

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL  
BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA TECNOLOGIA

# LIVRO BIOCHAR

## BIOMASSA CANA-DE-AÇÚCAR

2025

E  
D  
I  
T  
O  
R  
A  
  
B  
R  
A  
S  
I  
L  
  
B  
I  
O  
M  
A  
S  
S  
A



BAGAÇO E PALHA DA CANA-DE-AÇÚCAR  
SEQUESTRO CARBONO FERTILIZANTE  
ORGÂNICO AGRICULTURA REGENERATIVA

# SUMÁRIO EXECUTIVO

## LIVRO BIOCHAR BIOMASSA CANA-DE-AÇÚCAR

INTRODUÇÃO.....	15
i. Declarações Prospectivas	
ii. Exposição Fundamental Biochar Biomassa Cana-de-açúcar	
iii. Livro Biochar Biomassa Cana-de-açúcar	
CAPÍTULO I CANA-DE-AÇÚCAR.....	28
1.1. Cultura da Cana-de-açúcar	
1.2. Importância econômica da Cana-de-açúcar	
1.3. Meio-ambiente e a cana-de-açúcar	
1.4. Aspectos sociais da cana-de-açúcar.	
1.5. Classificação da cana-de-açúcar.	
1.6. Características das espécies	
1.7. Variedades comerciais de cana-de-açúcar	
1.8. Morfologia	
1.9 Regiões produtoras	
1.10. Safra 2024/25 Cana-de-açúcar no Brasil	
1.10.1. Produção de Cana-de-açúcar – Análise Estadual.	
1.10.2. Subprodutos	
1.10.3. Mercado da cana-de-açúcar	
1.10.4. Dados da safra anterior cana-de-açúcar..	
1.11. Produtividade das lavouras.	
1.12. Colheita da Cana-de-açúcar	
1.12.1 Colheita manual	
1.12.2 Colheita mecanizada	
1.13. Processamento da cana-de-açúcar	
1.13.1. Qualidade da cana-de-açúcar	
1.13.2 Importância da qualidade da cana para a eficiência industrial	
1.14. Palha da cana-de-açúcar.	
1.14.1. Composição Físico-química da Palha da Cana-de-açúcar	

- 1.15..Bagaço da cana-de-açúcar.
- 1.15..1. Composição Físico-química do Bagaço da cana-de-açúcar.
- 1.16. Água de Lavagem da Cana-de-açúcar.
- 1.17. Torta de filtro
- 1.18. Vinhaça

## CAPÍTULO II PIRÓLISE DA PALHA E DO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....36

- 2.1. Pirólise da Palha e do Bagaço da Cana-de-açúcar
  - 2.1.1 Processos de conversão térmica
  - 2.1.2 Pirólise do Cana-de-açúcar
  - 2.1.3 Pirólise rápida da biomassa do Cana-de-açúcar
  - 2.1.4 Produtos da pirólise rápida da biomassa do Cana-de-açúcar
    - 2.1.4.1. Biocarvão da biomassa do Cana-de-açúcar
    - 2.1.4.2. Gases não condensáveis da pirólise da biomassa do Cana-de-açúcar
    - 2.1.4.3. Bio-óleo da pirólise da biomassa do Cana-de-açúcar
  - 2.1.5. Efeito dos parâmetros de reação na pirólise rápida de biomassa do Cana-de-açúcar
  - 2.1.6. Efeito da temperatura de reação
  - 2.1.7. Efeito da taxa de aquecimento
  - 2.1.8. Efeito do tempo de residência e vazão de gás inerte de arraste
  - 2.1.9. Efeito do tamanho da partícula de biomassa do Cana-de-açúcar
  - 2.1.10. Efeito da composição da biomassa do Cana-de-açúcar
  - 2.1.11. Efeito da adição de catalisadores
  - 2.1.12. Efeito do uso de sólidos inertes em um leito fluidizado
  - 2.1.13 Análise Térmica da Pirólise da Biomassa do Cana-de-açúcar
    - 2.1.13.1. Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG)
    - 2.1.13.2. Modelos cinéticos de degradação térmica
    - 2.1.13.3. Modelos de reação global e de energia de ativação distribuída
    - 2.1.13.4. Modelo de reações paralelas e independentes
  - 2.1.14. Procedimento técnico da pirólise da biomassa do Cana-de-açúcar
    - 2.1.14.1. Matéria-prima utilizada
    - 2.1.14.2. Palha e Bagaço Cana-de-açúcar
    - 2.1.14.3. Catalisadores
    - 2.1.14.4. Caracterização da biomassa da palha e bagaço do Cana-de-açúcar



- 2.1.14.5. Densidade da Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.5.1. Densidade aparente
  - 2.1.14.5.2. Densidade real
  - 2.1.14.5.3. Densidade bulk
  - 2.1.14.5.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
  - 2.1.14.5.5. Poder calorífico
  - 2.1.14.5.6. Análise imediata
  - 2.1.14.5.7. Teor de umidade
  - 2.1.14.5.8. Teor de voláteis
  - 2.1.14.5.9. Teor de cinzas
  - 2.1.14.5.10. Carbono fixo
- 2.1.14.6. Análise elementar da palha e do bagaço do Cana-de-açúcar
- 2.1.14.7. Composição química das fibras lignocelulósicas
- 2.1.14.8. Análises termogravimétricas
- 2.1.14.9. Pirólise analítica da palha e bagaço do Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.9.1. Micropirólise acoplada a GC/MS
  - 2.1.14.9.2. Micropirólise catalítica
  - 2.1.14.9.3. Planejamento de experimentos (Fatorial 3k)
- 2.1.14.10. Pirólise rápida em leito fluidizado borbulhante da palha e bagaço do Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.10.1. Unidade experimental Pirólise rápida em leito fluidizado borbulhante da palha e bagaço do Cana-de-açúcar
- 2.1.14.11. Procedimento experimental da pirólise da palha e bagaço do Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.11.1. Caracterização do bio-óleo
    - 2.1.14.11.1.1. Teor de água
    - 2.1.14.11.1.2. Viscosidade
    - 2.1.14.11.1.3. Poder calorífico
    - 2.1.14.11.1.4. Análise elementar
    - 2.1.14.11.1.5. pH
    - 2.1.14.11.1.6. Identificação dos compostos via GC/MS
  - 2.1.14.11.2. Caracterização do biocarvão
    - 2.1.14.11.2.1. Densidade
    - 2.1.14.11.2.2. Microscopia eletrônica de varredura

- 2.1.14.11.2.3. Análise elementar
- 2.1.14.11.2.4. Análise termogravimétrica
- 2.1.14.12. Resultado Final da Pirólise da Palha e do Bagaço do Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.12.1. Caracterização da biomassa do Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.12.2. Densidades aparente, real e bulk
  - 2.1.14.12.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
  - 2.1.14.12.4. Poder calorífico
  - 2.1.14.12.5. Análise imediata
  - 2.1.14.12.6. Análise elementar
  - 2.1.14.12.7. Composição química
- 2.1.14.13. Análises termogravimétricas
  - 2.1.14.13.1. Cinética de degradação térmica
  - 2.1.14.13.2. Modelos cinéticos
- 2.1.14.14. Pirólise analítica da Palha e Bagaço do Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.14.1. Efeito da temperatura na pirólise analítica da palha e bagaço de Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.14.2. Efeito da presença de catalisadores na pirólise analítica da palha e bagaço de Cana-de-açúcar
  - 2.1.14.14.3. Análise estatística do planejamento de experimentos
- 2.1.14.15. Pirólise rápida em reator contínuo de leito fluidizado borbulhante
  - 2.1.14.15.1. Ensaio na unidade experimental
  - 2.1.14.15.2. Resultado final do bio-óleo da palha e bagaço do Cana-de-açúcar
    - 2.1.14.15.2.1. Propriedades físico-químicas do bio-óleo
  - 2.1.14.15.3. Resultado do resíduo sólido da pirólise: biocarvão
    - 2.1.14.15.3.1. Caracterização do resíduo sólido - biocarvão da pirólise da palha e bagaço do Cana-de-açúcar
- 2.1.15. Conclusivamente

## CAPÍTULO III BIOCHAR DADOS GERAIS .....102

- 3.1 Biochar
  - 3.1.1 Terminologia.
  - 3.1.2. Produção de Biochar.
  - 3.1.3. Biochar como modificadores de solo.
  - 3.1.4. Sequestro de Carbono.

