

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

LIVRO BIOCHAR BIOMASSA MILHO

2025

E
D
I
T
O
R
A

B
R
A
S
I
L

B
I
O
M
A
S
S
A



BIOMASSA PALHA SABUGO MILHO
SEQUESTRO CARBONO FERTILIZANTE
ORGÂNICO AGRICULTURA REGENERATIVA

SUMÁRIO EXECUTIVO

LIVRO BIOCHAR BIOMASSA PALHA E SABUGO MILHO

INTRODUÇÃO.....15

- i. Declarações Prospectivas
- ii. Exposição Fundamental Biochar Biomassa Milho
- iii. Livro Biochar Biomassa Milho

CAPÍTULO I MILHO.....28

- 1.1. Cultura do Milho
- 1.2. Produção Agrícola Nacional Milho
- 1.3. Oferta e Demanda Milho
- 1.4. Plantio e produtividade do Milho
- 1.5. Resíduos da Cultura do Milho
- 1.6. Resíduos da Colheita e do Beneficiamento Agroindustrial do Milho
- 1.7. Aproveitamento energético da palha do milho
- 1.8. Metodologia de Cálculo dos Resíduos da Cultura do Milho
- 1.9. Composição Físico-química da Biomassa do Milho

CAPÍTULO II PIRÓLISE DA PALHA E DO SABUGO DO MILHO.....36

- 2.1. Pirólise da Palha e Sabugo de milho
 - 2.1.1 Processos de conversão térmica
 - 2.1.2 Pirólise do Milho
 - 2.1.3 Pirólise rápida da biomassa do milho
 - 2.1.4 Produtos da pirólise rápida da biomassa do milho
 - 2.1.4.1. Biocarvão da biomassa do milho
 - 2.1.4.2. Gases não condensáveis da pirólise da biomassa do milho
 - 2.1.4.3. Bio-óleo da pirólise da biomassa do milho
 - 2.1.5. Efeito dos parâmetros de reação na pirólise rápida de biomassa do milho
 - 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 milho
 - 2.1.10. Efeito da composição da biomassa do milho
 - 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 Milho
 - 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 milho
 - 2.1.14.1. Matéria-prima utilizada
 - 2.1.14.2. Palha e Sabugo de milho
 - 2.1.14.3. Catalisadores
 - 2.1.14.4. Caracterização da biomassa da palha e sabugo do milho
 - 2.1.14.5. Densidade do Sabugo do milho
 - 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 sabugo do milho
 - 2.1.14.7. Composição química das fibras lignocelulósicas
 - 2.1.14.8. Análises termogravimétricas
 - 2.1.14.9. Pirólise analítica da palha e sabugo do milho
 - 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 sabugo do milho
 - 2.1.14.10.1. Unidade experimental Pirólise rápida em leito fluidizado borbulhante da palha e sabugo do milho
 - 2.1.14.11. Procedimento experimental da pirólise da palha e sabugo do milho
 - 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 Sabugo do Milho
 - 2.1.14.12.1. Caracterização da biomassa do milho
 - 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 Sabugo do Milho
 - 2.1.14.14.1. Efeito da temperatura na pirólise analítica da palha e sabugo de milho
 - 2.1.14.14.2. Efeito da presença de catalisadores na pirólise analítica da palha e sabugo de milho
 - 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 sabugo do milho
 - 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 sabugo do milho
- 2.1.15. Conclusivamente

CAPÍTULO III BIOCHAR DADOS GERAIS102

- 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 CO₂
 - 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 N₂O 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 MILHO.....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. Custo 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 CO₂
 - 5.3.10. Geração de créditos de carbono
 - 5.3.11. Teor de carbono total
 - 5.3.12. Emissão de CO₂
 - 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.....300

Livro Biochar Biomassa Palha e Sabugo do Milho

Catologação na Fonte Brasil.

Brasil Biomassa e Energia Renovável. Curitiba. Paraná. 2025

Conteúdo: 1. Análise da Biomassa da Palha e do Sabugo do Milho como matéria-prima para a produção de Biochar no Brasil 2. Projeções de Produção de Biochar com uso da Biomassa do Milho para Sequestro de Carbono, Fertilizante Ecológico e para Agricultura Regenerativa . 3. Cultura do Milho no Brasil e o Potencial de Produção e de Aproveitamento Sustentável 4. Tecnologia Industrial de Pirólise Biomassa do Milho para Produção Biochar, bio-óleo, gás sintético, extrato pirolenhoso e vinagre de madeira 5. Análise Mercado de Produção e de Consumo de Biochar. 6. Aproveitamento sustentável (bioeconomia e economia circular) dos Resíduos da Biomassa do Milho. 7. Impacto e Projeções de Uso/Consumo de Biochar do Milho. 8. Requisitos Ambientais, e Permissões. 9. Certificações Internacionais do Biochar 10. Biochar da Biomassa do Milho 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 19de 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 450 páginas.

