

STEPHEN JOSEPH
PAUL TAYLOR

BIOCHAR

UM GUIA PRÁTICO PARA
PRODUÇÃO, USO E APLICAÇÃO

TRADUÇÃO TÉCNICA

Amanda Ronix

Fabiana Abreu de Rezende

José Dilcio Rocha

Agnieszka Ewa Latawiec

INTER
S
CÇÕES

EDITORA

PUC
RIO

STEPHEN JOSEPH
PAUL TAYLOR

BIOCHAR

UM GUIA PRÁTICO PARA
PRODUÇÃO, USO E APLICAÇÃO

TRADUÇÃO TÉCNICA
Amanda Ronix
Fabiana Abreu de Rezende
José Dilcio Rocha
Agnieszka Ewa Latawiec





**Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro (PUC-Rio)**

Grão-Chanceler

Cardeal Dom Orani João Tempesta, OCist.

Reitor

Prof. Pe. Anderson Antonio Pedroso, S.J.

Vice-reitor

Pe. Miguel Martins de Oliveira Filho, S.J.



© 2025 ANZ Biochar Industry Group

Créditos da obra

Edição da obra

Felipe Gomberg

Projeto de capa

Natália Brunnet

Diagramação

Natália Brunnet



©Editora PUC-Rio

Rua Marquês de São Vicente, 225,
Campus Gávea/PUC-Rio
Rio de Janeiro, RJ - CEP: 22451-900
edpucrio@puc-rio.br
www.editora.puc-rio.br



©Selo Interseções, Editora PUC-Rio

Em parceria com o Departamento de
Geografia e Meio Ambiente

Conselho Editorial PUC-Rio

Alexandre Montauray, Felipe Gomberg,
Gabriel Chalita, Gisele Cittadino,
Pe. Ricardo Torri de Araújo, S.J.,
Rosiska Darcy de Oliveira e Welles Morgado

Todos os direitos reservados.

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida, transmitida ou arquivada por
qualquer forma e/ou em quaisquer meios sem permissão escrita da Editora PUC-Rio.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Joseph, Stephen

BIOCHAR: um guia prático para produção, uso e aplicação
/ Stephen Joseph, Paul Taylor; tradução técnica Amanda Ronix
... [et al]. - Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2025.

324 p.; 22 cm

Obra publicada através do Selo Interseções da Ed. PUC-Rio,
em parceria com o Departamento de Geografia e Meio Ambiente.

Inclui bibliografia

ISBN: 978-85-8006-376-9

1. Biocarvão. 2. Adubos e fertilizantes. 3. Solos - Manejo. 4.
Solos - Fertilidade. 5. Solos - Correção. 6. Agricultura - Aspectos
ambientais. I. Taylor, Paul. II. Título.

CDD: 631.86

Apresentação da Edição Brasileira

A edição brasileira do *Biochar: Um guia prático para produção, uso e aplicação* nasceu do desejo de tornar acessível, em nossa língua, um conhecimento que tem transformado práticas agrícolas em diferentes partes do mundo. Traduzir e adaptar esta obra de Stephen Joseph e Paul Taylor foi mais do que um trabalho técnico, foi um exercício de convergência entre ciência, aplicação prática e compromisso ambiental.

O biochar representa hoje uma das tecnologias mais promissoras e escaláveis para enfrentar desafios que unem a agricultura e o clima: restaurar a fertilidade dos solos, aumentar a produtividade e, ao mesmo tempo, capturar e armazenar carbono de forma duradoura. No Brasil, onde a agricultura é uma das bases do desenvolvimento nacional, o biochar tem potencial para fortalecer sistemas produtivos sustentáveis e regenerativos, valorizando tanto o conhecimento científico quanto o saber prático do agricultor.

Esta tradução foi conduzida com o apoio e a dedicação de uma equipe comprometida com o avanço da agenda do biochar no país. Agradeço especialmente aos colegas Fabiana Abreu de Rezende, José Dilcio Rocha e Agnieszka Ewa Latawiec, pela parceria na revisão e adaptação técnica, aos colegas de instituições públicas e privadas em todo o país, pelas valiosas contribuições aos estudos de caso sobre a aplicação de biochar no Brasil, e ao professor Stephen Joseph, pela confiança e entusiasmo com a ideia de trazer esta obra para o público brasileiro.

Um agradecimento especial à NetZero, cujo apoio financeiro viabilizou a publicação desta obra, reforçando o compromisso do setor privado com a disseminação de soluções climáticas baseadas em ciência.

Nosso reconhecimento ao Departamento de Geografia e Meio Ambiente da PUC-Rio pelo suporte institucional à tradução desta obra.

Esta publicação tem o propósito de disseminar o conhecimento e ampliar o acesso a práticas sustentáveis em todo o território nacional. Que esta edição em português inspire novas práticas, colaborações e políticas públicas voltadas à sustentabilidade do solo e à mitigação das mudanças climáticas. Que cada leitor encontre aqui não apenas um manual técnico, mas um convite à ação — a transformar resíduos em recursos, desafios em oportunidades e conhecimento em futuro.

Amanda Ronix

Sumário

Introdução	9
CAPÍTULO 1	
Princípios da pirólise da biomassa para a produção de biochar	11
CAPÍTULO 2	
Práticas artesanais de produção e utilização de biochar	29
CAPÍTULO 3	
Escolhendo uma unidade de produção de biochar que atenda às suas necessidades	41
CAPÍTULO 4	
Introdução às propriedades básicas do biochar	77
CAPÍTULO 5	
Mudanças nas propriedades do biochar após interação com solos, compostagem ou animais	107
CAPÍTULO 6	
Efeitos do biochar na produção agrícola e nos solos	113
CAPÍTULO 7	
Escolha e aprimoramento de biochar para atender às restrições do solo	161
CAPÍTULO 8	
Aplicações de biochar	193
CAPÍTULO 9	
Estudos de caso	223
CAPÍTULO 10	
Biochar para agricultura regenerativa	271
CAPÍTULO 11	
Testando biochar em propriedades rurais	291
Agradecimentos	323
Sobre os autores	324

Introdução

O biochar é uma forma de biomassa que foi termicamente decomposta em um ambiente com fornecimento limitado de oxigênio. Seu potencial para aumentar a produtividade agrícola, fortalecer a resistência das plantas a doenças, desintoxicar o solo e sequestrar carbono já está amplamente documentado.