- 3.1.5. Biochar como fertilizante orgânico.
- 3.1.6. Histórico e Importância do Biochar
- 3.1.7 Gerenciamento ambiental.
- 3.1.8. Biochar alternativa ecológica reduções emissões GEE.
  - 3.1.8.1. Biochar e mitigação das mudanças climáticas
  - 3.1.8.2. Biochar como um eficiente dissipador de CO<sub>2</sub>
  - 3.1.8.3. Redução das emissões de metano
  - 3.1.8.4. Zonas úmidas, biochar e sequestro de carbono
  - 3.1.8.5. Mitigação de emissões de N<sub>2</sub>O mediada por biochar
  - 3.1.8.6. Controle da poluição, incluindo remoção adsorptiva e remoção reativa de contaminantes inorgânicos e orgânicos
- 3.1.9. Efeitos do biochar no crescimento e na saúde das plantas
  - 3.1.9.1. Melhoria no fornecimento de nutrientes para as culturas e maiores rendimentos
  - 3.1.9.2. Redução da perda de nutrientes
  - 3.1.9.3. Atividade do Biochar em diferentes tipos de solo.
  - 3.1.9.4. Fertilizantes de liberação lenta
  - 3.1.9.5. O biochar altera significativamente o microbioma do solo.
- 3.1.10. Biochar e Economia Circular
- 3.1.11. Limitações do Biochar.
- 3.1.12. Produção de biochar e fatores a serem considerados para suas aplicações.
- 3.1.13. Prós e contras do biochar.
- 3.1.14. Armazenamento de nutrientes no biochar
- 3.1.15. Biochar e sua escala
- 3.1.16. Características do Biochar
- 3.1.17. Propriedades do Biochar
- 3.1.18. Vantagens e benefícios do Uso do Biochar
  - 3.1.18.1. Segurança alimentar na Agricultura
  - 3.1.18.2. Uso na construção civil.
  - 3.1.18.3. Conservação biodiversidade
  - 3.1.18.4. Melhoria da fertilidade do solo.
  - 3.1.18.5. Aumento da produtividade das culturas
  - 3.1.18.6. Melhor retenção e drenagem de água
  - 3.1.18.7. Redução da acidez do solo

- 3.1.18.8. Adsorção de poluentes do solo
- 3.1.18.9. Aumento da resistência das plantas a doenças
- 3.1.19 Biochar e bioeconomia
- 3.1.20. Importância econômica do biochar
- 3.1.21. Biochar e agricultura regenerativa

## CAPÍTULO IV BIOCHAR BIO-ÓLEO PIROLENHOSO GÁS..... 160

- 4.1. Bio-óleo
  - 4.1.1. Propriedades do bio-óleo
  - 4.1.2. Características do bio-óleo
  - 4.1.3. Teor de água no bio-óleo
  - 4.1.4. Densidade do bio-óleo
  - 4.1.5. Teor de sólidos
  - 4.1.6. Teor de oxigênio
  - 4.1.7. Poder calorífico
  - 4.1.8. Aplicações do bio-óleo
  - 4.1.9. Upgrading do bio-óleo
- 4.2. Gases da carbonização
  - 4.2.1. Gás natural sintético – Syngas
- 4.3. Extrato Pirolenhoso
  - 4.3.1 Políticas regulatórias uso extrato pirolenhoso Brasil, China e Japão
  - 4.3.2. Composição do Extrato Pirolenhoso
  - 4.3.3. Propriedades do extrato pirolenhoso.
  - 4.3.4. Processo Produção Extrato Pirolenhoso.
  - 4.3.5. Utilizações do Extrato Pirolenhoso
    - 4.3.5.1. Melhoria da produtividade e qualidade das culturas
    - 4.3.5.2 Extrato pirolenhoso como Adjuvante Agrícola
    - 4.3.5.3 Potencializador de herbicidas
    - 4.3.5.4 Melhorador de absorção de nutrientes.
    - 4.3.5.5 Agente dispersante dos produtos agrícolas
    - 4.3.5.6 Regulador de pH
  - 4.3.6. Extrato Pirolenhoso como fertilizante e condicionador de solo
  - 4.3.7. Extrato Pirolenhoso como estimulante do crescimento vegetal.

- 4.3.8. Extrato Pirolenhoso como manejo integrado de pragas e doenças
- 4.3.9. Extrato Pirolenhoso como ação Quelatizante
- 4.3.10. Indutor de Bioresistência Sistêmica
- 4.3.11. Aumento da Eficiência Fotossintética
- 4.3.12. Extrato Pirolenhoso como incremento na produção de proteínas e açúcares
- 4.3.13. Aplicações Industriais e Ambientais
- 4.3.14. Vantagens Ambientais.
- 4.3.15. Oportunidades de economia com o extrato pirolenhoso
- 4.3.16. Vinagre da Madeira

## CAPÍTULO V MERCADO BIOCHAR CANA-DE-AÇÚCAR.....199

- 5.1. Setores de aplicações do Biochar
  - 5.1.1. Biochar na Pecuária
    - 5.1.1.1. Agente de silagem
    - 5.1.1.2. Aditivo/suplemento alimentar dos animais
    - 5.1.1.3. Aditivo para cama de animais (avicultura-frango)
    - 5.1.1.4. Tratamento de chorume
    - 5.1.1.5. Compostagem de esterco
  - 5.1.2. Biochar na Agricultura(tratamento de solos)
    - 5.1.2.1. Adubo ou Fertilizante de carbono
    - 5.1.2.2. Aditivo de composto
    - 5.1.2.3. Substituto de turfa em solo para vasos
    - 5.1.2.4. Proteção de plantas
    - 5.1.2.5. Fertilizante compensatório para oligoelementos
    - 5.1.2.6. Aditivo e remediação de solos
    - 5.1.2.7. Substratos de solo
    - 5.1.2.8. Filtrar pesticidas e fertilizantes
  - 5.1.3. Biochar no setor de Construção
    - 5.1.3.1. Isolamento térmico
    - 5.1.3.2. Descontaminação do ar
    - 5.1.3.3. Descontaminação das fundações de terra
    - 5.1.3.4. Regulação da umidade
    - 5.1.3.5. Proteção contra a radiação eletromagnética



- 5.1.4. Biochar para tratamento de água
  - 5.1.4.1. Tratamento de água de lagoas
  - 5.1.4.2. Tratamento de água na piscicultura
- 5.1.5. Biochar na produção de Biogás e Hidrogênio
  - 5.1.5.1. Aditivo (fermentação) de biomassa para produção biogás
  - 5.1.5.2. Tratamento de lama (laticínios) para produção de biogás
- 5.1.6. Biochar para tratamento de águas residuais
  - 5.1.6.1. Filtro de carvão ativo
  - 5.1.6.2. Aditivo de pré-lavagem
  - 5.1.6.3. Sanitários de compostagem
- 5.1.7. Biochar para tratamento da água potável
  - 5.1.7.1. Microfiltros
- 5.1.8. Biochar para uso industrial
  - 5.1.8.1. Filtros de exaustão
  - 5.1.8.2. Controle de emissões
  - 5.1.8.3. Filtros de ar ambiente
  - 5.1.8.4. Materiais industriais
    - 5.1.8.5. Fibras de carbono
    - 5.1.8.6. Material plástico e polímeros
    - 5.1.8.7. Eletrônica em semicondutores
    - 5.1.8.8. Material para baterias
    - 5.1.8.9. Metalurgia como redutor de metais
    - 5.1.8.10. Cosméticos na confecção de sabonetes
    - 5.1.8.11. Material para cremes para a pele
    - 5.1.8.12. Aditivos terapêuticos para banho
    - 5.1.8.13. Tintas e corantes
    - 5.1.8.14. Tintas industriais
    - 5.1.8.15. Produção de energia
    - 5.1.8.16. Aditivo para a produção de pellets
- 5.1.9. Biochar para uso Medicinal
  - 5.1.9.1. Medicação para desintoxicação
  - 5.1.9.2. Transportador de princípios ativos farmacêuticos
  - 5.1.9.3. Cataplasma para picadas de insetos

- 5.1.10. Utilização Biochar no setor têxtil
  - 5.1.10.1. Aditivo de tecido para roupas funcionais
  - 5.1.10.2. Isolamento térmico para roupas funcionais
  - 5.1.10.3. Desodorante para sapatos
- 5.1.11. Utilização Biochar no Bem-estar
  - 5.1.11.1. Enchimento para colchões e travesseiros
  - 5.1.11.2. Escudo contra radiação eletromagnética em fornos de micro-ondas
- 5.1.11. Utilização Biochar na alimentação
  - 5.1.11.1. Conservação de alimentos
- 5.2. Cadeia de suprimentos e benefícios do Biochar
  - 5.2.1. Benefícios e demanda de Biochar
  - 5.2.2. Benefícios privados: Melhoria da produtividade agrícola e do funcionamento do solo
    - 5.2.2.1. PH do solo e capacidade de troca catiônica
    - 5.2.2.2. Fornecimento e retenção de nutrientes
    - 5.2.2.3. Fornecimento de nutrientes
    - 5.2.2.4. Retenção de nutrientes
    - 5.2.2.5. Ciclagem de nutrientes
    - 5.2.2.6. Co-compostagem; benefícios para a produção de composto
    - 5.2.2.7. Melhorar a retenção de água e a capacidade de retenção de água
  - 5.2.3. Benefícios sociais: Mitigação das alterações climáticas
    - 5.2.3.1. Tecnologia potencial de armazenamento de carbono
    - 5.2.3.2. Mudanças no uso do solo e compensações de combustíveis fósseis
    - 5.2.3.3. Desafios na obtenção dos benefícios do biochar
  - 5.2.4. Análise de oferta
    - 5.2.4.1. Custos principais elementos da cadeia de abastecimento da pirólise
    - 5.2.4.2. Aquisição de matéria-prima
    - 5.2.4.3. Transporte de matéria-prima
    - 5.2.4.4. Pré-tratamento da matéria-prima
    - 5.2.4.5. Custo da pirólise — construção e operação
    - 5.2.4.6. Pirólise simples
    - 5.2.4.7. Pirólise avançada
    - 5.2.4.8. Estado atual da indústria do biochar
  - 5.2.5. Futuro do Biochar

