.

BURGER, M.; STAVROPOULOS, S.; RAMKUMAR, S.; DUFOURMONT, J.; VAN OORT, F. The heterogeneous skill-base of circular economy employment. **Research Policy**, v.48, n.1, p.248-261, 2019.

BULMĂU, C.; IONESCU, G.; MĂRCULESCU, C. Bio-Gaseous fuels from agricultural waste pyrolysis (Part II). In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 290, p. 11005). EDP Sciences, 2019.

BURGOS, A. M.; MEDINA, R. D.; FUKUDA, E. N.; HIDALGO, R. J. Growth and yields parameters of cassava crop (*Manihot esculenta* Crantz) as affected by plant density, genotype and planting system. *Revista Ceres*, 68, 546-554, 2021.

COTTO-VÁSQUEZ, M. A.; MANZANO-CUENCA, D. G. Circular de Agroecologia e Economia: Fechando Ciclos no Agroecossistema. *YUYAY: Estratégias, Metodologias & Didáticas Educativas*, 4 (1), 74-85, 2024.

CUNHA-SANTINO, M. B. D.; BITAR, A. L.; BIANCHINI, I. Gas emission from anaerobic decomposition of plant resources. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 28, 2016.

DEL FIORI, D. Agricultura familiar no estado de São Paulo: caracterização e problemas. *Nexos Econômicos*, 2017.

DINIZ, P.; LIMA, F. R.; FREITAS MORAIS, T.; MEDEIROS, A. P. Caracterização socioambiental do sistema de produção das casas de farinha do município de Princesa Isabel – PB. In *Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, IX*. 2018.

DOBERMANN, A. Looking forward to 2030: Nitrogen and the Sustainable Development Goals. In: International Nitrogen Initiative Conference: “Solutions to improve nitrogen use efficiency for the world”, Melbourne, Australia: *Anais*. p. 4-8, 2016.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition. Business rationale for an accelerated transition. New York: Ellen Macarthur Foundation. 96p. 2018. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen--MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.

ESPINOSA, A. Economia circular: uma aproximação à sua origem, evolução e importância como modelo de desenvolvimento sustentável. *Revista de economia institucional*, 25 (49), 109-134, 2023.

ESPOSITO, M.; TSE, T.; SOUFANI, K. Is the circular economy a new fast-expanding market? *Thunderbird International Business Review*, v.59, n1, p.9–14, 2017.

FECOMBUSTÍVEIS. Biogás, o combustível ecológico que é mais barato e considerado mais eficiente que o GNV. 2021. Disponível em: <https://www.fecombustiveis.org.br/noticia/biogas-o-combustivel-ecologico-que-e-mais-barato-e-considerado-mais-eficiente-que-o-gnv/246641>. Acesso em: 10 de mar. de 2025.

FELÍCIO, L. C. Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta. 2. ed. [S.l.]: RiMa Editora. 3-6 p. ISBN 978-85-7656-169-9. 2010.

FERREIRA, W. D. A.; BOTELHO, S. M.; CARDOSO, E. M.; POLTRONIERI, M. C. Manipueira: um adubo orgânico em potencial. 2001.

GALAVOTE, T.; SENA, L. G.; CALIXTO, L. M.; DUTRA, R. M. D. S.; COIMBRA, T. C.; CHAVES, G. D. L. D.; SIMAN, R. R. Avaliação do efeito do fortalecimento da coleta seletiva nos custos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. urbano. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, 15, e20220108, 2023.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular economy: the concept and its limitations. **Ecological Economics**, v.143, n.1, p.37–46, 2018.

LA HACIENDA SANTA, E.; ISABEL, J. Planta de Biogas para los Residuos del Beneficio de Café. 2024.

LEMO, J. D. J. S.; SANTIAGO, D. F. Instabilidade da agricultura familiar no Semiárido. **Revista de Política Agrícola**, 29(1), 94, 2020.

MFRURAL. Casca da Mandioca. 2024. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/647109/casca-da-mandioca?origem=produto-destaques-mf>. Acesso em: 10 de mar. de 2025.

MIGO-SUMAGANG, M. V.; AVISO, K. B.; TAN, R. R.; JIA, X.; LI, Z.; FOO, D. C. Técnica de integração de processos para direcionamento do subsídio ao preço dos créditos de carbono. **Engenharia Química Digital**, 13, 100192, 2024.

MIRANDA, G. L. D. Os bioinsumos e a sustentabilidade agrônômica. 2024. Orientador: Richardson Barbosa Gomes da Silva. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Agronegócio), Faculdade de Tecnologia de Botucatu - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2024. <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/23172>

MOREIRA, R. S.; LENSE, G. H. E.; CHIBA M. K.; MINCATO, R. L. Economia circular: gestão de resíduos na agricultura. In: Hayashi C.; Sardinha, D. S.; Botezelli L.; Pamplin, P. A. Z. 2020. Ciências ambientais: gestão e educação ambiental. Ribeirão Preto: 1ª edição, 2020. p 6-27

OLIVEIRA, M. B. P.; ALVES, R. C. Porquê a Emergência?. 2022. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/119926591/pdf-libre.pdf?1733050460=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSustentabilidade_na_Area_Alimentar_Porqu.pdf&Expires=1749493557&Signature=WZFDQSK~jFy~UXTmSgE35xMvpfUIOqE-VY0e9rBiDGCKUTunxFewygVZ~n7R1zH9oJlvll-hXVESqWBZpzcQkgfUr-WXvlypEXqBq2xDBwg0I5bVGXFESiKDtouMmwx7a14iTxpIW0M5LAWWZ5Cicrp55DnKWTAtDHQ201WRL34KeufjX6lV8yPi-JMRFyzKH~2v0FXyvLj0indugA3VYTkcQ7~tQ1~aaV9~xM5vmUJNqwZPufsTQ51H76DjRkkbyED-KIJG3CBzp0MpdoZqQ-KSub4fFzrQ-JFqDt27OGWjkHNorkeJlDksJP-6RUebWAlHtx5cs-z~XK0HndH7g__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 6 de jun. de 2025.

PROCUREMENT RESOURCE. Pyrolysis Oil Price Trend and Forecast. 2023. Disponível em: <https://www.procurementresource.com/resource-center/pyrolysis-oil-price-trends>. Acesso em 11 de mar. de 2025.

RIZZETTI, T. A.; RODRIGUES, G. O.; SIMONETTO, E. O.; GIL, R. C. Uso de dinâmica de sistemas para avaliação de cenários de reaproveitamento de óleo de cozinha na produção de biodiesel em uma IES pública. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*. Volume 11, Número 1. pp. 112-119 DOI:10.20985/1980-5160.2016.v11n1.1010. 2016.

RODRIGUES, T. O.; ROUSSET, P.; DO VALE, A. T.; BROUST, F. Bioóleo: Uma alternativa para valorização energética da biomassa. *Revista Brasileira de Energia*, 17(2), 39-56, 2011.

SANTANA, T. P.; SOBRAL, A. J. S.; SOUZA, E. Y. B.; MUNIZ, E. N.; RANGEL, J. D. A.; CASTRO FILHO, E. S.; SANTOS, D. D. O. Caracterização bromatológica da casca da mandioca e da manipueira para utilização na alimentação animal. 2014.

SANTANA NETO, J. A. Uso da manipueira como suplemento na dieta para cordeiros Santa Inês. 2013.

SANTOS, E. R. D. **Guia para iniciantes na aplicação da técnica de dinâmica de sistemas**. 2019. TCC (Monografia) – Curso de Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SANTOS, T. P.; SOUZA JUNIOR, A. A.; SOUZA SILVA, C. A. 2024. Aplicação do software de simulação de plantas como ferramenta de melhoria de processos em linha de rádios automotivas. *Revista Brasileira de Engenharia de Produção*, 10 (2), 93-107.

SANTOS, W. F. R.; ROOS, R. S.; JÚNIOR, P. R. D. S. R.; ROSA, A. A.; SILVA, D. P. Conceitos e teorias sobre o mercado de carbono: uma revisão de literatura. *Caderno Pedagógico*, 21 (7), e5515-e5515, 2024.

SCHNEIDER, J. K. Utilização de biomassas brasileiras para produção de carvão ativado de alta qualidade: caracterização e aplicação como adsorvente. 2018.

SERGIPE, Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe. Produção por mil reais municípios de Sergipe. 2022.

SERGIPE, Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe. Relatório de Atividades. 2020.

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2018.

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2019.

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2020.

SERGIPE. **Perfil da Agricultura Sergipana**. Observatório de Sergipe. Sergipe. 2021.

SILVA, W. R.; SANTOS, R. M.; WISNIEWSKI JR, A. Pirólise contínua em forno rotativo de brotações de mandioca e ampla especiação de compostos oxigenados e nitrogenados em bio-óleo por HESI e APPI-Orbitrap MS. *Bioresource Technology*, 404, 130915, 2024.

SPOKAS, K. A.; NOVAK, J. M.; STEWART, C. E.; CANTRELL, K. B.; UCHIMIYA, M.; DUSAIRE, M. G.; RO, K. S. Análise qualitativa de compostos orgânicos voláteis em biochar. *Chemosphere* , 85 (5), 869-882, 2011.

TIOSSI, F. M.; SIMON, A. T. Circular de Economia: suas contribuições para o desenvolvimento da Sustentabilidade. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, 7 (2), 11912-11927, 2021.