Diversas pesquisas demonstram que os efeitos do biochar podem variar significativamente conforme o tipo de matéria-prima, a temperatura de produção e as características específicas de planta, solo, clima e ecossistema envolvidos. Esse conhecimento tem levado à crescente compreensão de que os biochars e fertilizantes à base de biochar precisam ser cuidadosamente selecionados ou aprimorados para responder de forma eficaz a desafios específicos do solo e do ambiente.

O Brasil possui uma longa história na produção e no uso de biochar e seus derivados. A utilização do biochar nas florestas amazônicas teve início há pelo menos 600 anos, quando agricultores indígenas produziam carvão vegetal em fornos rudimentares e o aplicavam ao solo.

Nos últimos anos, a Embrapa e diversas universidades brasileiras têm desenvolvido pesquisas e ensaios de demonstração sobre o tema. Mais recentemente, várias empresas passaram a converter resíduos agrícolas como, cascas de café e bagaço de cana-de-açúcar, para a produção de biochar.

Este guia foi originalmente elaborado para agricultores australianos, com o objetivo de oferecer uma referência abrangente e de fácil leitura. A Dra. Amanda Ronix coordenou a presente edição brasileira adaptando, ampliado e traduzindo para o português, com o objetivo de apoiar agricultores, técnicos, formuladores de políticas públicas, estudantes e demais interessados na compreensão dos benefícios do uso do biochar.

A publicação reúne experiências de jardineiros, produtores rurais e pesquisadores que têm utilizado o biochar com sucesso em hortas domésticas, pequenas propriedades e fazendas em todo o mundo. Ela combina saberes tradicionais, inovações recentes e os achados mais atuais da pesquisa científica.

O guia está organizado em onze capítulos. Os Capítulos 1 a 3 apresentam os princípios, métodos e equipamentos para a produção de biochar, incluindo práticas históricas e indígenas.

Os Capítulos 4 a 7 exploram a ciência por trás das propriedades e dos efeitos do biochar, destacando pontos essenciais para sua aplicação eficaz e sustentável.

Por fim, os Capítulos 8 a 11 orientam sobre como selecionar e aplicar o biochar, usá-lo em sistemas agrícolas regenerativos e realizar testes práticos em casa ou na fazenda. Esses capítulos incluem estudos de caso reais, que apresentam os resultados da aplicação do biochar a partir de experiências de produtores.

Os leitores podem optar por começar pelos três primeiros capítulos, depois avançar diretamente para os Capítulos 8 a 10 para uma abordagem prática, retornando aos Capítulos 4 a 7 para uma compreensão mais profunda da ciência e dos princípios que fundamentam o uso do biochar. O Capítulo 11 traz os procedimentos de testes e análises complementares.

Em breve, será lançado um manual prático complementar, com instruções passo a passo para projetar, produzir e aplicar o biochar de forma eficaz e economicamente viável, contribuindo para a regeneração do solo e do planeta.

Stephen Joseph e Paul Taylor

CAPÍTULO 1

Princípios da pirólise da biomassa para a produção de biochar

Pontos principais

- A pirólise é a decomposição térmica da biomassa num ambiente com oxigênio limitado. A carbonização é o enriquecimento de carbono no biochar.
- O tipo de biomassa e as condições da pirólise determinam principalmente as propriedades do biochar.
- Para produzir biochar de boa qualidade, a matéria-prima deve ser obtida de forma sustentável, não estar contaminada por substâncias tóxicas (como tintas, alcatrões, colas ou metais pesados) e ter um teor de umidade de 15-20% ao entrar no pirolisador.
- Para a redução líquida de CO₂, a matéria-prima deve provir de biomassa de crescimento rápido ou de resíduos e detritos que, de outro modo, se decomporiam rapidamente.
- Não confundir a produção de biochar com a queima ou combustão; são processos diferentes. Durante a pirólise, metade do carbono da biomassa é fixado no biochar e cerca de metade da energia da biomassa é disponibilizada.
- A pirólise e a carbonização são processos complexos de várias fases, que se desenrolam a uma velocidade de cerca de 10-20 minutos por cm de espessura de madeira. Através do controle de cada fase a qualidade do produto obtido poderá ser diferente.
- O ácido pirolenhoso é um produto valioso da pirólise. Pode ser utilizado para promover a germinação, aumentar o rendimento das culturas e os micróbios benéficos, ou controlar as pragas nocivas.
- Existem três métodos genéricos para fornecer calor à biomassa: pirólise em chama, retortas aquecidas externamente e aquecimento por recirculação de gases de combustão quentes. Cada método tem vantagens e desvantagens.
- Otimizar os benefícios ambientais do biochar através de uma maior utilização do carbono e da energia contidos na biomassa.

INTRODUÇÃO

O biochar é obtido através do processo de pirólise, que significa decomposição sob ação do calor (do grego pyr, pyrós = fogo + lysis = dissolução), e envolve o aquecimento da biomassa num ambiente de oxigênio limitado. A decomposição resultante da biomassa produz gases que contêm energia, óleos e um resíduo sólido, ou biochar; todos eles possuem uma série de utilizações. Para a produção de biochar, o processo é normalmente ajustado de modo que o biochar seja o produto principal.