- 5.2.5.1. Análise biorregional e correspondência espacial
- 5.2.5.2. Integração do biochar com a gestão florestal
- 5.2.5.3. Investimento público, extensão e educação
- 5.2.5.4. Integração do biochar com iniciativas de saúde do solo
- 5.2.5.5. Testes e padronização
- 5.3. Mercado de Carbono
  - 5.3.1. Mercado Regulado
  - 5.3.2. Mercado Voluntário
  - 5.3.3. Tipos de créditos de carbono
  - 5.3.4. Estruturas operacionais do mercado
  - 5.3.5. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
  - 5.3.6. Características das Reduções Certificadas de Emissão
  - 5.3.7. Geração de Crédito de Carbono
  - 5.3.8. Metodologia utilizada
  - 5.3.9. Estimativa de Emissões Reduzidas e Absorções de CO<sub>2</sub>
  - 5.3.10. Geração de créditos de carbono
  - 5.3.11. Teor de carbono total
  - 5.3.12. Emissão de CO<sub>2</sub>
  - 5.3.13.. Biochar Eucalipto e Mecanismo de Mercado de Carbono
    - 5.3.13.1. Biochar: Uma Tecnologia de Emissões Negativas
    - 5.3.13.2. Sequestro de carbono
    - 5.3.13.3. Uso do biochar antes do seu armazenamento permanente no reservatório de carbono do solo
    - 5.3.13.4. Mercado de remoção de carbono
    - 5.3.13.5. Estudos de caso e projetos
    - 5.3.13.6. Conclusões

BRASIL BIOMASSA CONSULTORIA ENGENHARIA TECNOLOGIA.....350

Livro Biochar Biomassa Palha e Bagaço da Cana-de-açúcar  
Catalogação na Fonte Brasil.

Brasil Biomassa e Energia Renovável. Curitiba. Paraná. 2025

Conteúdo: 1. Análise do Potencial e de Disponibilidade Biomassa da Palha e do Bagaço da Cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de Biochar no Brasil 2. Projeções de Produção de Biochar da Cana-de-açúcar. 3. Biochar para Sequestro de Carbono, Fertilizante Ecológico e para Agricultura Regenerativa 4. Tecnologia Industrial de Pirólise Palha e Bagaço da Cana-de-açúcar para produção Biochar, bio-óleo, gás sintético, extrato pirolenhoso e vinagre de madeira 5. Análise Mercado de Produção e Consumo de Biochar. 6. Aproveitamento Sustentável (bioeconomia e economia circular) dos resíduos da biomassa do Cana-de-açúcar. 7. Requisitos Ambientais, Certificações e Permissões do biochar. 8. Impacto e Projeções de Uso e Consumo de Biochar do Cana-de-açúcar. 9. Certificações Internacionais do Biochar 10. Biochar da Biomassa da Cana-de-açúcar e Crédito de Carbono.

II. Título. CDU 621.3(81)"2030" : 338.28 CDU 620.95(81) CDD333.95 (1ed.)

Todos os direitos reservados a Brasil Biomassa e Energia Renovável

Copyright by Celso Marcelo de Oliveira

Tradução e reprodução proibidas sem a autorização expressa do autor.

Nenhuma parte deste estudo pode ser reproduzida ou transmitida de qualquer forma ou meio, incluindo fotocópia, gravação ou informação, ou por meio eletrônico, sem a permissão ou autorização por escrito do autor. Lei 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Edição eletrônica no Brasil e Portugal em versão eletrônica. Proibida a reprodução com ou sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio impresso e eletrônico

© 2024 ABIB Brasil Biomassa e Energia Renovável Edição 2025 Total 480 páginas.

Livro Biochar Biomassa Palha e Bagaço da Cana-de-açúcar

Edição 2025 Total de páginas

Valor do investimento para aquisição do Livro

PAGAMENTO PIX DEPÓSITO

Banco Itaú Agência:4015 Conta corrente: 99054-4 Chave Pix :(41) 99817-3023

Brasil Biomassa e Energia Renovável

CONFIRMAÇÃO PAGAMENTO WHATS APP (41) 998173023 ou FONE (41) 996473481.



## PREFÁCIO

Em nome da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável e dos numerosos colaboradores deste estudo técnico de apoio para as empresas com interesse na produção de Biochar, tenho o prazer de apresentar o Livro Biochar Biomassa Cana-de-açúcar que tem por objetivo uma avaliação pormenorizada do setor de biochar um produto sustentável para o setor agrícola do Brasil.

O desafio do setor agroindustrial vai exigir uma enorme quantidade de adubos e fertilizantes e o biochar pode ser uma solução ao setor. O biochar é uma solução sustentável e multifuncional para mudanças climáticas pode ajudar a construir resiliência em comunidades locais de alto risco e sensíveis ao impacto das mudanças climáticas. Em face do aumento das temperaturas globais, eventos climáticos extremos e a necessidade resultante de agricultura adaptada, o biochar oferece uma solução interseccional para questões em torno da degradação do solo, remoção de carbono, desafios de uso da terra, insegurança alimentar e desenvolvimento econômico.

Desde 2022, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) defende que as tecnologias de remoção de dióxido de carbono (CDR) são um complemento necessário às reduções de emissões para atingir um futuro líquido zero e limitar o aquecimento global a 2°C ou menos. O biochar é uma das tecnologias de CDR reconhecidas pelo IPCC e também é uma das soluções mais acessíveis e prontas para o mercado. A tecnologia de remoção de carbono do biochar foi responsável por 94% dos créditos de remoção de carbono entregues em 2023.

Nosso Livro avalia que os sistemas de produção de biochar podem gerar energia e, quando apropriado, devem recuperar e usar o calor do processamento, bem como utilizar subprodutos de gás de síntese e bio-óleo. Os sistemas de biochar proporcionam um uso na agricultura e pecuária, reduzindo a prática de queima de plantações, oferecem desenvolvimento econômico com recursos que, de outra forma, seriam desperdiçados e ajudam a melhorar a produtividade agrícola por meio da melhoria da saúde do solo e da retenção de água. Uma questão a ser abordada no Livro Biomassa Cana-de-açúcar é a quantidade de matéria-prima que encontra-se disponível para a produção de biochar com acesso imediato no Brasil. Assim sendo, o estudo pretende abordar uma questão fundamental de disponibilidade de biomassa para a produção de biochar em todo o território nacional. As quantidades reais de produção e de disponibilidade dependerá da demanda do mercado e dos avanços técnicos e da política de produção de biochar e da geração e dos créditos de carbono.

Este Livro é o esforço dos profissionais da Brasil Biomassa. Trabalhamos com informações científicas confiáveis e este Livro é o primeiro documento para ajudar as empresas e os profissionais para a produção de biochar.

Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável







# INTRODUÇÃO



i. Declarações Prospectivas . Este Livro Biochar Biomassa Cana-de-açúcar contém certas declarações prospectivas que dizem respeito a eventos futuros ou desempenho futuro do mercado de biochar. Estas declarações prospectivas são baseadas em previsões e estudos técnicos e dados de mercado das principais entidades internacionais sobre as expectativas de desenvolvimento e de expansão do mercado de produção e de consumo de biochar.

Objetiva-se com o Livro Biochar Biomassa Cana-de-açúcar em gerar expectativas dentro de uma tendência de mercado de biochar e os outros produtos. Se as expectativas geradas e premissas revelarem-se incorretas por mudança de fatores e de mercado, então os resultados reais podem diferir materialmente da informação prospectiva contida neste documento. Além disso, declarações prospectivas, por sua natureza, envolvem riscos e incertezas que poderiam causar os resultados reais difiram materialmente daqueles contemplados. Assim utilizamos as declarações prospectivas de informações como apenas uma advertência no desenvolvimento do Livro..

DIRETORIA EXECUTIVA

ii. Exposição Fundamental Biochar Biomassa Cana-de-açúcar. A biomassa pode ser utilizada como fonte de geração de energia e para a produção de biochar. Ela é constituída principalmente de substâncias de origem orgânica, ou seja, de animais e vegetais. Portanto, a biomassa vegetal (como o Cana-de-açúcar) pode ser considerada um recurso natural renovável, enquanto que os combustíveis fósseis não se renovam a curto prazo. A combustão da biomassa pode ser provida de lenha, resíduos florestais, resíduos agrícolas como a palha e o bagaço da Cana-de-açúcar, entre outras matérias orgânicas. O Brasil é um país naturalmente rico em biomassa sendo este utilizado para produção de energia, combustíveis, produtos alimentícios e materiais. A biomassa feita com resíduo agroindustrial é uma ótima alternativa de destino para o resíduo e evita problemas econômicos e ambientais.

A gestão eficaz de resíduos agroindustriais desempenha um papel fundamental na mitigação de várias formas de poluição. O bagaço de cana-de-açúcar, um resíduo substancial de biomassa gerado na indústria açucareira após a extração do caldo de cana, necessita de manuseio sustentável. Embora algumas usinas de açúcar utilizem bagaço de cana úmido para abastecer o processo de moagem, uma porção significativa permanece estocada e é frequentemente incinerada em processo de co-geração de energia.