TRAPERO, J. R.; ALCAZAR-RUIZ, A.; DORADO, F.; SANCHEZ-SILVA, L. Previsão de preços do biochar: Uma nova metodologia para aumentar a estabilidade do mercado e a viabilidade econômica. *Journal of Environmental Management* , 377 , 124681, 2025.

UNITED NATIONS. World Population Prospects: The 2017 Revision. New York: United Nations, 2017. 46p. Disponível em: https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

VAN ERKELENS, A. M.; VAN BOMMEL, K.; QUINTELIER, K. J.; THOMPSON, N. A.; VERVER, M. Implementando modelos de negócios circulares em sistemas econômicos lineares: O caso de um novo empreendimento que aborda o paradoxo da integração. *Journal of Cleaner Production* , 496 , 145073, 2025.

WEETMAN, C. Economia Circular: Conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa. 1. ed. – Autêntica Business, São Paulo. 2019.

ZORPAS, A. A.; LASARIDI, K.; POCIOVALISTEANU, D. M.; LOIZIA, P. Monitoring and evaluation of prevention activities regarding household organics waste from insular communities. *Journal of Cleaner Production*, v.172, n.1, p.3567– 3577, 2018.

Conclusão

O modelo econômico linear baseado na extração, uso e descarte mostra-se insustentável, esgotando recursos e gerando externalidades ambientais, sociais e econômicas negativas. Nesse contexto, a Economia Circular surge como uma resposta inovadora, promovendo sistemas regenerativos e elevando o valor dos resíduos agrícolas.

No setor agrícola a economia circular busca a criação de sistemas regenerativos, mantendo recursos em uso pelo maior tempo possível, aumentando seu valor e diminuindo a geração de resíduos ao longo da cadeia produtiva. Nesses termos, a pesquisa fez a identificação de uma cultura agrícola de base familiar no semiárido sergipano com potencial para valoração dos resíduos na perspectiva da circularidade.

Os resultados obtidos destacaram a necessidade de envolver os pequenos agricultores em pesquisas focadas na EC e na gestão de resíduos da colheita e beneficiamento de suas culturas. Mostrando a necessidade em se desenvolver trabalhos que envolvam o aspecto tecnológico na solução personalizada e acessível para os pequenos agricultores. O levantamento preliminar de 12 culturas identificou um total de 746.851,19 toneladas de resíduos por ano na região, com potencial de sequestro de 96.635,60 toneladas de CO₂ anualmente.

Para os agricultores familiares, a conversão dos resíduos da mandioca em biocombustíveis de 2ª geração representa um aumento significativo na qualidade da produção e um forte impulso ao desenvolvimento social e econômico, seja pela venda dos bioprodutos ou pela utilização direta dos biocombustíveis em suas atividades.

Os resultados da análise de viabilidade técnica, econômica e energética evidenciaram que o modelo circular supera o linear nos três pilares da sustentabilidade. A tese confirma a viabilidade da implantação de uma unidade de conversão de resíduos de mandioca em biocombustíveis de segunda geração (biocarvão, bio-óleo e gás de pirólise). A análise de indicadores financeiros (VPL, TIR e *Payback*) indicou resultados econômicos positivos para o financiamento da unidade produtiva, promovendo o desenvolvimento social e o incremento de renda para os agricultores familiares. No aspecto ambiental, o processo elimina a geração de poluentes como metano CH₄ e ácido cianídrico HCN e contribui com um significativo sequestro de CO₂.

A última etapa mostrou os impactos causados pelos resíduos da mandioca para os modelos linear e circular de economia, além da construção da Plataforma Semiárido Forte (apêndice C). Os cenários de DS evidenciaram que o modelo circular supera o linear ao mitigar

a emissão de metano CH_4 e o ácido cianídrico HCN provenientes do descarte, além de impulsionar a produtividade agrícola e a qualidade de vida.

As implicações com o modelo circular representam mudanças significativas na construção de uma agricultura sustentável. Com foco no viés socioambiental e consequentemente resultados positivos no contexto econômico. O cenário com a EC ainda promove a inovação e traz a resiliência econômica.

No apoio ao desenvolvimento sustentável, a pesquisa propõe ações que vão impactar de forma direta os objetivos 2 “Erradicação da fome e agricultura sustentável” e 12 “Consumo e produção responsáveis”. As ações propostas na pesquisa visam reduzir as desigualdades de produção e incentivar o uso de novas tecnologias pelos agricultores familiares.

No campo interdisciplinar a pesquisa trabalhou de forma integrada com metodologias de diferentes disciplinas para abordar a solução do problema causado pela produção dos resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca. Analisando o problema sob a ótica da química, engenharia de produção, biologia e demais áreas que integram o projeto.

Em conclusão, a tese propõe um modelo de gestão pautado na EC que, além de conferir resiliência econômica à agricultura familiar, impulsiona diretamente o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2 e 12. A pesquisa culmina na criação da Plataforma Semiárido Forte, uma ferramenta que materializa a análise do *Triple Bottom Line* e facilita a adoção desse novo paradigma no setor.

APÊNDICE

Apêndice A – Evidências sobre a incorporação da economia circular nos estudos

Quadro A1 - Evidências sobre a incorporação da economia circular nos estudos

Questão: O que se sabe sobre os desafios e limitações para incorporação da EC na gestão dos resíduos da agroindústria/agricultura?"		
Código	Título	Evidências extraídas
A2	<i>Biochar industry to circular economy</i>	Faltam padrões adequados em nível nacional na maioria dos países para regulamentar seu uso, dificultando assim sua adoção generalizada como um condicionador de solo. A conversão do biochar em carvão ativado pode emitir grande quantidade de gases de efeito estufa, que são a principal fonte do aquecimento global. É necessário definir um padrão para a indústria de carvão ativado (derivado de qualquer fonte de carbono) para implementar um processo de produção mais ecologicamente correto. O desenvolvimento de um padrão de produção e aplicação de biochar pode ajudar a simplificar o processo de produção de biochar para atender aos requisitos do mercado e reduzir o tempo de lançamento no mercado. No entanto, alguns desafios impedem o desenvolvimento de uma economia circular baseada em biocombustíveis. Em primeiro lugar, as relações entre a produção de biochar e sua aplicação subsequente não estão suficientemente documentadas na literatura. A relação entre as tecnologias de produção e as propriedades do biochar, e entre as propriedades do biochar e os resultados das várias aplicações, precisam ser mais exploradas. Estudos adicionais sobre a produção, modificação e aplicação de biochar podem facilitar sua aplicação econômica para fins de sustentabilidade ambiental e desenvolvimento de lixo zero.
A3	<i>Biochar utilisation in the anaerobic digestion of food waste for the creation of a circular economy via biogas upgrading and digestate treatment</i>	O uso sequencial do BC (biochar rico em carbono) não afeta significativamente o seu desempenho nas aplicações a jusante, implicando na viabilidade de criação de circuitos fechados de resíduos locais e, consequentemente, uma economia circular. Estudos futuros podem explorar a modificação do BC para melhorar o biogás, e que a fração líquida do digestado anaeróbico filtrado por BC pode ser examinada para a recuperação de nutrientes também.
A5	<i>Building resilience: A self-sustainable community approach to the triple bottom line</i>	Ausência de iniciativas por parte dos governos. A abordagem de governança ascendente do CVES (cluster de ecossistema de valor circular Regional) obtém sua força a partir das fontes locais de produtividade e contribuições da comunidade.

		Sistema Ecologia Industrial de Resíduos de Valor Zero (ZRIES) A confiança política, no entanto, foi e é mais difícil de superar, pois as partes interessadas estão desconfiadas de “políticos corruptos” que podem ser facilmente influenciados por interesses próprios em vez dos interesses da comunidade. A falta de atores políticos sentados à mesma mesa, no entanto, tornou problemáticas as atividades que exigiam apoio, feedback ou aprovação do governo (como as associadas ao lago). Dificuldade em encontrar as tecnologias e empreendedores adequados. Aplicar a estrutura a uma comunidade em outro país latino-americano, por exemplo, pode produzir resultados diferentes, pois os principais interessados, bem como os ambientes econômico, social e político, podem ser diferentes.
A8	<i>Closed-loop organic waste management systems for family farmers in Brazil</i>	Infelizmente, a renda dos agricultores familiares costuma ser inferior ao salário mínimo e é difícil escapar da pobreza devido à propriedade limitada da terra e aos baixos níveis de capital. O principal desafio da pirólise de resíduos orgânicos é sua viabilidade financeira. Vários estudos descobriram que a tecnologia não era financeiramente viável sem subsídios, ou não era financeiramente viável para implementação em pequena escala. No geral, não se sabe o suficiente sobre a viabilidade da pirólise em pequena escala, uma vez que a maioria das pesquisas em países de baixa e média renda foi realizada em laboratório usando madeira em vez de resíduos de colheita.
A9	<i>Contribution to Circular Economy options of mixed agricultural wastes management: Coupling anaerobic digestion with gasification for enhanced energy and material recovery</i>	Adoção de tecnologias aplicadas na produção do biochar. Construção de políticas públicas que possibilitem a implantação da economia circular.
A10	<i>Conversion of food waste to energy: A focus on sustainability and life cycle assessment</i>	Aspectos energéticos, ambientais e econômicos são os três aspectos que precisam ser avaliados criticamente para uma gestão eficiente de resíduos alimentares. Abordagens sustentáveis precisam ser adotadas para proteger o meio ambiente, que são amplamente negligenciadas.