Uma parte dos gases e óleos (em conjunto conhecidos como pirogás) produzidos durante a pirólise pode ser queimada para fornecer o calor para o processo. Se a biomassa estiver relativamente seca, é produzido um excesso de gás em relação ao necessário para sustentar a pirólise, que pode ser queimado para obter energia útil, compensando a utilização de combustíveis fósseis e as emissões de gases do efeito estufa. Os vapores emitidos durante a fase de baixa temperatura da pirólise podem ser condensados e transformados em ácido pirolenhoso, que é um valioso auxiliar no controle de pragas e doenças e na fertilização de solos e plantas.

O biochar também pode ser produzido através de um processo conhecido como gaseificação. Neste processo, a biomassa é primeiro pirolisada e, em seguida, é utilizado mais oxigênio para decompor parte do biochar e dos vapores, produzindo mais gás rico em hidrogênio, metano e monóxido de carbono. Normalmente, o rendimento do biochar da pirólise é 20-30% superior ao de um processo de gaseificação equivalente.

Este capítulo introduz os princípios da pirólise da biomassa para a produção de biochar. Abrange os requisitos da matéria-prima de biomassa, as relações entre a pirólise e a combustão, as fases da pirólise e o balanço energético na pirólise. O capítulo também introduz os fatores importantes que influenciam as propriedades do biochar, que incluem as propriedades da matéria-prima, a taxa de aquecimento durante a pirólise, a temperatura mais elevada que o biochar atinge, a atmosfera de vapor em torno do biochar em formação e os métodos de aquecimento.

O potencial do biochar para melhorar a produtividade das colheitas, aumentar a resistência a doenças das plantas, remover substâncias tóxicas do solo e sequestrar carbono está bem documentado.



REQUISITOS DA MATÉRIA-PRIMA DE BIOMASSA PARA BIOCHAR

Biomassa é um termo que se refere a materiais vivos ou outrora vivos, que podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de biochar. Quase todos os materiais orgânicos razoavelmente secos, como madeira, casca, cascas de nozes, resíduos de culturas, espécies invasoras e subprodutos animais, incluindo estrume, ossos, resíduos de peixe e biossólidos, podem ser utilizados para produzir biochar (Figura 1.1). Os melhores biochars para correção agrícola provêm frequentemente de resíduos de grãos finos e de elevada densidade nutritiva provenientes da agricultura, da criação de animais e de outros resíduos, como os biossólidos limpos.

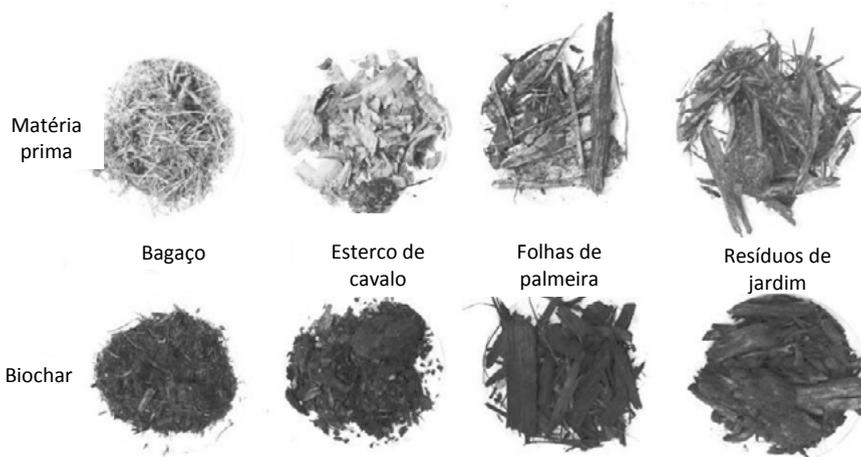


Figura 1.1 – O biochar pode ser produzido a partir de muitos tipos de biomassa.

O tipo de biomassa e as condições de funcionamento do reator de pirólise que converte a biomassa são os principais fatores que determinam as propriedades do biochar. Por conseguinte, é útil compreender a composição básica e as características da biomassa que será utilizada como matéria prima.

Embora qualquer biomassa possa ser pirolisada, as credenciais ambientais do biochar exigem que a matéria-prima para a sua produção seja obtida de forma sustentável. Ao produzir biochar para aplicações agrícolas no solo, na água ou na criação de animais, é também crucial excluir a biomassa com elevados níveis de produtos químicos orgânicos e inorgânicos tóxicos, como o cromo, chumbo, arsênio e cádmio. Por último, para que o biochar resultante conduza a uma redução líquida efetiva do CO_2 é necessário que a matéria-prima seja proveniente de biomassa de crescimento rápido que substitua rapidamente o carbono emitido para a atmosfera durante a pirólise, ou que seja derivada de resíduos ou detritos que, de outro modo, se decomporiam ou seriam queimados, enviando todo o seu C para a atmosfera sob a forma de CO_2 .

O teor de umidade da biomassa é também uma consideração importante. O teor de água afeta o processo químico e físico, influenciando a qualidade do biochar, o teor de umidade no gás liberado, a eficiência da combustão e a quantidade de energia gerada. A biomassa com um teor de umidade (MC) superior a 20% necessita normalmente de ser seca antes de se poder produzir biochar de alta qualidade, e pode não haver energia suficiente para a pirólise prosseguir se o teor de umidade for superior a 40-50%. Por outro lado, alguma umidade é importante para a conversão da biomassa em biochar. O teor de umidade ideal para a produção de biochar é de cerca de 15%. A secagem ao ar e ao sol da biomassa é uma boa prática para reduzir a energia necessária para a evaporação da água, maximizando assim a quantidade de energia excedente disponível para utilização externa, como o aquecimento de estufas ou a produção de eletricidade.