.Reconhecendo a importância de abordar esta questão, desenvolvemos o primeiro Livro de aproveitamento da palha e do bagaço da cana-de-açúcar para a produção de biochar. A conversão de resíduos da cana-de-açúcar em biochar como um meio eficiente de aproveitar a energia após a desvolatilização da biomassa.

Há interesse científico e comercial na transformação de biomassa da cana-de-açúcar em produtos de valor agregado, incluindo biochar, biogás e biocombustível. Este Livro investiga vários processos de pirólise aplicáveis para converter a palha e o bagaço de cana-de-açúcar em materiais de carvão ativado (biochar), mostrando seu potencial para diversas aplicações em linha com os interesses atuais.



A cana-de-açúcar, uma importante cultura comercial em escala global, desempenha um papel crucial no fornecimento não apenas de açúcar, mas também de etanol. Os subprodutos da cana-de-açúcar encontram utilidade como ração animal em vários países. O cultivo da cana-de-açúcar se expandiu para regiões com climas quentes em todo o mundo.

O maior contribuinte para a produção global de cana-de-açúcar é o continente americano, incluindo países como Brasil, México, EUA e outros, respondendo por cerca de 51% da produção total, seguido de perto pela Ásia (41,6%), África (5%) e Oceania (1,7%) .

Os principais países na produção de cana-de-açúcar são Brasil, Índia, China, Tailândia e Paquistão. Essas cinco nações estão na vanguarda quando se trata de cultivar e colher cana-de-açúcar.

Nas últimas décadas, houve um aumento notável na produção de cana-de-açúcar, impulsionado pela crescente demanda por açúcar, etanol e açúcar mascavo derivados dessa cultura versátil. Conseqüentemente, a indústria açucareira gera uma quantidade significativa de resíduos agrícolas.

Esses resíduos assumem principalmente a forma de palha que ficam no campo e do bagaço, que permanece após a cana-de-açúcar passar por processamento em fábricas para extrair sacarose ou álcool. Sem a utilização adequada, o bagaço é comumente descartado como resíduo sólido ou utilizado como fonte de combustível para o processo de moagem. Para cada tonelada de cana-de-açúcar, aproximadamente 280 kg de bagaço úmido são produzidos, destacando a quantidade substancial desse resíduo. A biomassa do bagaço da cana-de-açúcar tem o potencial de ser transformada em energia, materiais e produtos químicos finos

Uma extensa pesquisa revelou uma via promissora para melhorar a recuperação de energia por meio da conversão de resíduos agrícolas em biochar, que é um produto sólido. Essa transformação é obtida empregando técnicas termoquímicas e bioquímicas após o processo de desvolatilização da biomassa.

Esses métodos inovadores oferecem uma oportunidade atraente para aproveitar maior potencial energético de sobras agrícolas, abrindo caminho para a utilização sustentável e eficiente de recursos. Por meio do processo termoquímico de pirólise, a biomassa da cana-de-açúcar sofre decomposição térmica em temperaturas superiores a 300 °C em um ambiente livre de oxigênio.

Esse processo leva à produção de biochar, um material sólido caracterizado por sua composição rica em carbono. Além disso, os componentes voláteis podem condensar parcialmente em uma forma líquida conhecida como bio-óleo. Junto com essas saídas, gases de combustão contendo CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> também são gerados.

O bagaço da cana-de-açúcar tem potencial para produzir uma variedade de materiais diversos, incluindo biodiesel, biocompostos e biochar. Os biochars têm algumas propriedades físico-químicas importantes, como maior área de superfície e porosidade, baixa densidade aparente, maior capacidade de troca catiônica (CTC), pH neutro a alto e maior teor de carbono.

Essas características podem ser efetivamente utilizadas em vários campos, como adsorção, como material de construção, automóvel, transporte, fabricação de móveis, aplicações domésticas, cimento e indústria de plástico.

A versatilidade do bagaço de cana-de-açúcar abre inúmeras possibilidades para sua aplicação em vários setores, fornecendo alternativas sustentáveis e ecologicamente corretas em várias indústrias.

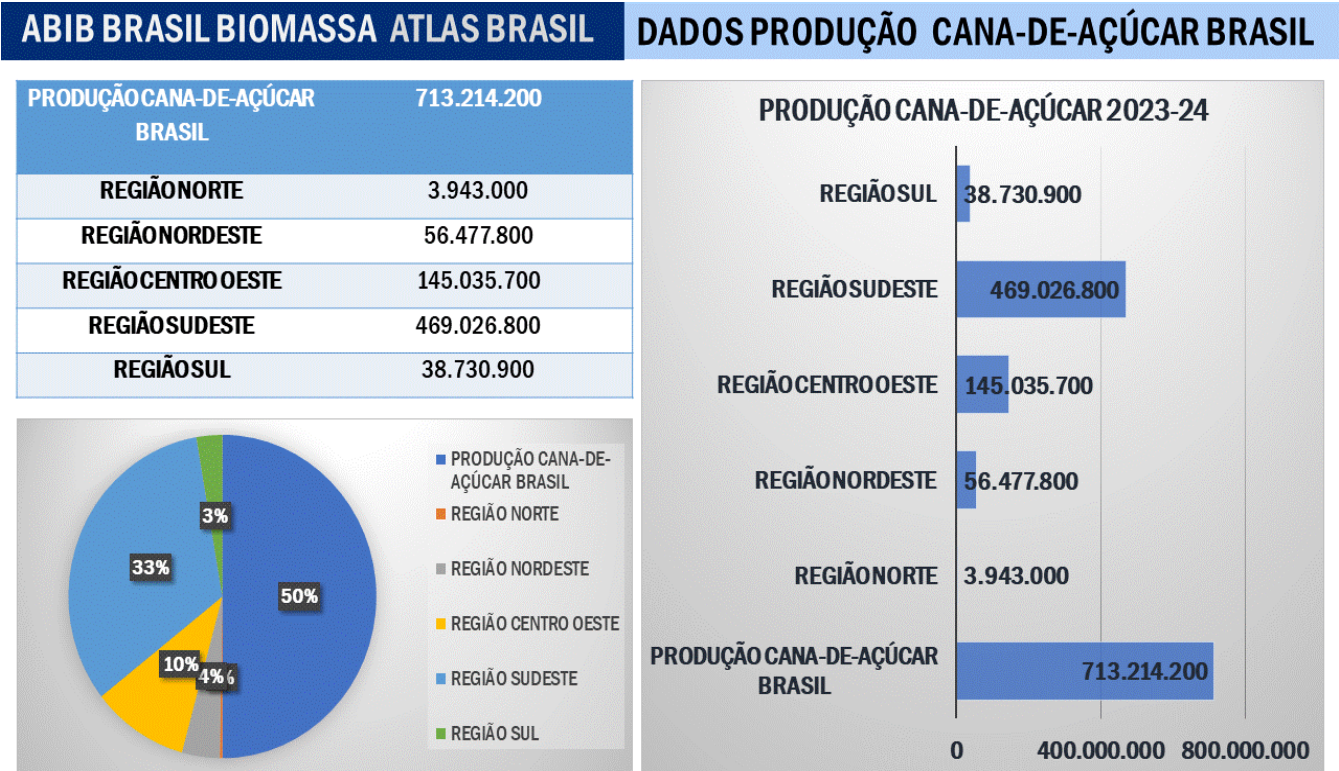
Coletivamente, como uma agricultura regenerativa e como uma fonte renovável de energia, a Cana-de-açúcar representa uma cultura maravilhosa para a produção de Biochar. Tem necessidades mínimas de nutrientes, é relativamente rápido de se estabelecer.. Devido a essas características e principalmente graças ao seu rápido crescimento em relação às plantas lenhosas, a Cana-de-açúcar é uma fonte ótima para produzir biochar de forma mais eficiente e ecologicamente correta do que a madeira. Os rejeitos agrícolas da Cana-de-açúcar como podem ser utilizados para a produção de biochar.

O Cana-de-açúcar é importante no mundo. É uma fonte de vários produtos industriais tais como açúcar, e etanol. No Brasil é um dos cultivos mais expressivos..

É de consciência que grande parte da biomassa gerada pelo setor da Cana-de-açúcar como a palha é descartada no campo, sem o devido aproveitamento da energia contida na mesma. Portanto, a caracterização energética é um passo importante no aproveitamento desta biomassa.

O processamento industrial com a finalidade de utilizar a Cana-de-açúcar, gera resíduo composto por palha e bagaço.