A11	<i>Designing an optimised supply network for sustainable conversion of waste agricultural plastics into higher value products</i>	Revisão mostrou que a literatura tende a focar a dimensão ambiental da sustentabilidade; no entanto, as abordagens da economia circular também podem impactar a dimensão social da sustentabilidade, por exemplo, através do aumento do emprego local.
A12	<i>Environmental assessment of waste handling in rural Brazil: Improvements towards circular economy</i>	A necessidade de inovação na aplicação da economia circular para alcançar a sustentabilidade. Para a implementação de um CE, a dimensão territorial é um fator importante na fase de transição. A localização e as características físicas influenciam o potencial de um território; por exemplo, áreas urbanas e rurais desempenham papéis diferentes dentro da estrutura. As áreas urbanas apresentam-se predominantemente no processo de transição porque são os centros de produção e, portanto, podem promover o uso eficiente dos recursos. Por outro lado, as áreas rurais fornecem a maioria desses recursos (Gebre e Gebremedhin, 2019). A gestão de resíduos em áreas rurais tornou-se um grande desafio para os governos de países em desenvolvimento (Han et al., 2018) As áreas rurais têm diferentes situações socioeconômicas, climas, geografias, culturas, densidades populacionais e outras variáveis em comparação com as áreas urbanas. Adoção de políticas públicas
A14	<i>Gasification biochar from horticultural waste: An exemplar of the circular economy in Singapore</i>	Incentivos a pesquisas em inovação e tecnologia com foco na economia circular aplicada especificamente aos resíduos sólidos.
A15	<i>Multicriteria evaluation of biomass residues in Portugal to second generation bioethanol production</i>	A principal motivação para a realização deste estudo está relacionada à mobilização de grande quantidade de recursos que atualmente podem ser considerados resíduos (ou seja, resíduos florestais, resíduos agrícolas) e substituição gradativa da produção de combustíveis fósseis pela produção de base biológica para garantia social, benefícios econômicos e ambientais. Mais estudos são necessários para desenvolver tecnologias que permitam maior eficiência desse resíduo de biomassa na produção de bioetanol 2G.
A17	<i>Organic solid waste biorefinery: Sustainable strategy for emerging circular bioeconomy in China</i>	Desafios técnicos: os fatores críticos, incluindo fornecimento de biomassa e barreiras tecnológicas, bem como desafios de transporte. Em primeiro lugar, garantir o fornecimento de biomassa para biomassa é o maior desafio para a utilização de biorrefinaria devido à diferença na classificação para a tecnologia ideal. Além disso, o armazenamento e o transporte de biomassa é um desafio principal devido à menor densidade de massa e fontes dispersas, agravado pela maior degradabilidade e tempo reduzido devido ao alto teor de umidade da biomassa.

		O desafio financeiro foi em relação ao investimento de equipamentos e instalações necessárias, bem como tecnologias de apoio. Desafio de consciência social: Capital humano e experiência insuficientes, bem como consciência geral de sustentabilidade
A19	<i>Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: A review of the biochar roles in growing media, composting and as soil amendment</i>	O uso de biochar mostrou um bom potencial e contribuições benéficas para aumentar a sustentabilidade e promover a economia circular no setor agrícola. No entanto, biochar representa também uma nova tecnologia cujo uso precisa ser mais fortemente apoiado por uma base mais ampla de estudos desvendando a variabilidade inerente de condições em que essa tecnologia pode ser aplicada. Na verdade, apesar do uso de múltiplos benefícios, o biochar não é um material padronizado, portanto, sua propriedade e seu efeito podem variar de uma matriz para outra. Pesquisas adicionais devem ser conduzidas para avaliar o benefício econômico, juntamente com as perspectivas ambientais e agronômicas para a implementação e uso intensivo do biochar no contexto da economia circular.
A22	<i>From Circular Economy to Circular Ecology: A Review on the Solution of Environmental Problems through Circular Waste Management Approaches</i>	No entanto, questões de mercado, a falta de investimentos em tecnologias mais avançadas e o processo legislativo dos governos estão retardando a transição para a solução de questões ambientais por meio de iniciativas de CE. Embora os benefícios indiretos derivados de estratégias de eficiência de recursos tenham uma influência positiva sobre o meio ambiente, as publicações sobre CE têm se concentrado amplamente na otimização da cadeia de suprimentos [20-22], deixando o meio ambiente em um segundo nível. As medidas de prevenção e controle da poluição podem levar a impactos negativos inevitáveis na economia a curto prazo. Um dos principais desafios do CE é superar esse conflito.
A23	<i>Food waste recycling for compost production and its economic and environmental assessment as circular economy indicators of solid waste management</i>	A maioria das empresas e negócios industriais segue conceitos de economia linear em todo o mundo. As principais causas para o obstáculo da circularidade na gestão de resíduos são fatores econômicos, socioculturais e institucionais

Apêndice B – Especificação dos equipamentos

Quadro B1 – Características do reator de pirólise

Modelo de reator	Unidade	BST-05 Pro (montado em skid)
Capacidade de entrada	Tn / h	0.3
Tamanho do Reator	mm	φ830 x φ490 x L5880
Terreno para Equipamento (C*L*A)	m	13 x 7 x 6
Peso (configuração padrão)	T	15
Consumo de energia	kWh	37
Método de trabalho	-	Contínuo
Velocidade	RPM	3 a 7
Método de controle	-	Controle automático
Material de aquecimento	-	Diesel, gás natural, óleo pesado.
Método de aquecimento	-	Aquecimento direto
Ruído	dB/A	≤60
Tipo de resfriamento	-	Água de recirculação
Empresa	-	Beston
Tipo de operação	-	Engrenagem Externa
Exigência de alimentação	mm	Tamanho da partícula ≤ 20 Umidade ≤ 15%
Fundações	-	Obrigatório

Quadro B2 – Especificações do modelo de triturador

Modelo triturador	Unidade	Moinho CTS-80
Espessura do Material processado	mm	2 a 50
Produtividade (Kg/h)	kg/h	depende das propriedades do produto utilizado 200
Dimensões	mm	650 X 350 X 860
Potência do motor (KW)	KW	4
Empresa	-	CETRO Maquinas
Peso	Kg	125

Quadro B3 – Especificações do modelo de ensacadora

Ensacadora de biocarvão	Unidade	go-bagger GB 250
Consumo de energia	Kwh	15,15
Peso	tonelada	2,5
Funcionamento	-	eletricidade ou diesel
Empresa	-	Rotochopper

Quadro B4 – Especificações do modelo de trator

Trator	Unidade	trator utilitário John Deere 5125R
Ano modelo	-	2018
HP	cv	125
Características	-	Tração DianteiraTDP Traseira: 1000Carregadeira: Sim
Horas do motor	hora	2265
Fabricante	-	John Deere

Apêndice C – Relatório da construção da plataforma Semiárido Forte



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

RELATÓRIO TÉCNICO: PLATAFORMA SEMIÁRIDO FORTE

São Cristóvão/SE

2025

ROBÉRIO SATYRO DOS SANTOS JUNIOR

RELATÓRIO TÉCNICO: PLATAFORMA SEMIÁRIDO FORTE

Documento apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe (PRODEMA/UFS), como resultado técnico da pesquisa de doutorado.

São Cristóvão/SE

2025

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	144
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	146
2.1. Da economia linear rumo a economia circular	146
2.2. Biocombustíveis de 2ª geração na agricultura familiar	147
2.3. Sustentabilidade: aspectos sociais, ambientais e econômicos	148
3. METODOLOGIA	151
3.1. Coleta e análise dos dados	151
3.2. Procedimentos	153
4. FUNCIONAMENTO DA PLATAFORMA	156
4.1 Funcionamento da calculadora	159
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
Referências	163

1. INTRODUÇÃO

O modelo de consumo linear realiza a extração dos recursos naturais e transforma em produtos/serviços que posteriormente são consumidos e descartados. O problema neste tipo de modelo econômico é o consumo em larga escala que gera uma quantidade enorme de resíduos dispostos no meio ambiente.

No setor agrícola o modelo linear se manifesta pela extração de recursos naturais, com o desmatamento de grandes áreas de florestas para pastagem, uso de insumos derivados de combustíveis fósseis, como fertilizantes e agrotóxicos, o foco em aumentar a produção, levando a degradação do solo, contaminação da água e perda da biodiversidade devido ao uso de produtos químicos, e o desperdício ao longo da cadeia de produção com perdas na colheita e beneficiamento, e por fim o descarte, gerando problemas ambientais pela emissão de poluentes.

Seguindo a direção contrária, o modelo de economia circular, surge como alternativa para construção de uma economia verde. Na economia circular buscase realizar a disposição final da menor quantidade possível de resíduos (sendo o ideal disposição final zero), para tanto, é feita a transformação da massa residual (reciclagem, compostagem etc.), com a venda ou aplicação novamente no processo de produção.

O VII Plano Diretor da Embrapa, mostra que a agricultura além de ser a causa, também representa uma oportunidade de solução para os problemas ambientais, com a diminuição dos efeitos das mudanças climáticas, desenvolvimento da biodiversidade e o sequestro de carbono na atmosfera (EMBRAPA, 2020).

Dentro desse contexto, a agricultura familiar representa um pilar importante na produção de alimentos no Brasil. No cenário brasileiro a agricultura familiar possui relevância socioeconômica no abastecimento alimentar, geração de emprego e renda com a permanência no campo, desenvolvimento local pelo fortalecimento da economia de municípios do interior e a sustentabilidade ambiental com aplicação de práticas sustentáveis sem o uso de agrotóxicos.