COMO A PIRÓLISE SE RELACIONA COM A QUEIMA OU COMBUSTÃO?

O processo de produção de biochar, a pirólise, não deve ser confundido com a queima ou combustão da biomassa. A pirólise da biomassa é a decomposição e volatilização da biomassa sob ação do calor, que pode ocorrer com pouco ou nenhum oxigênio. Por outro lado, a combustão é uma reação em

fase gasosa que ocorre quando os gases combustíveis se misturam e reagem com o oxigênio para criar chamas e calor (ver Figura 1.2).

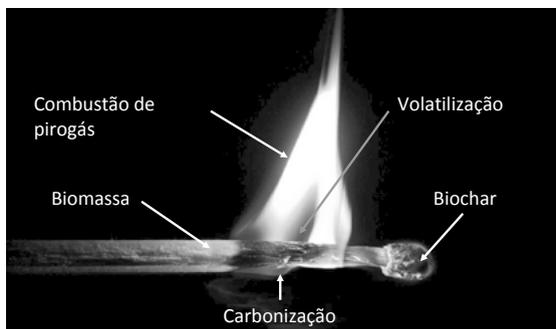


Figura 1.2 – Um fósforo a arder mostra a volatilização e a carbonização da biomassa que ocorrem em zonas deficientes em oxigênio no interior da chama, enquanto a combustão é uma reação de fase gasosa separada que ocorre em excesso de oxigênio. A chama fornece o calor para continuar a pirólise e os gases e chamas pobres em oxigênio protegem o carvão da oxidação. Isto ilustra todos os princípios da pirólise por chama para produzir biochar.

A combustão da biomassa é, por conseguinte, um processo em várias fases que requer, em primeiro lugar, a pirólise da biomassa para libertar os gases combustíveis (ver Figura 1.3). Uma vez inflamada, as chamas dos gases em combustão aquecem a biomassa, continuando a pirólise até ficar um resíduo rico em carbono. A zona de chama em torno da biomassa está desprovida de oxigênio, o que protege o carbono da oxidação. Depois de as chamas se extinguírem, o oxigênio pode chegar ao carvão, o que leva a uma nova fase de combustão em que o carbono é oxidado em monóxido de carbono, que por sua vez arde com uma chama azul em CO_2 . O resíduo final da combustão completa é apenas a cinza, que representa o conteúdo mineral oxidado da biomassa. Para limitar a produção de cinzas e preservar o carvão vegetal para utilização como biochar, o carvão quente deve ser rapidamente arrefecido ou separado do oxigênio no final da fase de pirólise. Isto pode ser feito por arrefecimento com água ou cobrindo o biochar com terra ou transferindo-o para um recipiente hermético.

É fundamental compreender o carácter multifásico da combustão da biomassa e o fato de o carvão estar protegido da oxidação quando rodeado de chamas. Isto permite a produção simples de biochar através da ignição direta da biomassa num ambiente de baixa tecnologia, desde que o processo seja interrompido antes da fase final de oxidação do carvão através da extinção da fonte de calor.

Libertação de carbono durante a pirólise

Durante a pirólise, até metade do carbono da biomassa é fixado no biochar, enquanto o restante é libertado para a atmosfera sob a forma de CO_2 . No entanto, se a biomassa utilizada for proveniente de plantas de crescimento rápido, que podem substituir rapidamente o carbono, ou de resíduos ou detritos que, de outro modo, se decomporiam ou seriam queimados, a produção de biochar pode resultar numa redução líquida de CO_2 .

Pirólise como uma fase da combustão

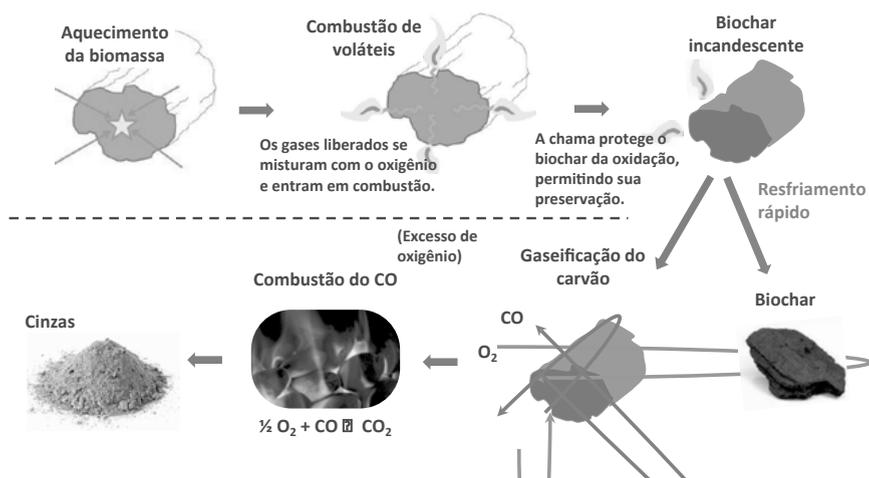


Figura 1.3 – A combustão da biomassa é um processo em várias fases. Se a combustão for limitada ou interrompida, o biochar pode ser preservado. A pirólise também pode prosseguir na ausência de qualquer oxigênio, sendo os gases encaminhados para outro local para combustão ou outras utilizações. Nota: tal como a biomassa, o biochar contém hidrogênio; para simplificar, não são apresentadas as reações $\text{H} + \text{O}_2$ e $\text{CH} + \text{O}_{3/2}$ que ocorrem na gaseificação do carvão.