Conforme o Atlas de Biomassa da Cana-de-açúcar desenvolvido pela Associação Brasileira de Indústrias da Biomassa – ABIB e a Brasil Biomassa no ano de 2023 sobre a produção e dos quantitativos de resíduos da cana-de-açúcar:

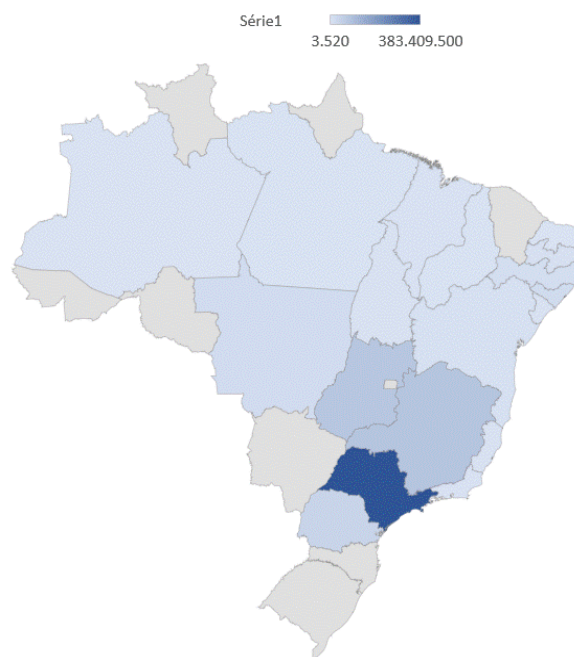




## ABIB BRASIL BIOMASSA ATLAS BRASIL

ESTADO	PRODUÇÃO SAFRA 2023/24 (TON/ANO)
AMAZONAS	304.000
PARA	1.276.000
TOCANTINS	2.363.000
MARANHÃO	2.078.200
PIAUI	1.302.000
RIO GRANDE NORTE	3.519.600
PARAIBA	7.605.700
PERNAMBUCO	13.810.200
ALAGOAS	19.675.800
SERGIPE	2.535.900
BAHIA	5.950.500
MATO GROSSO	17.663.300
MATO GROSSO SUL	50.771.700
GOIÁS	76.600.600
MINAS GERAIS	81.376.500
ESPIRITO SANTO	2.815.600
RIO DE JANEIRO	1.425.300
SÃO PAULO	383.409.500
PARANÁ	38.730.900

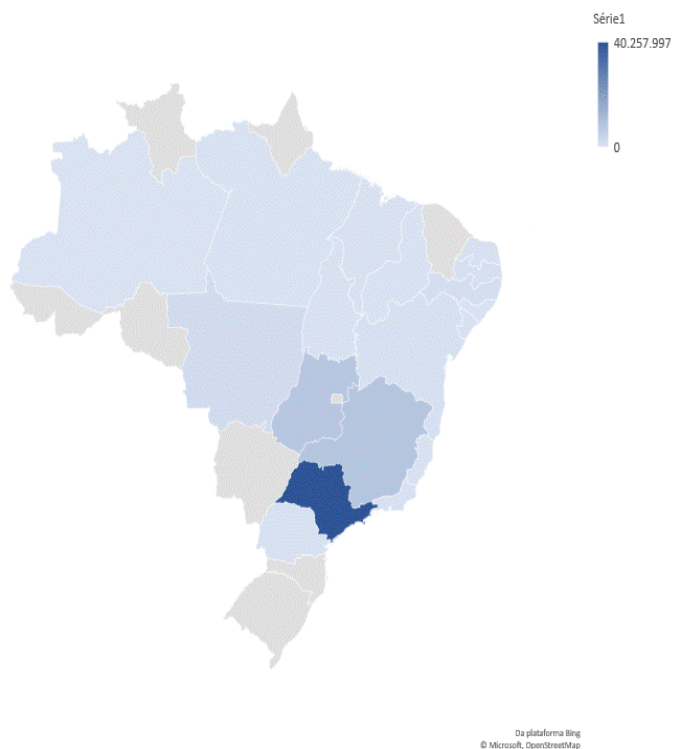
## DADOS PRODUÇÃO CANA-DE-AÇÚCAR BRASIL



## ABIB BRASIL BIOMASSA ATLAS BRASIL

ESTADO	QUANTITATIVO DISPONIBILIDADE BAGAÇO CANA-DE-AÇÚCAR (TON./ANO)
AMAZONAS	31.920
PARA	133.980
TOCANTINS	250.215
MARANHÃO	218.211
PIAUI	136.710
RIO GRANDE NORTE	369.558
PARAIBA	819.598
PERNAMBUCO	1.450.071
ALAGOAS	1.960.959
SERGIPE	266.269
BAHIA	624.802
MATO GROSSO	1.848.346
MATO GROSSO SUL	5.331.028
GOIÁS	8.043.063
MINAS GERAIS	8.544.532
ESPIRITO SANTO	295.638
RIO DE JANEIRO	149.656
SÃO PAULO	40.257.997
PARANÁ	406.674

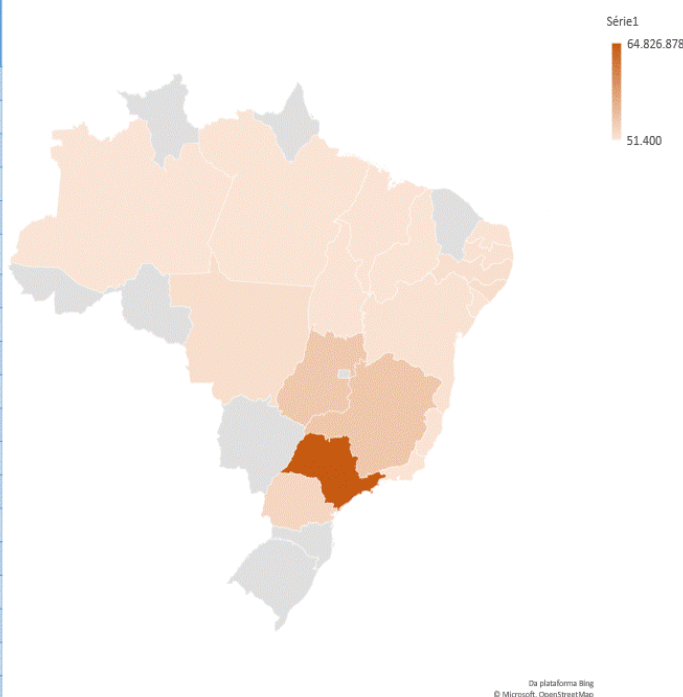
## POTENCIAL BIOMASSA BAGAÇO CANA BRASIL





**ABIB BRASIL BIOMASSA ATLAS BRASIL****POTENCIAL BIOMASSA PALHA CANA BRASIL**

ESTADO	QUANTITATIVO DISPONIBILIDADE PALHA CANA-DE-AÇÚCAR (TON./ANO)
AMAZONAS	51.400
PARA	215.746
TOCANTINS	399.536
MARANHÃO	351.382
PIAUI	220.142
RIO GRANDE NORTE	595.093
PARAIBA	1.285.971
PERNAMBUCO	2.335.028
ALAGOAS	3.326.784
SERGIPE	428.769
BAHIA	1.006.110
MATO GROSSO	2.986.510
MATO GROSSO SUL	8.584.479
GOIÁS	12.951.629
MINAS GERAIS	13.759.138
ESPIRITO SANTO	476.061
RIO DE JANEIRO	240.989
SÃO PAULO	64.826.878
PARANÁ	6.548.620



Os resíduos do processamento do Cana-de-açúcar constituídos principalmente da palha e do bagaço . Houve também uma similaridade na geração do resíduo do Cana-de-açúcar nas regiões Sul e Centro-Oeste com participação de 37% e 31%, respectivamente.

Entretanto, no processamento de Cana-de-açúcar , existe a etapa de separação do caldo e do bagaço. Portanto, nesta etapa seria possível em utilizar o bagaço (que não seria utilizado na co-geração) para posterior produção de biochar para a própria indústria sucroenergética.

Os resíduos como a palha da atividade de produção da Cana-de-açúcar, podem ser utilizados também como fonte de produção de biochar. Contudo, a caracterização para a utilização do processo termoquímico é fundamental quando se lida com resíduos a fim de compreender o comportamento da conversão e eficiência ao utilizar os resíduos como combustível. Dessa forma, levando em consideração o reaproveitamento do resíduo da cana-de-açúcar o que contribui tanto à indústria quanto ao meio ambiente, o desenvolvimento deste Livro alavancará a análise do potencial de aproveitamento do bagaço e da palha do Cana-de-açúcar como fonte de matéria-prima para a produção de biochar.

O biochar de bagaço de cana-de-açúcar apresenta uma ampla gama de aplicações, servindo como um adsorvente, resina de troca iônica, briquetes, cerâmica, concreto, catalisador e até mesmo auxiliando na captura de CO<sub>2</sub>, bem como na produção de biocombustível. Essa versatilidade posiciona o biochar como um recurso promissor para atender às necessidades globais de energia, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade ambiental e econômica.

Este Livro se aprofunda em várias técnicas de pirólise para a produção de biochar, explorando sua utilidade na correção do solo, purificação de água e ar e catálise. Características físicas e de superfície, incluindo área de superfície e grupos funcionais, influenciam significativamente sua adequação para diversas aplicações, levando ao uso de técnicas de ativação para aprimoramento.

A eficácia do biochar na remoção de poluentes de soluções aquosas supera métodos alternativos, tornando-o uma solução escalável para tratamento de águas residuais. Embora as histórias de sucesso sejam abundantes, a adoção generalizada aguarda análises de ciclo de vida e avaliações de custo aprimoradas, fortalecendo o caso do biochar da palha e do bagaço de cana-de-açúcar como um material sustentável para o desenvolvimento de novos produtos.