A agricultura familiar e a economia circular simbolizam importantes “instrumentos” na construção da sustentabilidade, com papel fundamental no desenvolvimento sustentável (alcançar os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS), com impactos nas dimensões sociais, ambientais e econômicas.

No semiárido sergipano, região caracterizada pela deficiência hídrica e solo pobre em nutrientes, os agricultores se deparam com limitações pela área e quantidade produzida, falta de reaproveitamento da biomassa gerada pelo processo de colheita e beneficiamento, acesso a

recursos, com capital e mercados a preços justos e a assistência técnica e conhecimento, com acesso a informações e a capacitação em práticas sustentáveis e acesso à tecnologia.

Diante desse cenário, o objetivo foi o desenvolvimento de uma plataforma virtual pautada nos princípios da economia circular, que demonstrasse o potencial econômico, social, e ambiental pela transformação dos resíduos agrícolas em biocombustíveis de 2ª geração. Nesses termos, foram utilizadas as informações obtidas nos capítulos anteriores da tese para construção da plataforma.

A construção da estrutura do relatório técnico partiu da pesquisa bibliográfica com temas voltados para economia linear e circular, biocombustíveis de 2ª geração, agricultura familiar e sustentabilidade. A segunda parte mostra a metodologia utilizada para o desenvolvimento da plataforma Semiárido Forte, com a coleta e análise dos dados e procedimentos utilizados. Por fim, é visualizado o funcionamento de forma prática da plataforma.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seção discorre sobre os temas utilizados para construção da plataforma Semiárido Forte. Ela destaca a importância da transição do modelo econômico linear para a economia circular, evidenciando o potencial do aproveitamento de resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca na produção de biocombustíveis de 2ª geração por agricultores familiares. Por fim, a seção detalha os impactos ambientais, sociais e econômicos dessa abordagem, visando a sustentabilidade na região.

2.1. Da economia linear rumo a economia circular

O processo de transição da economia linear rumo a economia circular compreende uma mudança fundamental na forma de produção, consumo e descarte. Surge como uma resposta aos desafios impostos pelo modelo atual, que tem mostrado bases insustentáveis. Segundo a *Millennium Ecosystem Assessment* (2005), a população do mundo consome por ano 1,5 planetas e nos últimos 50 anos degradou 60% do ecossistema terrestre. Todo esse processo de consumo acaba sendo maior que a capacidade do planeta em se recuperar.

Para Weetman (2019) a economia circular é muito além da reciclagem ou zero lixo em aterros sanitários, simboliza a ampliação da cadeia de valor para cobrir todo ciclo de vida do produto, podendo envolver o redesign do produto, a aplicação de uma matéria prima diferente na criação de novos subprodutos, com a recuperação de valor pela transformação.

Nesse contexto, a economia circular possui um papel fundamental nessa nova revolução industrial. Com a utilização de novos termos, manufatura aditiva, remanufatura, impressão 3D, biomimética, agricultura compartilhada na comunidade, energia renovável, dentre outros. Todos esses termos bem como outros tem papel fundamental na construção de um modelo de economia sustentável.

Na agricultura a introdução dos conceitos praticados na economia circular se mostram bastante relevantes. Uma informação sobre o setor agrícola é que ele produz mais do que o suficiente para atender a população, todavia 800 milhões de pessoas vão dormir todas as noites com fome, pela ausência de alimento (FAO, 2015). Dados mais recentes apontam que entre 713 e 757 milhões de pessoas, representando 8,9% e 9,4%, passaram fome em 2023 (FAO, 2024).

A solução para os problemas com a fome mundial passa pela conscientização e distribuição igualitária dos alimentos produzidos. Entretanto, a economia circular representa um importante aliado na construção de um modelo de agricultura sustentável e acessível. Como

exemplo tem-se a química verde, que ajuda a criar subprodutos, na produção de alimentos. A internet e plataformas possibilitam a troca de informações rápidas, como a exemplo da *Food Assembly*, no Reino Unido que atua no mercado virtual na compra de alimentos em pequenos produtores (Weetman, 2019).

Outra forma de solucionar o problema para grande quantidade de resíduos agrícolas é o reaproveitamento da biomassa residual por meio da reciclagem. Pela transformação da biomassa vegetal em biocombustíveis de 2ª geração, como biocarvão, gás de pirólise e bio-óleo, beneficiando os pequenos agricultores com aumento da renda e produtividade.

2.2. Biocombustíveis de 2ª geração na agricultura familiar

A junção dos biocombustíveis de 2ª geração e da agricultura familiar representam uma estratégia importante na busca pelo desenvolvimento sustentável, segurança energética e o fortalecimento socioeconômico no Brasil. Essa combinação oferece um caminho para transformação de resíduos em riqueza, especialmente em regiões com potencial agrícola, mas devido as condições do clima possuem produções limitadas (Macedo, 2021).

Os biocombustíveis de 2ª geração são produzidos a partir de matéria lignocelulósica, são matérias que possuem lignina, celulose e hemicelulose em sua composição química e formam a estrutura fibrosa e rígida da planta. Esses biocombustíveis não competem diretamente com a produção de alimentos, diferente dos biocombustíveis de 1ª geração (etanol a partir da cana-de-açúcar ou biodiesel de soja), que usam os grãos e culturas alimentares.

A 2ª geração faz apenas o aproveitamento de resíduos agrícolas (bagaço e palhas, cascas, etc.), resíduos florestais (madeira de reflorestamento, podas) e plantas não alimentícias (espécies de algas e capins). Esse reaproveitamento torna-os mais sustentáveis, compreendendo que eles diminuem os conflitos por terra e alimentos e promovem a economia circular, modificando o que antes era visto como “lixo” em recurso econômico (Muller *et al.*, 2023). Os exemplos mais utilizados incluem: etanol celulósico (E2G), biogás (gerado pela decomposição dos resíduos orgânicos sem a presença de oxigênio), bio-óleo e biocarvão (produzido pela pirólise da biomassa).

Nesse panorama, a agricultura familiar destaca-se por sua significativa contribuição na produção de alimentos no Brasil e por ocupar a maior parte do território rural, conforme dados do Ministério da Agricultura (2022). Essa posição estratégica a qualifica como um pilar fundamental para o desenvolvimento dos biocombustíveis de 2ª geração, unindo segurança

alimentar e energética. Os principais fatores para essa escolha são: disponibilidade de matéria-prima, geração de renda e valorização do resíduo, redução de custos e autonomia energética, desenvolvimento local e economia circular e sustentabilidade.

A agricultura familiar proporciona a geração de uma grande quantidade de resíduos orgânicos e biomassa vegetal em suas atividades diárias (Quinto *et al.*, 2022). São resíduos que surgem do resto de colheitas, podas e esterco de animais. Todos esses materiais servem de matéria-prima para transformação em biocombustíveis. Além de gerar renda e valorização dos resíduos, com a agregação de valor aos materiais que seriam dispostos ou subutilizados de outras maneiras. O resultado é o aumento da produtividade e melhora na qualidade de vida dos agricultores.

Outros fatores são a redução de custos e autonomia energética com a produção de biocarvão ou outros biocombustíveis (biogás, biofertilizantes), as comunidades podem reduzir a dependência por combustíveis não-renováveis, diminuindo os custos energéticos com o aproveitamento do gás de pirólise para atender as propriedades e equipamentos da indústria (Mathias; Silva, 2023). Ademais, é notório o desenvolvimento local pelo fortalecimento das cadeias produtivas regionais, incentivando a criação de pequenas indústrias para aproveitamento da biomassa, promovendo os princípios da economia circular.

Por fim, promove a sustentabilidade, ao utilizar os resíduos, a agricultura familiar coopera para a diminuição da queima de biomassa a céu aberto, emissões de gases do efeito estufa e produção de biofertilizantes que podem ser aplicados novamente nas lavouras. Nesse sentido, a promoção da sustentabilidade busca trabalhar em três aspectos principais, o social, o econômico e o ambiental.

2.3. Sustentabilidade: aspectos sociais, ambientais e econômicos

Para iniciar, os conceitos sustentabilidade e desenvolvimento sustentável são intimamente ligados, mas são conceitos parcialmente diferentes. Muitos compreendem os termos como sinônimos, existe uma distinção na forma de aplicação.

A sustentabilidade trabalha a capacidade do sistema ou processo de se manter ao longo do tempo, sendo o objetivo avaliar a distância para se tornar sustentável. Para tanto, a sustentabilidade se apoia em três pilares interligados (ambiental, social e econômico), formando o chamado Tripé da Sustentabilidade. Já o desenvolvimento sustentável é o caminho para alcançar a sustentabilidade. É um processo que exige mudanças estratégicas e ações que

busquem suprir as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das futuras gerações conseguirem suprir suas próprias necessidades (Brundtland, 1987).

A construção da sustentabilidade é baseada em três pilares que tem como objetivo final o estado de equilíbrio do planeta e sociedades. Daly (1972) e Veiga (2010), colocam que a sustentabilidade deve estar dentro dos limites ecológicos do planeta, enxergando os limites biofísicos e o estado estacionário para obter a sustentabilidade, abrangendo a interseção entre economia, sociedade e meio ambiente.

No setor agrícola, o aspecto social da sustentabilidade foca diretamente no bem-estar, nos direitos e na qualidade de vida das pessoas envolvidas na produção e nas comunidades rurais. Isso se traduz em garantir salários dignos, ambientes de trabalho seguros, horários adequados e a erradicação do trabalho infantil e escravo (Freitas, 2024).