PIRÓLISE DA BIOMASSA

Quando o calor é aplicado a uma partícula de biomassa, como um pedaço de madeira ou uma casca de noz, a peça de biomassa seca, encolhe, muda de cor, passando de castanho a preto, e perde peso (Figura 1.4). As reações progridem através de uma série de fases, começando na superfície da partícula de biomassa e penetrando no centro da partícula. Uma vez que o calor e os gases se difundem lentamente através da madeira e do carvão,

todas as fases da pirólise podem estar presentes simultaneamente numa única peça de madeira, com madeira totalmente carbonizada no exterior e madeira úmida e inalterada no interior. O encolhimento e as fissuras na madeira aceleram a progressão da pirólise, facilitando o fluxo de calor para o interior e a libertação de gases para o exterior.

A carbonização através de uma placa de madeira prossegue a uma taxa de cerca de 0,5 a 1 mm/min, abrandonando ao longo do tempo à medida que uma camada isolante de carvão se acumula na superfície.^{1,2,3,4} Assim, pode demorar até 20 minutos por centímetro (ou quase uma hora por polegada) para que a carbonização total progrida numa placa de madeira. É necessário ter em conta o tempo necessário para adicionar biomassa de grandes dimensões ao forno. A taxa de carbonização em toras cilíndricas pode ser duas vezes mais rápida. A taxa de pirólise em blocos e aparas é ainda mais rápida, uma vez que o calor e o gás podem fluir em todas as direções (ver Figura 1.4). A pirólise de pequenas partículas, como a serradura, pode ocorrer em segundos.

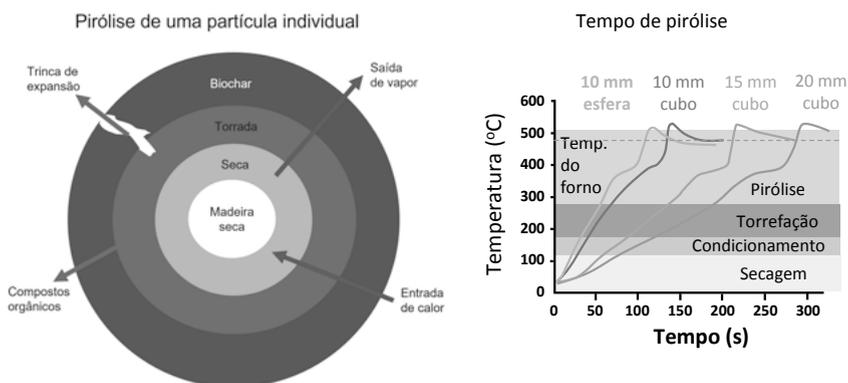


Figura 1.4 – A progressão das fases de pirólise num pedaço de biomassa. A frente de pirólise progride para o núcleo da partícula à medida que o calor se difunde para dentro e os gases para fora, e todas as fases podem estar presentes num único pedaço de biomassa. O aumento da temperatura ao longo do tempo no centro de uma partícula num forno a 510 °C. **Nota:** Uma peça redonda (esférica) de biomassa carboniza no centro mais rapidamente do que um cubo, e as peças maiores demoram mais tempo. São apresentadas faixas de temperatura aproximadas para as fases da pirólise. (Curvas adaptadas de Atreya A et al., 2017).⁴

FASES DA PIRÓLISE

A série de alterações que ocorrem quando a biomassa é aquecida num ambiente sem oxigênio é mostrada na Figura 1.5. As faixas de temperatura associadas às etapas descritas abaixo são mostradas na Figura 1.4.

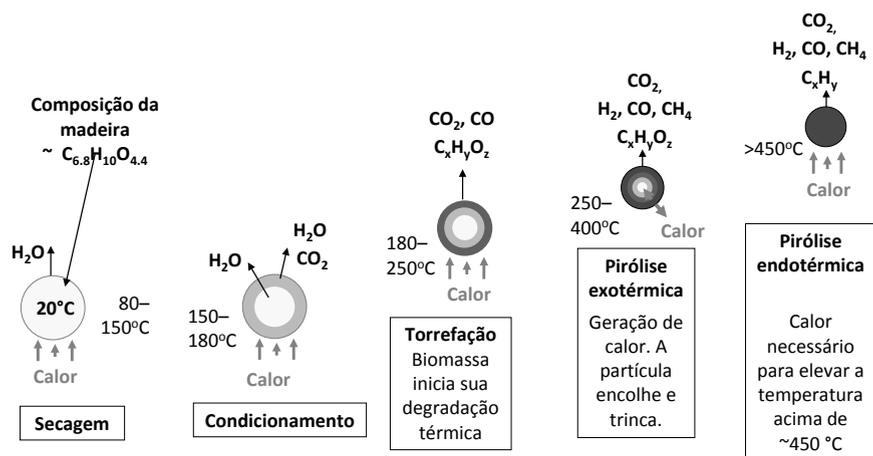


Figura 1.5 – Diagrama de fluxo das cinco fases da pirólise que evoluem em uma partícula de biomassa. As fases estão codificadas por cores. A medida que a pirólise avança para além da fase de secagem em cada zona, a biomassa começa a decompor-se em fragmentos moleculares que são liberados primeiro como gases simples e progressivamente como vapores mais complexos de óleo e alcatrão à medida que a temperatura aumenta. Cada fase emite os gases representados na primeira ocorrência da fase (apenas são apresentadas as emissões principais de cada fase). Uma vez iniciada a fase de pirólise exotérmica, o calor gerado pela decomposição flui para dentro e para fora da zona exotérmica, levando a pirólise a penetrar mais profundamente na partícula.

Fase 1: Secagem

Nesta fase inicial, a biomassa é aquecida externamente para eliminar a umidade sob a forma de vapor. A pré-secagem da biomassa antes da pirólise aumenta a eficiência e a qualidade do biochar.

Fase 2: Condicionamento

Mesmo após a secagem, cerca de 5% do peso da biomassa é constituído por água quimicamente ligada, que é liberada entre 150 °C e 180 °C. Esta fase, conhecida como condicionamento, pode afetar as propriedades do biochar final.