A utilização indiscriminada dos recursos naturais, visando suprir de imediato a população mundial, acaba gerando graves problemas ambientais, como a poluição de mananciais e dos solos, devido ao uso dos fertilizantes e agrotóxicos. Além dos fatores de degradação antrópicos, o Brasil possui solos que sofrem também com alta acidez, fixação de fósforo e decomposição rápida da matéria orgânica..

Para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade na produção, diversos manejos são utilizados no solo. Porém o uso excessivo destes pode gerar vários problemas, como a salinização e, posteriormente, desertificação.

Entretanto, várias práticas alternativas de manejo de solo estão sendo utilizadas em busca de otimizar a produção em quantidade e qualidade, sem o uso de fertilizantes, tais como compostagem, adubação verde, fertilizantes naturais e a adição de biochar (biomassa carbonizada através da pirólise). Por ser advindo de uma energia limpa, o biochar, que é um material rico em carbono estável, se apresenta como uma alternativa viável para o melhoramento de características químicas, físicas e biológicas dos solos, como capacidade de retenção de água, biorremediação de água e solos contaminados por metais, além de mitigar a emissão de gases de efeito estufa em longo prazo.



Sabe-se que a possível quantidade de teor de carbono no biochar derivado de uma determinada planta depende diretamente de sua atividade metabólica (fotossíntese), por meio da qual ingere  $\text{CO}_2$  e libera oxigênio (> 30%) de volta para a atmosfera, reduzindo assim o aquecimento global.

Nesse sentido, devido à sua taxa de crescimento inigualável, a Cana-de-açúcar produz mais biomassa e captura mais carbono atmosférico por hectare do que qualquer outra cultura, removendo assim mais carbono do céu e adicionando-o ao solo.

Por meio da pirólise, até 50% do carbono pode ser transferido do tecido vegetal para o biochar, com os 50% restantes usados para produzir energia e combustíveis .

Comparado à composição da madeira, a fibra do Cana-de-açúcar tem diferentes orientações fibrilares cercadas por camadas estreitas e largas alternadas.



A parede celular secundária é composta principalmente de celulose e lignina, com ligação covalente ligando ácidos fenólicos de lignina a materiais polissacarídeos. Por várias razões, a Cana-de-açúcar é uma opção superior a outras biomassa para produção de biochar, incluindo resistência, respeito ao meio ambiente, resistência à água, custo, proteção do solo e contribuição para a qualidade do ar. Esses benefícios foram a força motriz por trás de vários usos para este material, incluindo purificação, absorvedores de ondas eletromagnéticas e purificadores de água.

Esses benefícios são influenciados pelos procedimentos de ativação e carbonização usados para fazer biochar. A biomassa da Cana-de-açúcar é torrada a uma temperatura constante para criar biochar ativado quando o biochar é exposto ao oxigênio usando o método de pirólise. Recentemente, os processos pirolíticos para produção de carvão vegetal ganharam atenção significativa.

Além de seu uso típico como combustível, novas aplicações surgiram no setor agrícola, onde atualmente é empregado para melhorar as propriedades físicas e químicas dos solos.



Esse processo rompe moléculas da biomassa e reorganiza as ligações químicas para formar o biochar, como também outros compostos concentrados em carbono, por exemplo os bio-óleos, extrato pirolenhoso e vinagre da madeira e gases de síntese que podem ser reaproveitados para fins energéticos. O biochar se diferencia do carvão vegetal principalmente devido à sua aplicação como corretivo de solos agrícolas capaz de aumentar a produtividade e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da biomassa que, de outra forma, se decomporia rapidamente (IPCC 2022).

O biocarvão (biochar, em inglês) é um produto sólido com elevada concentração de carbono, altamente estável e resistente à decomposição biológica. É obtido a partir da pirólise da biomassa Cana-de-açúcar um processo termoquímico caracterizado pelo aquecimento da matéria-prima a altas temperaturas na ausência de oxigênio.

A comunidade científica internacional, representada pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima), já constatou que medidas de mitigação das mudanças climáticas focadas apenas na redução de emissões de GEE não serão suficientes para conter o aquecimento global a níveis seguros para a sociedade (aumento de até 2,5 C da temperatura média global), implicando assim na necessidade da adoção de práticas de remoção de carbono, capazes de retirar efetivamente carbono da atmosfera.



O fluxo de carbono global pode ser caracterizado, de forma simples, em 3 principais atividades: emissão, que seria a liberação de carbono na atmosfera, principalmente através de atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis; redução, que envolve a diminuição das emissões de carbono na atmosfera por meio de práticas mais sustentáveis, como o uso de energia renovável; e remoção, que consiste em retirar carbono da atmosfera.

Nos últimos anos, uma extensa pesquisa foi conduzida para explorar várias técnicas, incluindo processos termoquímicos, químicos e biológicos, para a conversão de biomassa em biocombustíveis, biochar e gás de síntese. Técnicas termoquímicas, como pirólise, gaseificação, carbonização hidrotérmica, torrefação e carbonização instantânea, surgiram como métodos proeminentes para a produção de biochar.

Entre estes, a pirólise é comumente empregada para criar biochar a partir de biomassa de palha e bagaço de cana-de-açúcar, enquanto a carbonização hidrotérmica é utilizada para a produção de hidrochar. Além dos processos termoquímicos, outras técnicas como hidrólise, destilação, fermentação e digestão anaeróbica desempenham papéis vitais na produção de biochar, bio-óleo e gás de síntese. Esta visão geral abrangente destaca a gama diversificada de técnicas termoquímicas e processos complementares envolvidos na conversão de biomassa para a geração de produtos valiosos de biochar, bio-óleo e gás de síntese.

Ao lidar com resíduos agrícolas orgânicos, como a cana-de-açúcar, a pirólise é o método preferido para a produção de biochar. É essencial empregar técnicas de fabricação adequadas adaptadas à biomassa específica utilizada, ao mesmo tempo em que otimiza parâmetros de processo como temperatura e tempo de residência para atingir o maior rendimento possível de biochar. A natureza do biochar derivado da biomassa vegetal pode variar dependendo das condições específicas, pois o processo envolve a perda gradual de peso da biomassa. Inicialmente, a perda de peso ocorre devido à evaporação da água em torno de 100 °C, seguida pela degradação de fibras como celulose e hemicelulose em temperaturas superiores a 220 °C.



Entre os diferentes processos de pirólise, a pirólise rápida resulta na menor produção de biochar, enquanto a pirólise lenta produz a maior quantidade. O biochar é composto principalmente de carbono, normalmente variando de 65 a 90%, juntamente com oxigênio e produtos químicos aromáticos que contribuem para sua resistência contra a degradação biológica.

Comparado ao bagaço de cana-de-açúcar, o biochar exibe níveis mais baixos de hidrogênio (0,5–4,2% em peso), pois as ligações mais fracas entre seus elementos são quebradas durante a pirólise, enquanto o bagaço normalmente contém 5–7% em peso de hidrogênio. Da mesma forma, o teor de oxigênio segue uma tendência semelhante, com o biochar variando de 10 a 45% em peso, em comparação com 27–56% em peso para o bagaço de cana-de-açúcar.

Em termos de teor de carbono, o biochar supera o bagaço, com o biochar contendo até 82% em peso de carbono, enquanto o bagaço pode ter até 58% em peso de carbono. Biochar de alta qualidade é normalmente definido como tendo um teor de carbono de pelo menos 75% em peso. Além disso, os níveis de nitrogênio no biochar são comparáveis aos encontrados no bagaço, com ambos variando de 1,1 a 1,3% em peso. Essas maiores concentrações de carbono e nitrogênio no biochar impactam significativamente a qualidade do solo ao fornecer nutrientes, aumentar a produtividade das culturas em várias colheitas e melhorar as capacidades de retenção de água.

Os resultados da análise aproximada demonstram que a produção de biochar é acompanhada por um aumento nos valores de carbono fixo e cinzas, bem como uma diminuição nos teores de matéria volátil durante o processo de decomposição da biomassa. Os altos níveis de carbono no biochar estão correlacionados com as tendências elevadas no carbono fixo. Além disso, devido à presença de componentes minerais remanescentes após a carbonização, o biochar exibe níveis mais altos de cinzas (até 23% em peso) em comparação ao bagaço (1–6%).

Por fim, em contraste com o bagaço, que normalmente contém níveis de matéria volátil de até 85% em peso, o biochar exibe um teor reduzido de matéria volátil de até 57% em peso.

Devido ao seu alto teor de carbono fixo, o biochar de bagaço tem maior HHV (maior poder calorífico) (22–36 MJ/kg) do que o bagaço (16–19 MJ/kg) e o bio-óleo (23 MJ/kg), sugerindo seu potencial de queima.

A preparação de biochar à base de bagaço de cana-de-açúcar usando processos termoquímicos atraiu interesse significativo entre empreendedores, usineiros e investidores devido às suas aplicações ambientais versáteis. A escolha da temperatura de pirólise e do tipo de biomassa pode determinar a eficácia do biochar na remoção de toxinas e poluentes do solo e da água. O biochar produzido em temperaturas de pirólise mais altas, relatado como tendo rico conteúdo de carbono, exibe propriedades aprimoradas, como porosidade, área de superfície e pH com conteúdo reduzido de carbono dissolvido.