Além disso, um fator crucial é o investimento em infraestrutura, educação e saúde, fornecendo apoio essencial à agricultura familiar, pequenos agricultores, povos indígenas e comunidades tradicionais. A sustentabilidade social também assegura a participação e o diálogo com essas comunidades, promove a segurança alimentar com a produção de alimentos saudáveis e gera emprego e renda por meio das oportunidades criadas.

O aspecto ambiental vai buscar a conservação dos recursos naturais e ecossistemas, minimizando os impactos negativos das atividades humanas sobre o meio ambiente, permitindo que as gerações futuras possam ter acesso aos mesmos recursos e serviços ecossistêmicos.

Nesse cenário, o foco principal é a conservação dos recursos naturais com uso eficiente da água, energia, solo e matérias-primas, redução da poluição, com o controle da poluição atmosférica, gestão dos resíduos, com a implantação de políticas de redução, reutilização e reciclagem, proteção da biodiversidade, com a preservação de espécies animais e vegetais, combate as mudanças climáticas, pela redução na emissão de GEEs e restauração de ecossistemas com ações de recuperação de áreas degradadas (Santos *et al.*, 2024).

O aspecto econômico, a agricultura sustentável visa garantir a viabilidade financeira e a rentabilidade a longo prazo das atividades agrícolas, sem danificar os recursos naturais. Dessa forma, a adoção de tecnologias aumenta a produtividade de forma eficiente, com a garantia de retorno financeiro para os pequenos agricultores. Além disto, ocorre a redução de custos de produção pela otimização dos insumos, prevenção das perdas e desperdícios e o uso correto da terra (Lima; Vione, 2022).

A agricultura sustentável também permite o acesso a mercados diferenciados, com

produtos orgânicos e sustentáveis. Com incentivo a financiamentos e linhas de crédito e programas que incentivam a valorização das práticas sustentáveis. A partir disto é possível a agregação de valor com a geração de produtos sustentáveis e a resiliência com processos mais eficientes e diversificados, tornando a agricultura menos vulnerável a problemas de mercado e eventos climáticos.

Em suma, é preciso entender que os aspectos citados não funcionam de forma isolada, eles estão interligados e intrinsecamente conectados. Não viável uma solução que beneficie um aspecto em detrimento dos demais. A sustentabilidade é dada pela harmonia dos três aspectos, buscando soluções que criem valor econômico, promovam a inclusão social e a preservação ambiental.

Enquanto aos meios para chegar ao desenvolvimento sustentável. Existem os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são o exemplo concreto de como direcionar o desenvolvimento sustentável. A nível mundial são 17 objetivos e no Brasil 18, interconectados que abordam desafios para chegar na sustentabilidade (ONU, 2015).

Na pesquisa, são visualizadas estratégias que possam ser implementadas para alcançar os objetivos 2 “Erradicação da fome e agricultura sustentável” e 12 “Consumo e produção responsáveis”. Para tanto, são aplicados os princípios da economia circular na transformação dos resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca. Nesse sentido, foi desenvolvida uma plataforma que apresenta os resultados da agricultura sustentável nos aspectos ambientais, sociais e econômicos.

3. METODOLOGIA

A seção descreve os passos metodológicos para construção da plataforma Semiárido Forte. A idealização e esboço do funcionamento partiu do discente responsável pela pesquisa, enquanto o desenvolvimento prático foi feito pela Empresa Júnior de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe (EPEJEL). Para o desenvolvimento da plataforma a EPEJEL cobrou um valor de R\$ 1.600,00, o valor é referente ao desenvolvimento do design, estrutura inicial do site, e construção do banco de dados.

A EPEJEL se baseou na metodologia *Scrum*, com a divisão em sete sprints semanais, com reuniões diárias (*Daily Scrum*) e revisões ao final de cada sprint (*Sprint Review*). Além disto, o desenvolvimento utilizou o *WordPress* para o *front-end*, com integração a um banco de dados MySQL para o armazenamento e geração de relatórios.

O desenvolvimento da plataforma envolveu duas fases principais: primeiro, a coleta e análise minuciosa dos dados que fundamentaram sua construção; em seguida, a execução dos procedimentos detalhados para o seu desenvolvimento.

3.1. Coleta e análise dos dados

Esta fase foi importante para lançar as bases de uma plataforma forte e eficaz. Ela envolve a identificação, coleta e interpretação de todas as informações relevantes que serviram para informar o design, a funcionalidade e o conteúdo da plataforma. As coletas de dados se deram em artigos, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso e órgãos responsáveis pela agricultura (EMBRAPA e EMDAGRO).

As informações obtidas serviram para aplicação nas equações de base utilizadas na plataforma. Para tanto, as equações trabalharam o tripe da sustentabilidade, nos aspectos ambiental, econômico e social. No ambiental os cálculos foram quantidade de resíduos sólidos e líquidos, biocarvão, bio-óleo, gás de pirólise, CO₂ produzido com a operação, CO₂ sequestrado, energia consumida com a operação, energia produzida com a operação, biodigestor, biofertilizante, biogás, balanço de carbono e balanço energético.

As informações e equações para o aspecto ambiental da plataforma estão contidas no quadro C1. Essas referências foram obtidas no quarto capítulo/artigo da tese, o qual trata da construção de cenários e emprega as mesmas equações.

Quadro C1 – Equações e informações no aspecto ambiental

Equações	Informações
Maniva (MV) = área colhida * (qtd. de sacos de maniva por hectare * peso do saco) Casca (C) = produção da cultura * % da casca da mandioca Qtd. de resíduo sólido (QRS) = MV + C	Área colhida = fornecida pelo agricultor(a); Qtd. de sacos de maniva hectare = 15 unidades; Peso do saco = 25kg cada ou 0,025 toneladas cada; % da casca da mandioca = 5%.
maniva sem umidade (MVU) = MV * % de umidade da maniva Casca sem umidade (CU) = C * % de umidade da casca Qtd. de resíduo sólido sem umidade (QRSU) = MVU + CU	% de umidade da maniva = 10,4% % de umidade da casca = 64,6%
Biocarvão (B) = QRSU * % de carbono Bio-óleo (BO) = (QRSU * 0,104) / 1,2 Gás de pirólise (GP) = (QRSU*0,214) / 0,00152	% de carbono = 30,8% % de bio-óleo = 10,4% Densidade bio-óleo 1,2 kg/m ³ % de gás de pirólise = 21,7% Densidade do gás de pirólise 1,52 kg/m ³
CO₂ Sequestrado (COS) = Biocarvão (B) * teor de carbono CO₂ produzido com a operação (COP) = GFR + TMR + TI Gás natural para funcionamento do reator (GFR) = (combustível utilizado * taxa de emissão de CO ₂ para gás natural) / 1000 ton/mês Transporte da massa residual entre as cidades (TMR) = (qtd. de diesel gasto para transporte da massa residual * taxa de emissão de CO ₂ para diesel) / 1000 Qtd. de diesel gasto para transporte da massa residual = (valor do litro diesel * transporte) / 100 Transporte interno do trator (TI) = (qtd. de diesel gasto para transporte interno * taxa de emissão de CO ₂ para diesel) / 1000 Balanco de carbono (BC) = COP – COS	teor de carbono = 61% combustível utilizado = 8.100 L/mês Taxa de emissão de CO ₂ para gás natural = 1,9 kg de CO ₂ /m valor do litro diesel = fornecido pelo(a) agricultor(a) transporte interno = fornecido pelo(a) agricultor(a) em km
Energia consumida com a operação (ECO) = ER + EE + ET Energia produzida com a operação (EPO) = QRSU * PC Qtd. de resíduo sólido sem umidade (QRSU) = gerado no começo Balanco energético (BE) = ECO – EPO	Eletricidade para manter o reator funcionando 24h em 30 dias (ER) = 87.660 kWh Eletricidade para manter o ensacador de biocarvão (EE) = 10.908 kWh Eletricidade para manter o triturador funcionando 24h em 30 dias (ET) = 2.880kWh Poder calorífico (PC) = 6 kWh
Biodigestor Manipueira (BM) = manipueira (MP) * % de redução da carga orgânica (média) manipueira (MP) = gerado no começo Biofertilizante (BF) = Biodigestor Manipueira (BM) Biogás (BG) = Biodigestor Manipueira (BM)	% de redução da carga orgânica (média) = 76,88%

Elaborado: Autor (2025)

No aspecto econômico o quadro C2 mostra as equações e informações para os valores monetários da maniva crua, biocarvão, bio-óleo, biogás, e CO₂ sequestrado. Em relação ao biogás, como premissa foi estipulado uma produção de 50% de consumo animal com a manipueira gerada e 50% para o biodigestor, com a subdivisão na produção de biogás e biofertilizante.

Quadro C2 – Equações e informações no aspecto econômico

Equações	Informações
Maniva crua (MC) R\$ = MV * valor de venda da maniva	valor de venda da maniva (R\$) = 600,00 a ton
Biocarvão valor Monetário (BM) R\$ = B * valor de venda biocarvão	valor de venda biocarvão (R\$) = 7.549 a ton
Bio-óleo valor monetário (BOM) R\$ = BO * valor de venda bio-óleo	valor de venda bio-óleo (R\$) = 4.404,00 a ton
Biogás valor monetário (BGM) R\$ = BG* valor de venda biogás	valor de venda biogás = 2,30 kg/m ³
CO₂ Sequestrado valor monetário (COSM) R\$ = COS * valor de venda do CO ₂	valor de venda do CO ₂ (R\$) = 365,00 a ton

Elaborado: Autor, 2025.