Livro Biochar Biomassa Palha e Sabugo do Milho

Valor do investimento para aquisição do Livro R\$

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 BRASIL BIOMASSA

(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 Milho 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 Milho 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 em 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 Milho 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 Biomassa Milho 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 Milho. 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 milho) 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, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos florestais, resíduos agrícolas como a palha e o sabugo do milho, 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.

Coletivamente, como uma agricultura regenerativa e como uma fonte renovável de energia, o milho 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, o milho é uma fonte ótima para produzir biochar de forma mais eficiente e ecologicamente correta do que a madeira. Os rejeitos agrícolas do milho como sabugo, folha, palha e caule podem ser utilizados para a produção de biochar.

O milho é um importante alimento no mundo. É uma fonte de vários produtos industriais tais como amido, vitaminas, fibras, óleo e etanol. A produção global de milho aumentou cerca de 44,74% que é maior que o aumento da população mundial de 12,34% durante o mesmo período.

No Brasil é um dos cultivos mais expressivos, colocando o país como o terceiro maior produtor mundial de milho . É de consciência que grande parte da biomassa gerada pelas indústrias de processamento de milho é descartada, 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 o milho verde, gera resíduo composto por sabugos, palhas, pontas de espigas e espigas rejeitadas. Conforme a Associação Brasileira de Indústrias da Biomassa – ABIB, os resíduos do processamento do milho constituídos principalmente da palha e do sabugo . Houve também uma similaridade na geração do resíduo do milho nas regiões Sul e Centro-Oeste com participação de 37% e 31%, respectivamente.

Entretanto, no processamento de milho verde, existe a etapa de despalhamento e seleção. Nesta fase, selecionam-se as espigas, retiram-se as palhas e as pontas da espiga. Portanto, nesta etapa seria possível separar apenas a palha do milho verde para posterior produção de biochar para a própria indústria e os demais resíduos continuarem a serem destinados à alimentação bovina.



Os resíduos, produtos originados na produção do milho, podem ser utilizados 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 o que contribui tanto à indústria quanto ao meio ambiente, o desenvolvimento deste Livro alavancará a análise do potencial da palha do milho verde na geração de biochar.

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.

O Milho é capaz de proliferar sem a necessidade de seguir regras rigorosas para cultivo, colheita, propagação e corte. O milho pode tolerar uma ampla faixa de temperaturas ($-28-38\text{ }^{\circ}\text{C}$), é capaz de explorar eficientemente a água e o solo à sua disposição e não precisa de fertilizantes ou pesticidas.



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 CO₂ e libera oxigênio (> 30%) de volta para a atmosfera, reduzindo assim o aquecimento global.

Nesse sentido, devido à sua taxa de crescimento inigualável, o milho 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 milho 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, o milho 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 do milho 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 milho 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.

O biochar do milho, 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 [N₂O] e metano [CH₄] 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 espiga de milho 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 espiga de milho 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 espiga de milho disponível for usada para a produção de biochar, ela reduzirá a emissão de dióxido de carbono (CO₂). Em nível global, espera-se que a conversão da palha e da espiga de milho disponível em biochar reduza a emissão de CO₂ em 0,13 Gt por ano. A redução na emissão de CO₂ também favorece a economia. Se 1 tonelada de biomassa por ano for convertida em biochar, 0,82 toneladas de CO₂ 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 do milho 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 do milho 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 desenvolvidos utilizaram a biomassa residual milho 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 em temperaturas entre 300 e 400 °C demonstram melhorias em relação aos valores obtidos da biomassa original do Milho. Os rendimentos do biochar variaram entre 30% e 40%, com alto teor de carbono fixo, apresentando o maior valor em $79 \pm [2,51]\%$. A relação H/C de 0,03 em todos os dois biochars, em comparação com 0,13 na biomassa do milho, indica aromaticidade e maturação adequada. Os principais elementos inorgânicos nos dois biochars mostram um aumento em comparação à biomassa original. A alta presença de cálcio (Ca) e potássio (K) evidencia uma vantagem para uso no solo

Os altos valores de carbono fixo permitem a utilização do biochar para remediação e enriquecimento do solo, sequestro de carbono, como elementos de filtragem ou outra aplicação versátil, como compostagem de resíduos sólidos orgânicos, descontaminação de água e esgoto, servindo como catalisadores e ativadores, bem como em materiais de eletrodo e modificadores.

De acordo com a definição fornecida pela International Biochar Initiative (IBI), o biochar (BC) é “o material sólido obtido da conversão termoquímica de biomassa em um ambiente com oxigênio limitado”.