Eles também são hidrofóbicos por natureza, permitindo que removam efetivamente poluentes orgânicos. Por outro lado, o biochar produzido em temperaturas mais baixas contém níveis mais altos de carbono orgânico dissolvido e grupos funcionais contendo oxigênio. Esses materiais, sendo menos porosos, são mais adequados para a remediação de poluentes inorgânicos. A capacidade de remoção do biochar é ainda mais influenciada por fatores como duração de residência e pH. Além da remoção de poluentes, o biochar encontra diversas aplicações, como armazenamento de energia, correção de solo para compostagem, sequestro de carbono, catalisadores e no tratamento de águas residuais.

As aplicações atuais do biochar concentram-se principalmente na sua eficácia na remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos do solo e dos sistemas de água. Quando aplicado ao solo, o biochar atua como um agente de ligação para contaminantes orgânicos pré-existentes. Exemplos de contaminantes orgânicos incluem corantes catiônicos como azul de metileno, rodamina e violeta de metileno, bem como produtos químicos industriais como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), que abrangem fenantreno, catecol, pireno, naftaleno e antraceno. Além disso, os contaminantes orgânicos podem incluir antibióticos e medicamentos como paracetamol, tetraciclina, diclofenaco, naproxeno e ibuprofeno;

Por outro lado, poluentes inorgânicos, como metais, incluindo cobre, zinco, cádmio, chumbo, níquel e mercúrio, representam ameaças significativas à saúde humana e ao meio ambiente devido à sua toxicidade e natureza não biodegradável, particularmente em altas concentrações. Metais pesados são particularmente prejudiciais e podem ter efeitos cancerígenos. Esses contaminantes inorgânicos são frequentemente liberados no ambiente por meio de efluentes industriais ou águas residuais municipais.

Avanços recentes na utilização de biochar à base de palha e bagaço de cana-de-açúcar demonstraram sua eficácia na adsorção de cloridrato de ciprofloxacino (CPF). O processo envolveu a conversão de bagaço de cana-de-açúcar em carbono por meio de carbonização hidrotérmica (HTC), seguida de ativação usando impregnação alcalina em um ambiente de gás inerte.

A ativação foi conduzida em altas temperaturas, pois o HTC normalmente resulta em desenvolvimento limitado de área de superfície e porosidade. Caracterizações abrangentes foram realizadas para investigar as propriedades físicas, químicas, térmicas, de morfologia de superfície e de área de superfície do material resultante.

O biochar derivado do HTC exibiu uma estrutura esférica, com grupos funcionais hidrofóbicos no núcleo interno e grupos funcionais hidrofílicos na superfície externa. O material apresentou estruturas menos porosas, levando a uma área de superfície reduzida. No entanto, esses grupos funcionais e o aumento da porosidade facilitaram a adsorção do poluente alvo por meio de mecanismos de adsorção de superfície/química.

Embora a força dos grupos funcionais tenha diminuído após a ativação, o uso de KOH levou à criação de uma superfície áspera nas esferas de carvão ativado (ACSs), o que aumentou a remoção de CPF da água. Experimentos de adsorção em lote demonstraram que o CPF foi efetivamente removido da água pelo biochar, seguindo uma cinética de pseudo-segunda ordem com um modo heterogêneo multicamadas. A capacidade máxima de adsorção de ACS para CPF foi determinada como sendo 110,008 mg/g.



Em um estudo semelhante, o biochar derivado de HTC foi quimicamente ativado com NaOH em uma atmosfera inerte, e sua capacidade de adsorver sulfametoxazol (SMX) da água foi investigada. O biochar sintetizado exibiu abundantes grupos hidrofóbicos e hidrofílicos tanto interna quanto externamente dentro de sua estrutura semelhante a uma esfera. Os mecanismos primários para extrair SMX da água envolveram ligação de hidrogênio assistida por carga, preenchimento de poros de adsorbato e interações  $\pi$ - $\pi$  com a superfície heterogênea do sorvente. O efeito de ionização influenciado pelo pH facilitou essas interações. Os resultados indicam que o biochar ativado é um adsorvente eficaz com forte afinidade para remover contaminantes da água, ao mesmo tempo em que é ambientalmente aceitável.

Em um estudo do biochar derivado do bagaço de cana-de-açúcar processado anaerobicamente demonstrou capacidade de adsorver íons de chumbo inorgânicos. Dois tipos de biochar de bagaço de cana-de-açúcar, nomeadamente biochar bruto (BC) e biochar digerido anaerobicamente (DBC), foram relatados quanto à sua eficácia na remoção de chumbo da água. Estudos de sorção em lote foram conduzidos, comparando as capacidades de ligação de chumbo do BC, DBC e carvão ativado comercial (AC).

Esses resultados indicaram que nem o DBC nem o BC exibiram o mesmo nível de eficiência de remoção de chumbo que o AC. O DBC exibiu uma capacidade máxima de sorção de chumbo significativamente maior (653,9 mmol/kg) em comparação ao BC (31,3 mmol/kg), com a capacidade do DBC sendo aproximadamente o dobro da do AC (395,3 mmol/kg). Embora a adsorção de superfície tenha sido identificada como o mecanismo primário de retenção de chumbo por BC, a sorção de chumbo por DBC ocorreu por meio de um mecanismo de precipitação, que foi confirmado por meio de técnicas como difração de raios X (XRD) e microscopia eletrônica de varredura.

Em outro estudo comparativo envolvendo biochar de bagaço de cana-de-açúcar e biochar de casca de laranja, a eficiência do biochar na remoção de Pb(II) de soluções aquosas foi examinada.

As capacidades de sorção de SC-BC (biochar de bagaço de cana-de-açúcar) e OP-BC (biochar de casca de laranja) foram avaliadas, com SC-BC exibindo uma capacidade de remoção significativamente maior de 86,96 mg/g em comparação com OP-BC (27,86 mg/g). Essa maior capacidade de sorção de SC-BC foi atribuída à sua maior área de superfície em comparação com OP-BC. Além disso, experimentos de adsorção em lote foram conduzidos para investigar os efeitos de vários parâmetros, como pH, duração do contato, concentração inicial de íons Pb(II) e temperatura no processo de sorção e otimização da eficiência de remoção de Pb..

A remoção de íons Cr(VI) foi investigada usando biochar magnético preparado a partir de bagaço de cana-de-açúcar e licor de resíduos de decapagem de aço em várias concentrações. A presença de Fe(II) no biochar magnético desempenhou um papel crucial na remoção de Cr(VI), particularmente quando 1,10-fenantrolina foi usada como reagente.

Além disso, diferentes óxidos de ferro, como FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, foram empregados para remover Cr(VI), destacando a contribuição significativa de FeO no biochar magnético. As propriedades físico-químicas do biochar magnético e sua eficiência na remoção de Cr(VI) foram influenciadas por mudanças no teor de ferro.

Em outro estudo relacionado, um novo biochar magnético de bagaço (BMBC) consistindo de biochar de bagaço e óxido de ferro magnético foi utilizado para a remoção de Cr(VI) de soluções aquosas. A abordagem sugerida ofereceu vantagens como baixo custo e excelente reprodutibilidade da aplicação de BMBC. Experimentos de adsorção em lote foram conduzidos para caracterizar BMBC antes e depois da adsorção de Cr(VI) e para investigar os comportamentos e mecanismos de remoção de Cr(VI) por BMBC. Vários parâmetros, incluindo força iônica, dosagem de BMBC, pH, duração da adsorção, concentração inicial de íons Cr e íons coexistentes foram modificados.

Os principais componentes de BMBC foram encontrados como sendo Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> amorfos em biochar de bagaço.

A porcentagem máxima de remoção de Cr(VI) foi alcançada com uma dosagem de 0,20 g de BMBC em uma solução de 50 mL a pH 2. BMBC exibiu excelentes capacidades de adsorção para Cr(VI) em soluções aquosas. Comparado aos sorventes de biochar convencionais, BMBC mostrou uma capacidade máxima de adsorção de Cr(VI) de 29,08 mg/g a 25 °C. A dessorção de Cr(VI) usando uma solução de NaOH 0,2 mol/L resultou em uma capacidade de 8,21 mg/g. A eficiência de remoção de Cr(VI) permaneceu acima de 80,36% mesmo após três ciclos de reutilização.

O aumento do consumo global de energia levou a um aumento nas emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>. Para resolver isso, o biochar da palha e do bagaço de cana-de-açúcar surgiu como uma alternativa sustentável e de baixo custo para adsorção de CO<sub>2</sub>. A capacidade de absorção de CO<sub>2</sub> do adsorvente permaneceu estável e reproduzível ao longo de cinco ciclos de adsorção/dessorção de CO<sub>2</sub>, demonstrando sua forte estabilidade de adsorção.

Em um estudo comparativo entre biochar de bagaço de cana-de-açúcar e biochar de madeira de noqueira, observou-se que a maior adsorção de CO<sub>2</sub> ocorreu com biochar BG preparado a 600 °C, exibindo uma capacidade de 73,55 mg/g a 25 °C. Embora o HW600 tivesse uma área de superfície maior que o BG600, a curva de adsorção de CO<sub>2</sub> do HW600 mostrou uma tendência ligeiramente mais íngreme nas condições de adsorção de 25 °C e 75 °C. Esta pesquisa sugere que, além da área de superfície, as interações com grupos funcionais de superfície também podem influenciar a adsorção de CO<sub>2</sub> em biochars.