Fase 3: Torrefação

Entre 180 °C e 250 °C, a biomassa começa a decompor-se progressivamente, libertando gases voláteis, incluindo metanol e ácido acético. Esta fase, em que a biomassa se torna castanha, é conhecida como torrefação. A *biomassa torreficada* é reduzida em peso, tamanho e resistência e aumentada em densidade energética e hidrofobicidade. A torrefação é utilizada para densificar a biomassa para facilitar o seu transporte e trituração como biocombustível. Os gases voláteis leves produzidos nesta fase podem ser condensados para produzir uma solução ácida conhecida como vinagre de madeira, água de fumo ou ácido pirolenhoso. Este ácido pode ser utilizado como biopesticida, fungicida, auxiliar de germinação ou potenciador de crescimento, e é um agente condicionador útil para o biochar.

Fase 4: Pirólise exotérmica

A partir de 250 °C - 280 °C, a biomassa começa a decompor-se rapidamente, produzindo gases combustíveis como o metano e o hidrogénio. A fronteira entre a torrefação e a pirólise é imprecisa e varia consoante as condições, especialmente o conteúdo mineral da matéria-prima. A pirólise é lenta no início e avança rapidamente quando a temperatura da biomassa ultrapassa os 350 °C. Nesta faixa, o processo torna-se exotérmico; a decomposição da biomassa produz calor, o que aumenta rapidamente a temperatura da biomassa para cerca de 450 °C. As curvas da Figura 1.4 indicam este fato. Por volta dos 350 °C, a energia é canalizada para a rápida decomposição da biomassa, abrandando o aumento da temperatura no centro da partícula. A seguir, o calor é libertado na partícula, acelerando o seu aumento de temperatura acima dos 400 °C. Este é o início da verdadeira pirólise, também conhecida como carbonização, em que se forma a matriz rica em carbono do biochar. Durante esta fase, os gases libertados podem condensar-se no biochar criado, produzindo carvão secundário, o que influencia as propriedades do biochar final.

Fase 5: Pirólise endotérmica e acondicionamento final

Acima de 400 °C, é necessário novamente um aquecimento externo para aumentar ainda mais a temperatura. Isto libera mais compostos orgânicos e alguns compostos inorgânicos voláteis. Esse processo produz o biochar poroso, de baixo teor de voláteis e com elevado teor de carbono, desejados para determinadas aplicações. O ar ou o vapor quente (ou ambos) podem ser introduzidos no forno para aquecer o biochar e adaptar ainda mais as propriedades do biochar, ativando as suas superfícies.

OS EFEITOS DO TEMPO E DA TEMPERATURA

A formação de biochar requer temperaturas que variam entre 250 °C e 900 °C no interior da partícula de biomassa, sendo que as temperaturas mais baixas requerem um tempo mais longo para o desenvolvimento de estruturas de carbono estáveis (Figura 1.6). A 250 °C, o limite de baixa temperatura da pirólise por combustão lenta em fornos tradicionais, a biomassa pode levar dias para carbonizar completamente. Pelo contrário, a temperaturas mais elevadas, a pirólise pode ocorrer em segundos se as partículas de biomassa forem suficientemente pequenas para que o calor penetre rapidamente. As propriedades do biochar são influenciadas pelo “tempo de residência” na temperatura. As temperaturas mais baixas deixam normalmente materiais mais voláteis no carvão, que podem ser uma fonte de nutrientes, enquanto as temperaturas mais elevadas resultam em um carbono mais persistente.



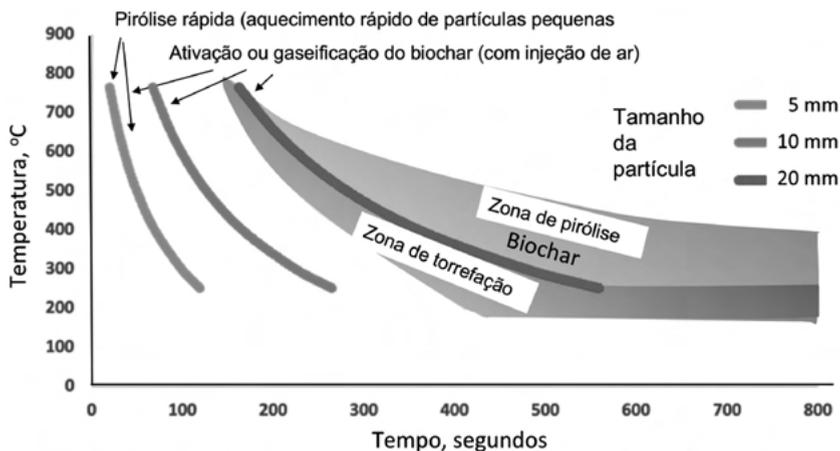


Figura 1.6 – Efeito do tempo e da temperatura na formação de biochar nos centros das partículas de biomassa. Para cubos de tamanho 5, 10 e 20 mm, e para temperaturas de forno indicadas no eixo vertical, as curvas indicam os tempos antes de o centro das partículas começar a pirólisar. As regiões sombreadas ilustram esquematicamente as zonas de torrefação (acima de cerca de 180 °C e à esquerda da curva) e de formação de biochar (acima de cerca de 250 °C e à direita da curva). Os limites são aproximados e variam consoante as condições. Aplicam-se zonas semelhantes às curvas para partículas menores. Para biomassa de grandes dimensões, as curvas deslocam-se mais para a direita; a formação total de biochar pode demorar dias para toros de madeira em combustão lenta em fornos tradicionais. (Curvas calculadas a partir da fórmula empírica).⁴

A compostagem, um processo mais lento que se desenrola ao longo de semanas ou meses a temperaturas inferiores a 60 °C, também poderia ser mapeada nesta relação temperatura-tempo. Tal como o biochar, a compostagem envolve a decomposição e transformação da biomassa, resultando em emissões de gases (por exemplo, CO₂, CH₄) e numa quantidade limitada de produtos sólidos de longa duração, constituídos por grandes moléculas orgânicas estáveis, frequentemente designadas por substâncias húmicas, que possuem qualidades e complexidade semelhantes às do biochar.