Praticamente, o Biochar é o resíduo preto leve feito principalmente de carbono e cinzas, mas também rico em sistemas aromáticos e minerais produzidos pela decomposição térmica de biomassa de material orgânico, incluindo o Milho sob fornecimento limitado ou na ausência de oxigênio (O₂).

Esse processo de decomposição térmica é conhecido como pirólise. A temperatura de pirólise mais comumente usada está na faixa de 300–600 °C, mas uma faixa maior de 200–1000 °C é relatada. Quando a temperatura de decomposição térmica é superior a 1000 °C e até 1600 °C.

A pirólise compreende pirólise lenta, pirólise rápida e pirólise flash, dependendo da temperatura de trabalho, da taxa de aquecimento e do tempo de residência da matéria orgânica a uma temperatura fixa. Na pirólise da biomassa do milho, três tipos de produtos com diferentes estados físicos podem se formar simultaneamente em diferentes concentrações. O resíduo sólido compreende Biochar, que pode conter cinzas e fuligem, os bio-óleos representam o produto líquido ou extrato pirolenhoso e vinagre de madeira e os gasosos consistem em gás de síntese.

Em condições de pirólise lenta (350–700 °C, taxa de aquecimento < 10 °C/min), o composto principal é o Biochar; os bio-óleos e extrato pirolenhoso são, em vez disso, os produtos mais abundantes em condições de pirólise rápida e instantânea (400–600 °C, aquecimento > 200 °C/min e 750–1000 °C, aquecimento > 1000 °C/min, respectivamente), e o gás de síntese se torna o produto principal quando as condições de gaseificação são aplicadas (800–1600 °C, aquecimento 1000 °C/min).

O gás de síntese consiste em uma mistura de gases cuja composição pode variar significativamente dependendo do tipo de matéria-prima e das condições de pirólise. No entanto, tipicamente, o gás de síntese é composto por 30–60% de monóxido de carbono (CO), 25–30% de hidrogênio (H₂), 0–5% de metano (CH₄) e 5–15% de dióxido de carbono (CO₂). Além de uma quantidade maior ou menor de vapor de água, quantidades menores de compostos de enxofre, como sulfeto de hidrogênio (H₂S) e sulfeto de carbonila (COS) e, finalmente, um pouco de amônia e outros contaminantes residuais.

Quanto aos bio-óleos e o pirolenhoso, sua produção pode ser uma estratégia atraente para gerar combustível a partir de biomassa, permitindo uma redução na dependência global de combustíveis fósseis para produzir energia. O bio-óleo tem um poder calorífico maior quando comparado à sua matéria-prima original e, quando queimado, pode potencialmente gerar uma quantidade menor de gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis fósseis. Consequentemente, mesmo que sua aplicação mais estudada ainda seja como combustível de queima, outras aplicações estão surgindo devido à sua composição, como no caso de espumas e resinas. Além disso, as últimas aplicações enfatizam o potencial do bio-óleo como fonte de produtos químicos de valor acrescentado.

O tratamento de biomassa a 200–300 °C de aquecimento a <50 °C/min é denominado torrefação, levando a uma biomassa torrefeita com alto teor de Biochar (69–80%).

Enquanto a carbonização hidrotérmica (HTC) na presença de oxigênio, realizada a 400–1000 °C e uma taxa de aquecimento muito baixa (<1 °C/min), leva à obtenção de hidrochar (HC) (50–70% BC), também conhecido como material HTC. O HC é um material sólido distinto do Biochar devido ao seu processo de produção e propriedades.

O processo pirolítico que leva ao Biochar ecoa aquele que produz carvão vegetal, que é a mais antiga tecnologia industrial desenvolvida pela humanidade. De qualquer forma, embora muito semelhante e de origem análoga, enquanto o carvão vegetal é usado principalmente como combustível, a aplicação primária do Biochar foi para a correção do solo, visando melhorar as características e funções do solo, bem como prevenir a degradação natural da biomassa em gases de efeito estufa por meio do sequestro de carbono, reduzindo assim as emissões de gases na atmosfera e mitigando as mudanças climáticas.

Conforme mencionado acima, o Biochar pode conter outros sólidos, como fuligem e cinzas. Enquanto a fuligem é um material carbonáceo pirogênico secundário (PCM) identificado como um componente separado resultante de processos de condensação de gás, as cinzas normalmente incluem óxidos inorgânicos e carbonatos que não contêm carbono orgânico.

Um método alternativo para produzir Biochar consiste na despolimerização termocatalítica (TCD), que utiliza micro-ondas. Ela tem sido usada para converter eficientemente matéria orgânica em Biochar em escala industrial, produzindo \approx 50% de carvão .

Portanto, a biomassa Milho 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 milho em diversas disciplinas para enfrentar desafios ambientais significativos.



iii. Livro Biochar Biomassa Milho. 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 Milho, do potencial disponível de biomassa do Milho 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 Livro, 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