Em nível social, o relatório mostra o aumento no nível de produção pela utilização do biocarvão e o percentual de aumento na renda pela comercialização dos biocombustíveis e sequestro de CO₂. O quadro C3 mostra as equações e informações da produtividade sem e com biocarvão percentual de aumento de produtividade e renda.

Quadro C3 – Equações e informações no aspecto social

Equações	Informações
Produtividade sem biocarvão (PSB tonelada/hectare) = QPC / AC	Qtd. de produção da cultura (QPC) = fornecido no começo (tonelada) Área colhida (AC) = fornecido no começo (hectare)
Produtividade com biocarvão (PCB tonelada/hectare) = (QPC/AC) * 0,5 + PSB	% de incremento com biocarvão = 0,5
% de aumento na renda pelos biocombustíveis e CO₂ (ARBC) = [(Bicombustíveis e sequestro de CO ₂ (BSC) - Maniva crua (MC)) / MC] * 100 Bicombustíveis e sequestro de CO₂ (BSC) = COSM + BM + BOM + GPM	Maniva crua (MC) = fornecido anteriormente

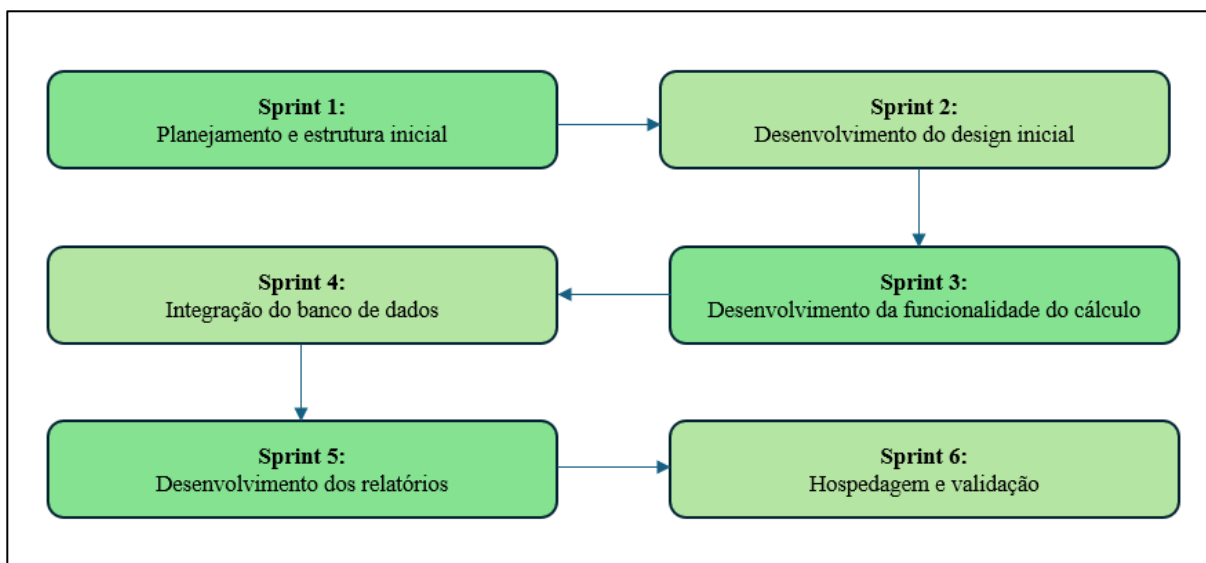
Elaborado: Autor, 2025.

Os quadros C1, C2 e C3 forneceram as informações e equações essenciais para a elaboração do relatório, que detalha os resultados da transformação da biomassa vegetal da mandioca em biocombustíveis de 2ª geração. Para gerar essas análises, bastou inserir os valores necessários na interface inicial.

3.2. Procedimentos

A fase de procedimentos detalha como ocorreu a divisão do projeto. Seguindo a estrutura de análise, o projeto foi dividido em 6 *sprints*: planejamento e estrutura inicial, desenvolvimento do design inicial, desenvolvimento da funcionalidade de cálculo, integração do banco de dados, desenvolvimento dos relatórios e hospedagem e validação final. A figura C1 mostra em formato de fluxograma a divisão dos sprints.

Figura C1 – Fluxograma dos sprints para desenvolvimento da plataforma.



Fonte: Autor, 2025.

No *sprint* 1 ocorreu o planejamento e estrutura inicial da plataforma, foi realizada uma reunião para alinhamento das informações que deveriam constar na plataforma. A etapa seguinte foi o desenvolvimento do design da plataforma (*sprint* 2), com a elaboração da logomarca, imagens e cores utilizadas no site. A figura C2 ilustra a logomarca desenvolvida para interface. As setas simbolizam a economia circular pela reciclagem/reaproveitamento da biomassa vegetal, a gota e o círculo preto representam o bio-óleo e biocarvão produzido pela transformação da biomassa, a planta representa o tipo de resíduo empregado e o sol a questão do semiárido sergipano.

Figura C2 – Logomarca para plataforma Semiárido Forte.



Fonte: Autor, 2025.

O *sprint* 3 focou no desenvolvimento dos cálculos detalhados nos quadros C1, C2 e C3. Em seguida, no *sprint* 4, todas essas informações foram integradas ao banco de dados para garantir o pleno funcionamento da plataforma. Essa integração unificou e consolidou os dados coletados e transformados. Por fim, o *sprint* 5 (a penúltima etapa) concentrou-se no desenvolvimento da visualização do relatório, que é gerado após a entrada das informações iniciais. Este relatório apresenta os resultados completos dos aspectos ambientais, sociais e econômicos, considerando o reaproveitamento dos resíduos do processo de colheita e beneficiamento.

Por fim, na última etapa (*sprint* 6) vai ser feita a hospedagem da plataforma em algum órgão público que os agricultores e pesquisadores possam utilizar. No mais, quando necessário eram feitas mudanças na estrutura da plataforma, bem como a correção de valores. A próxima seção mostra como ocorre o funcionamento da plataforma e mostra o relatório gerado com a entrada dos valores.

4. FUNCIONAMENTO DA PLATAFORMA

A Plataforma Semiárido Forte oferece uma interface intuitiva para explorar o funcionamento do projeto e os bioprodutos gerados. Em sua página inicial (Figura C3), você encontra informações essenciais, incluindo uma calculadora para simulações, uma descrição detalhada do projeto e os parceiros/financiadores. Além disso, a seção "Bioprodutos" apresenta uma descrição completa dos resultados da pirólise da biomassa, destacando as inovações e aplicações.

Figura C3 – Interface inicial da Plataforma Semiárido Forte

A interface da Plataforma Semiárido Forte apresenta um layout limpo. No canto superior esquerdo, há um logotipo circular com uma planta e o texto 'SEMIÁRIDO FORTE'. No canto superior direito, um menu de navegação contém os links 'Projeto', 'BioProdutos' e 'Contato'. O corpo principal da página é dividido em duas seções. À esquerda, um formulário de contato com o seguinte conteúdo:

- Nome:** Campo de texto com o placeholder 'Digite seu nome'.
- Whatsapp:** Campo de texto com o placeholder 'Digite seu número' e uma bandeira do Brasil.
- Porte:** Menu suspenso com a opção '- selecione -'.
- Tipo de cultura:** Menu suspenso com a opção '- selecione -'.

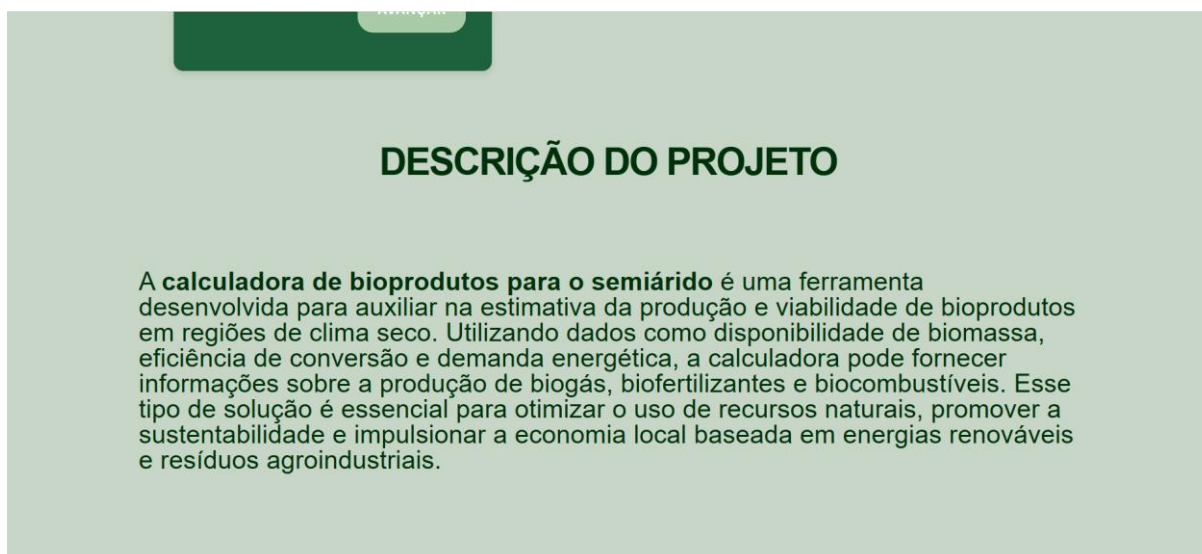
À direita do formulário, o título 'Plataforma Semiárido Forte' é exibido em uma fonte grande e escura. Abaixo dele, um texto descreve a ferramenta: 'Nossa ferramenta permite você descobrir o potencial econômico, ambiental e social para o aproveitamento de biomassas residuais agro-industriais.' Um botão arredondado com o texto 'SAIBA MAIS' está posicionado na base desta seção.