Ponto principal

O biochar adicionado à biomassa pode acelerar o processo de compostagem, reduzir as emissões de gases de efeito de estufa e os odores e aumentar o teor de nutrientes do composto.

CONCEPÇÃO E CONTROLE DE UM REATOR DE BIOCHAR

Quimicamente, o processo de condicionamento, torrefação, pirólise e ativação da biomassa e do biochar é muito intrincado e complexo, conduzindo a uma diversidade de propriedades e produtos úteis. Existe uma interação complexa entre as entradas, as saídas, o tipo de reator e os parâmetros de controle do reator, que está representada esquematicamente na Figura 1.7. A concepção do processo de produção de biochar começa com a consideração das propriedades finais desejadas, que orientam a seleção do tipo de biomassa, o tipo de forno, a gama de temperaturas, a velocidade do processo, o manuseamento dos gases libertados e qualquer pré ou pós-condicionamento a ser aplicado. Estes temas importantes serão abordados em capítulos futuros.

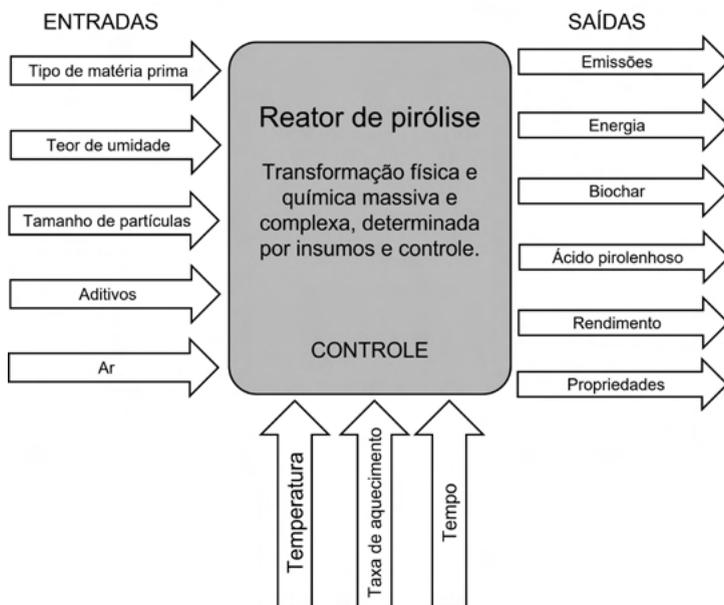


Figura 1.7 – Dinâmica do processo de pirólise

PRODUÇÃO DE VINAGRE DE MADEIRA (ÁCIDO PIROLENHOSO)

O vinagre de madeira, também conhecido como ácido pirolenhoso, ou fumaça líquida, é um subproduto do processo de pirólise utilizado para produzir biochar. Trata-se de um líquido amarelo a acastanhado, com um forte odor de fumaça e um sabor ácido. O vinagre de madeira contém uma mistura complexa de compostos orgânicos, incluindo ácido acético, metanol, acetona e fenóis. O vinagre de madeira é recolhido por arrefecimento (num condensador) dos vapores e da fumaça liberados pelo forno. Os vinagres de madeira obtidos a partir de diferentes matérias-primas, condições de pirólise e gamas de temperatura a que os gases são libertados têm composições químicas diferentes (Figura 1.8) e apresentam efeitos diferentes no desenvolvimento das raízes, crescimento das plantas, doenças e pragas.⁵

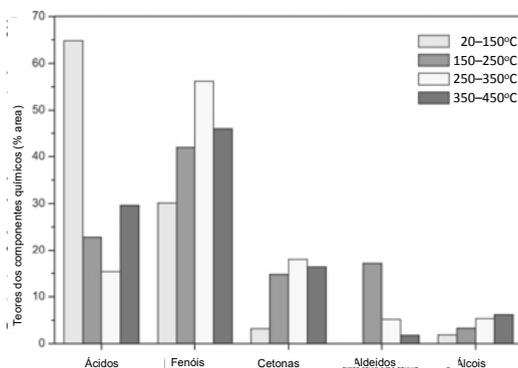
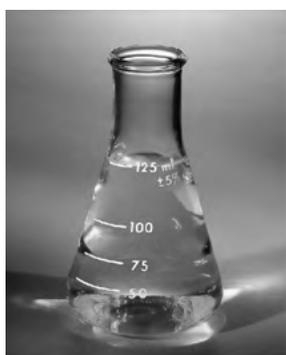


Figura 1.8 – À esquerda: Vinagre de madeira refinado. À direita: Concentrações relativas dos diferentes tipos de componentes químicos no vinagre de madeira em função da temperatura (indicada na legenda) do forno a partir do qual o vinagre de madeira foi condensado. Foi mantida uma atmosfera inerte no forno com um fluxo de nitrogênio e o pirogás do forno foi recolhido por um tubo que passa por um banho de gelo (Lu, 2019).⁵

O vinagre de madeira para melhorar o crescimento das plantas é preferencialmente recolhido nas fases iniciais da pirólise, à medida que a temperatura do forno aumenta de 20 °C para 250 °C, quando ocorrem a secagem, o condicionamento e a torrefação. O vinagre de madeira produzido a partir da condensação dos gases a temperaturas mais elevadas é mais aplicável como bioherbicida e biopesticida. Alguns fabricantes vendem produtos derivados dos gases que foram condensados à temperatura ambiente até cerca de 450 °C. Este fato deve ser tido em conta quando se considera a adequação

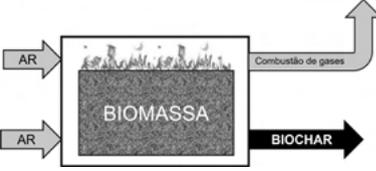
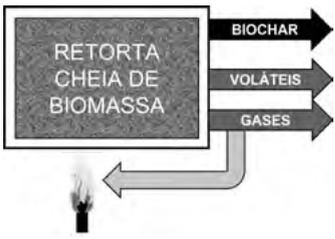
e a diluição do vinagre de madeira na aplicação pretendida. O Capítulo 6 apresenta mais informações sobre a utilização de vinagre de madeira.