O biochar da Cana-de-açúcar, além de ser uma opção de remoção de carbono reconhecida cientificamente, também é uma solução baseada na natureza (NBS – nature based solution) que pode proporcionar diversos benefícios ambientais, além do sequestro de carbono.

Quando aplicado na agricultura, o biochar age como uma esponja de carbono que retém água e nutrientes, atuando como um condicionador de solo capaz de gerar ganhos de produtividade e redução no uso de fertilizantes.



Para o clima, além do biochar remover permanentemente carbono da atmosfera, ele pode gerar também redução das emissões de outros GEE do solo, principalmente o óxido nitroso [N<sub>2</sub>O] e metano [CH<sub>4</sub>] dos fertilizantes e da decomposição da matéria orgânica do solo. Uma vez que as emissões do setor agroindustrial são de difícil abatimento e representam mais de 30% das emissões globais, o biocarvão se mostra como uma alternativa promissora para mitigação das mudanças climáticas .

A palha da Cana-de-açúcar é um dos resíduos agrícolas submetidos à queima inadequada, o que cria poluição. Pode ser usada para a produção de tecnologias verdes para outras aplicações. A carbonização ou pirólise lenta pode ser uma alternativa promissora à queima. Tem muitas aplicações, como melhorador de solo, tratamento de águas residuais, sequestro de carbono, compostagem, supercapacitor, célula de combustível e material biocomposto.

É motivado a investigar a adequação da palha da Cana-de-açúcar como um material potencial para a produção de biochar e sua aplicação. A forma avançada de análise, como termogravimétrica, microscopia eletrônica de varredura, área de superfície, espectroscopia infravermelha de transformada de Fourier, espectroscopia de ressonância magnética nuclear e espectroscopia Raman, é elaborada para conhecimento profundo das características.

A hipótese é que se a palha da Cana-de-açúcar disponível for usada para a produção de biochar, ela reduzirá a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Em nível global, espera-se que a conversão da palha e do bagaço de Cana-de-açúcar disponível em biochar reduza a emissão de CO<sub>2</sub> em 0,13 Gt por ano. A redução na emissão de CO<sub>2</sub> também favorece a economia. Se 1 tonelada de biomassa por ano for convertida em biochar, 0,82 toneladas de CO<sub>2</sub> podem ser reduzidas por ano e, considerando o custo de emissão de Rs 1800 por tonelada, a economia de custos seria de Rs 1476 por ano..

A utilização desse material, comumente conhecido como biochar (carvão ativado de origem de biomassa), aumenta o conteúdo de matéria orgânica do solo ao mesmo tempo em que modifica os níveis de acidez (pH).

Da mesma forma, altera os coeficientes de troca catiônica, permitindo melhorar o rendimento em diversos tipos de culturas. Devido à sua estrutura porosa, o biochar também é usado como aditivo em regiões de baixa pluviosidade, onde estabiliza efetivamente os níveis de umidade do solo.

Além disso, a incorporação de biochar como um agente estruturante e material base para nutrientes durante o processo de compostagem otimiza a degradação da matéria orgânica, ao mesmo tempo em que reduz as emissões de amônia e gases de efeito estufa.

Também é conhecido por sua eficácia na redução da absorção de metais pesados em solos agrícolas contaminados e, como aditivo, é considerado uma estratégia de mitigação das mudanças climáticas, dada sua capacidade de sequestrar carbono sólido em campos agrícolas por centenas e até milhares de anos.



Desenvolvemos dois testes industriais utilizando o aproveitamento da biomassa residual da Cana-de-açúcar na produção de biochar, bio-óleo, extrato pirolenhoso, vinagre de madeira e de gás sintético onde comprovamos a plena viabilidade de produção do biochar ativado.

Os resultados indicam que aproximadamente 1 kg de biomassa residual da Cana-de-açúcar é necessário para produzir 0,42 kg de biochar. O projeto industrial desenvolvido pela Brasil Biomassa foi utilizando o sistema industrial de pirólise conduzida em um ambiente livre de oxigênio produzindo aproximadamente 30% mais carvão em comparação com a pirólise rápida (12%) ou gaseificação (10%). Os resultados obtidos são consistentes e o sistema de pirólise lenta é o mais adequado para a produção de biochar.

Os dois projetos desenvolvido utilizaram a biomassa residual da Cana-de-açúcar e veio em demonstrar a viabilidade de produzir biochar de alta qualidade, com propriedades favoráveis e empregando um reator simples de câmara dupla.

Os resultados indicam que nos testes industriais com a biomassa fornecem parâmetros adequados para utilização de energia e produção de biochar ativado para uso como adubo no solo.



Os resultados do biochar produzido via pirólise lenta da palha e do bagaço da cana-de-açúcar em temperaturas entre 300 e 400 °C demonstram melhorias em relação aos valores obtidos da biomassa original do Cana-de-açúcar. Os rendimentos do biochar variaram entre 30% e 40%, com alto teor de carbono fixo, apresentando o maior valor em  $79 \pm [2,51]\%$ .



Portanto, a biomassa Cana-de-açúcar e o uso da tecnologia de pirólise lenta, facilitaram a produção de biochar de alta qualidade. Este processo produziu ainda compostos sólidos (materiais carbonáceos e o biochar ativado), componentes gasosos (gases sintéticos), frações líquidas (bio-óleos, extrato pirolenhoso e vinagre de madeira). Há um interesse crescente no uso de biochar derivado de biomassa do Cana-de-açúcar em diversas disciplinas para enfrentar desafios ambientais significativos.



iii. Livro Biochar Biomassa Cana-de-açúcar. O biochar pode melhorar quase qualquer solo, pode ser um aditivo alimentar valioso para a saúde animal e reduzir emissões, além de ajudar os agricultores a reduzir as emissões de metano e a contaminação da pecuária.

A missão primordial neste conturbado momento (problema das mudanças climáticas) e um aumento nos preços internacionais dos fertilizantes é desenvolver e demonstrar com este Livro Biomassa Cana-de-açúcar, do potencial disponível de biomassa da Cana-de-açúcar como fonte de produção de biochar.

O Livro confirma crescimento robusto da indústria e oportunidades emergentes no setor de biochar, uma forma estável de carbono criada a partir de materiais orgânicos, como resíduos florestais.

Surgiu como uma tecnologia líder na entrega de CDR durável, ostentando uma remoção potencial de até 6% das emissões globais anualmente e, em 2023, a remoção de carbono do biochar representou mais de 90% dos créditos de carbono.

Com uma taxa de produção mundial atual de pelo menos 400.000 toneladas métricas anualmente, a indústria do biochar está em uma trajetória de crescimento acentuado e com um caminho claro para entregar uma gigatonelada de remoção de carbono do biochar até 2040.

Mostrando uma taxa de crescimento de produção CAGR de 91% de 2021 a 2023, conforme os dados da International Biochar Initiative (IBI) e a US Biochar Initiative (USBI). Este E-Book, a primeira pesquisa brasileira produzida, destaca os avanços significativos e o potencial do biochar como uma tecnologia de remoção de dióxido de carbono (CDR), ressaltando seu papel crescente no Brasil como uma solução para as mudanças climáticas.

Essa rápida expansão é acompanhada por um forte otimismo da indústria, projetando que as receitas subam para quase US\$ 3,3 bilhões até 2025, de US\$ 600 milhões em 2023.

O Livro identifica os principais desafios e áreas para pesquisas futuras, como aumentar a participação em mercados voluntários de carbono e superar obstáculos para escalar mercados de alta qualidade para biochar físico.

Ele também enfatiza a diversidade de tecnologias de produção e modelos de negócios dentro da indústria, defendendo uma abordagem mais inclusiva que acomode várias escalas de operação e apoie a produção em todo o território nacional.

O biochar é um sistema inovador e este estudo de mercado confirma a interconexão da demanda de mercado, créditos de carbono, benefícios e usos físicos do biochar.

Este Livro também mostra as muitas escalas em que o biochar é produzido, desde grandes plantas industriais que também produzem energia limpa até fornos menores que estão ajudando os agricultores a utilizar resíduos de colheitas e a mudar da queima de colheitas.

O Livro destaca a adaptabilidade dos sistemas de biochar para abordar vários desafios de mudança climática, abrangendo a remoção de carbono.

Os resultados deste Livro destacam o crescimento da indústria de biochar à medida que ela emerge como uma tecnologia CDR essencial. Ao mesmo tempo, o estudo de mercado envia uma mensagem clara de que desenvolver mercados de alto volume e alto valor para biochar é um desafio essencial aos empresários brasileiros.

O Livro faz uma análise apurada em nível nacional das oportunidades de aproveitamento dos tipos de biomassa para a produção de biochar como um novo fertilizante ecológico.

As questões-chave que motivam a presente Livro são identificar e analisar o potencial de aproveitamento da biomassa de eucalipto para o desenvolvimento de plantas de biochar, visto a necessidade do uso crescente de adubos e fertilizantes na agricultura brasileira