Fonte: Autor, 2025.

Na parte superior da interface, a seção "Projeto" da plataforma Semiárido Forte (Figura C3) se desdobra em três subseções principais: "Calculadora", "Descrição do Projeto" e "Financiadores". A subseção "Calculadora" é o ponto de partida para geração do relatório final com as informações nos aspectos ambientais, sociais e econômicas para os resíduos da cultura.

A subseção "Descrição do Projeto" (Figura C4) oferece um texto conciso que explica o propósito e o objetivo final do projeto, destacando como ele visa o aproveitamento da biomassa vegetal proveniente da colheita e do beneficiamento de culturas. Já a subseção "Financiadores" (Figura C5) apresenta as instituições que apoiam financeiramente a iniciativa.

Figura C4 – Interface inicial: Seção de descrição do projeto



Fonte: Autor, 2025.

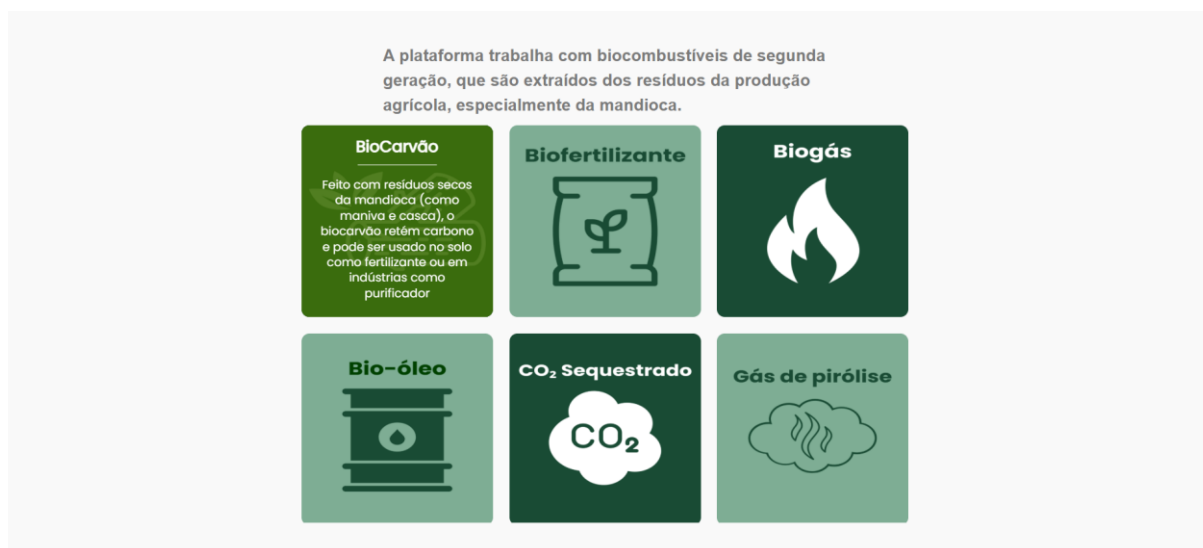
Figura C5 – Interface inicial: financiadores do projeto.



Fonte: Autor, 2025.

A seção "Bioprodutos" da plataforma (Figura C6) detalha os diversos produtos gerados a partir da biomassa. Para descobrir a finalidade e o processo de obtenção de cada um, basta passar o cursor do mouse sobre o ícone do bioproduto desejado. Uma breve descrição aparece, explicando suas características e aplicações.

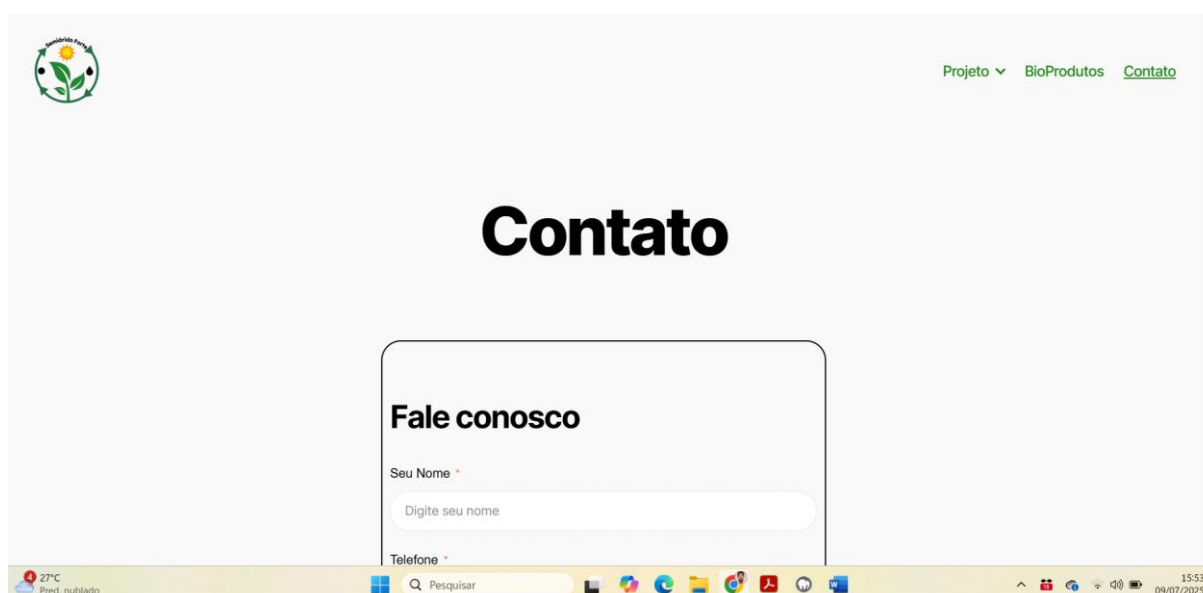
Figura C6 – Subseção com a descrição dos bioprodutos



Fonte: Autor, 2025.

A última seção serve para os usuários da plataforma entrarem em contato com os responsáveis (Figura C7). Nessa parte o usuário deve inserir o nome, telefone para contato, localidade (cidade), e-mail, assunto e mensagem que deseja enviar.

Figura C7 – Subseção com área para entrar em contato.



Fonte: Autor, 2025.

Quando for necessário retornar ao meu principal basta apenas clicar no ícone do projeto. A seção seguinte exemplifica o funcionamento da calculadora e o relatório gerado com a introdução das informações.

4.1. Funcionamento da calculadora

A calculadora é o principal produto da pesquisa. A ideia é que a quantidade de culturas seja expandida. No momento o cálculo é feito apenas para os resíduos da colheita e beneficiamento da mandioca. A figura C8 mostra o design inicial da calculadora, na primeira parte é preciso inserir o nome, *whatsapp*, porte da cultura, tipo da cultura e clicar em avançar. Na segunda parte, faz a introdução dos valores de produção da cultura, área colhida, preço do diesel, transporte entre cidades e transporte interno (todos valores são estimativos ou o usuário pode colocar os valores que obteve com a produção anterior) e por fim clica em enviar.

Figura C8 – Interfaces da calculadora da Plataforma Semiárido Forte

The figure displays two screenshots of a mobile application interface, likely for a calculator, with a dark green background and light green input fields.

Left Screenshot (Form 1):

- Nome: *** (Required): Input field containing "Robério Satyro".
- Whatsapp:** Input field containing a Brazilian flag icon and "(75) 98313-8961".
- Porte: *** (Required): Dropdown menu showing "Médio".
- Tipo de cultura: *** (Required): Dropdown menu showing "Mandioca".
- AVANÇAR** button at the bottom right.

Right Screenshot (Form 2):

- Produção da cultura (Tonelada):** Input field containing "65.000,00".
- Área colhida (Hectare):** Input field containing "5.000,00".
- Preço do Diesel (R\$/L):** Input field containing "6,00".
- Transporte entre as cidades (Km):** Input field containing "360,00".
- Transporte interno do trator (Km):** Input field containing "10,00".
- VOLTAR** button at the bottom left.
- ENVIAR** button at the bottom right.

Fonte: Autor, 2025.

Após a entrada dos valores aparece um o documento em PDF para ser baixado como mostra a figura C9.

Figura C9 – Documento a ser baixado em PDF

Whatsapp:

Porte: *

Tipo de cultura: *

Nossa ferramenta permite você descobrir o potencial econômico, ambiental e social para o aproveitamento de biomassas residuais agro-industriais.

Calculado com sucesso! O relatório está disponível para Download. Obrigado por utilizar nossa calculadora, volte sempre! :)

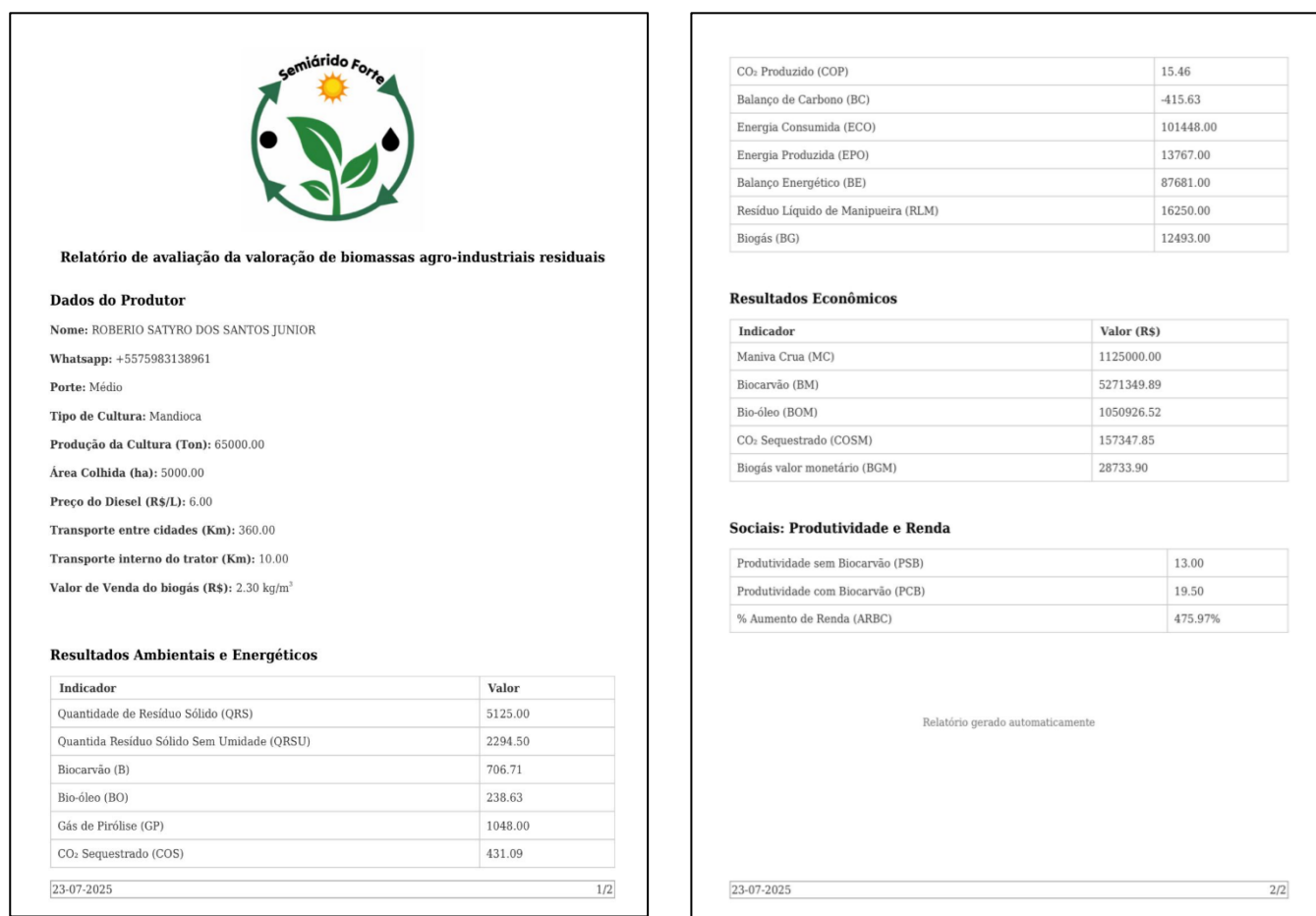
Fonte: Autor, 2025.

Ao clicar em baixar ele irá abrir o relatório com as informações nos aspectos ambientais, sociais e econômicos a partir das informações iniciais inseridas na calculadora. A figura C10 mostra um exemplo de relatório com base em valores estimados para produção da mandioca.

No relatório vão constar os dados do produtor, que foram fornecidos no preenchimento da calculadora. Em seguida são fornecidos os resultados no aspecto ambiental e energético, com a quantidade de resíduos com e sem umidade, biocarvão, bio-óleo, biogás, gás de pirólise e CO₂ sequestrado. Além disto, o relatório mostra a quantidade de CO₂ produzido no processo de transformação da biomassa, a quantidade de energia consumida e o balanço entre o que é consumido e gerado (carbono e energia).

Os resultados econômicos mostram os valores obtidos com a venda dos bioprodutos gerados pelo processo de transformação da biomassa vegetal em biocarvão. Bem como o valor monetário com a venda do CO₂ sequestrado. Por fim o relatório mostra os resultados sociais com aumento da produtividade e renda dos agricultores. Mostrando a produtividade sem e com a utilização do biocarvão.

Figura C10 – Relatório gerado a partir da calculadora da Plataforma Semiárido Forte



Fonte: Autor, 2025.

A partir do relatório gerado os usuários podem compreender os benefícios e impactos com a transformação da biomassa vegetal produzida pela colheita e beneficiamento das culturas. Para os pesquisadores a plataforma funciona como fonte de informações para produção de trabalhos científicos que tem como base a agricultura sustentável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Plataforma Semiárido Forte representa uma importante ferramenta para o desenvolvimento sustentável em contexto nacional, bem como para o semiárido sergipano. Sua relevância se manifesta nos três pilares da sustentabilidade: ambiental, social e econômico.

No aspecto ambiental, a plataforma destaca a importância da reciclagem/reaproveitamento da biomassa vegetal. Ao promover a valorização de resíduos agrícolas e subprodutos do beneficiamento das culturas, ela contribui diretamente para a redução da queima a céu aberto, minimizando a emissão de gases poluentes e otimizando o uso de recursos naturais. A geração de bioprodutos a partir dessa biomassa aponta para um futuro mais limpo, onde o "desperdício" se transforma em matéria-prima valiosa.

Socialmente, a plataforma Semiárido Forte tem o potencial de capacitar comunidades locais e gerar novas oportunidades de trabalho e renda. Ao difundir informações sobre os bioprodutos e suas aplicações, a plataforma incentiva o desenvolvimento de cadeias produtivas locais, promovendo a inclusão e o protagonismo das populações rurais (agricultura familiar).

Para o aspecto econômico, a plataforma impulsiona a diversificação da matriz produtiva da região. A transformação da biomassa em bioprodutos de alto valor abre novos mercados e cria nichos econômicos inovadores. A calculadora, por exemplo, oferece uma visão do potencial financeiro do aproveitamento desses recursos, incentivando investimentos e a criação de negócios sustentáveis. Em última instância, a Semiárido Forte fortalece a economia local, tornando-a mais resiliente e menos dependente de atividades tradicionais.

Em suma, a Plataforma Semiárido Forte é um exemplo notável de como a tecnologia pode ser empregada para promover a sustentabilidade em suas múltiplas dimensões. Ela não apenas educa e informa, mas também inspira e capacita, pavimentando o caminho para um futuro sustentável e circular com aplicação total dos resíduos gerados.

REFERÊNCIAS

BRUNDTLAND, G H et al. **Our common future ; by world commission on environment and development**. . Oxford: Oxford University Press. . Acesso em: 25 jun. 2025. , 1987

Daly H.E. 1972. 'In defense of a steady-state economy'. *American Journal of Agricultural Economics* 54 (5): 945–54.

ecosystem assessment, M. E. A. (2005). *Ecosystems and human well-being* (Vol. 5, p. 563). Washington, DC: Island press.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. The State of Food Insecurity in the World. 2015. Acesso em 23 jun. 2025. Disponível em: www.fao.org/hunger/key-messages/en/.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. The State of Food Insecurity in the World. 2024. Acesso em 23 jun. 2025. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/39dbc6d1-58eb-4aac-bd8a-47a8a2c07c67/content/state-food-security-and-nutrition-2024/ending-hunger-food-security.html#gsc.tab=0>.

FREITAS, C. O. Agricultura familiar e desenvolvimento rural sustentável. Viçosa, Minas Gerais: UFV, IPPDS, 2024.

de Lima Bado, SR, & Vione, CIB (2022). Linha Triple Botton: pilares da sustentabilidade empresarial Linha Triple Botton: pilares da sustentabilidade corporativa. *Revista Brasileira de Desenvolvimento* , 8 (3), 17507-17513.

Macedo Sampaio, A. M. P. (2021). POLÍTICAS PÚBLICAS DE INCENTIVO À INSERÇÃO DA AGRICULTURA FAMILIAR NA CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL E SUA INTER-RELAÇÃO COM O DIREITO AO DESENVOLVIMENTO E A AGENDA 2030 DA ONU. *Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo*, 7(2), 60-76.

Mathias, J. F. C. M., & Silva, S. S. (2023). Oportunidades e desafios para o desenvolvimento do biogás na agricultura familiar do Brasil. *Revista de Política Agrícola*, 32(2), 87.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agricultura Familiar**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em: 18 de outubro de 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. ODS, p. 31, 2015.

Quinto, L. B., Marchi, J., & Soares, A. P. (2022). Agricultura Familiar, Economia Circular e Empreendedorismo Rural: Um Estudo Bibliométrico entre os anos de 2018 a 2021. *Revista Estudo & Debate*, 29(3).

dos Santos, J., Schneider, MB, & Santoyo, AH (2024). A relação entre o crédito rural e as práticas de sustentabilidade na agricultura nos municípios do oeste do Paraná. *Revista Tecnologia e Sociedade* , 20 (61), 292-316.

Da Veiga, José Eli. *Economia socioambiental* . Senac, 2010. Disponível em: https://www.zeeli.pro.br/wp-content/uploads/2015/04/2009_-_Veiga_Cechin_-_Intr_%C3%A0_econ_socioamb.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.