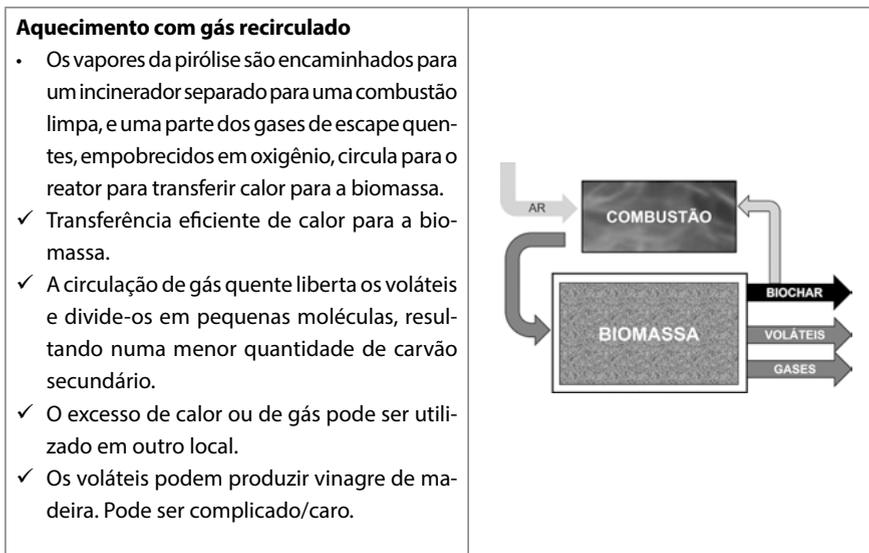
Após a recolhimento, o vinagre de madeira é deixado em repouso enquanto se separa numa fração pesada de alcatrão na parte inferior, numa fina camada de óleo leve na parte superior e numa fração intermédia da qual é extraído o vinagre de madeira. Para melhorar ainda mais a qualidade, o vinagre de madeira é refinado através de uma combinação de repouso prolongado, filtragem ou destilação. Por exemplo, na prática tradicional japonesa para produzir vinagre de madeira da mais alta qualidade para utilização com animais, o vinagre de madeira pode ser deixado em repouso durante 6 a 12 meses com várias decantações repetidas da camada intermédia. Também pode ser filtrado através de carvão vegetal. Para saber mais sobre as técnicas envolvidas na produção de vinagre de madeira a partir de fornos básicos e o processo de purificação subsequente, consulte o *Manual de produção de carvão vegetal*.⁶

O vinagre de madeira é diluído entre 100 e 500 vezes, dependendo da sua aplicação, para promover a germinação, o crescimento das plantas e os micróbios benéficos, ou para o controle de pragas nocivas (concentrações mais elevadas). O vinagre de madeira pode ser refinado para produzir “fumaça líquida”, um agente aromatizante em alimentos e um conservante para carne e peixe. Na medicina tradicional, o vinagre de madeira é utilizado para vários fins, nomeadamente como tratamento de doenças de pele e para melhorar a circulação sanguínea.

MÉTODOS DE AQUECIMENTO

A pirólise requer calor, mas não necessariamente chama. Existem três métodos genéricos para fornecer o calor à biomassa, cada um com vantagens (✓) e desvantagens (✗) resumidas na tabela:

<p>Aquecimento direto ou pirólise com chama-oxidativa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parte da matéria-prima no reator é queimada. • A biomassa é diretamente aquecida pelas chamas. ✓ O ar é limitado na zona de carbonização, enquanto que, nas melhores práticas, os gases libertados são queimados de forma limpa numa zona de excesso de ar. ✓ Concepção, fabricação e funcionamento simples de bricolage. Menor rendimento, necessidade de cuidados com o fogo devido à concepção aberta, pequena escala. 	
<p>Aquecimento externo de biomassa numa retorta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uma fonte de calor externa é aplicada a um recipiente cheio de biomassa enquanto o ar é excluído. O recipiente é designado por retorta. • Os gases libertados saem e são queimados no excesso de ar. • O calor é reciclado de volta para aquecer a retorta. ✓ Os voláteis podem ser condensados sob a forma de vinagre de madeira. ✓ O excesso de calor ou de gás pode ser utilizado de forma controlada (para secagem, estufa, produção de eletricidade, etc.). ✓ Maior controle do oxigênio e da temperatura. ✓ O calor demora mais tempo a penetrar em retortas grandes. ✓ O gás inflamável pode explodir se O_2 entrar na retorta. 	



BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

O balanço energético da pirólise é importante. Se a biomassa estiver muito úmida e as perdas de calor do forno forem demasiado elevadas, a energia produzida na pirólise poderá ser insuficiente para conseguir uma carbonização ótima da biomassa e uma queima limpa do pirogás úmido. Além disso, a energia excedente prevista pode ser um resultado valorizado e fazer parte do modelo econômico da pirólise.

A pirólise da biomassa começa com a evaporação da água a granel. Segue-se a decomposição da biomassa seca num resíduo de carvão e pirogás (frequentemente referido como syngas), uma mistura de gases não combustíveis e combustíveis (Figura 1.9).

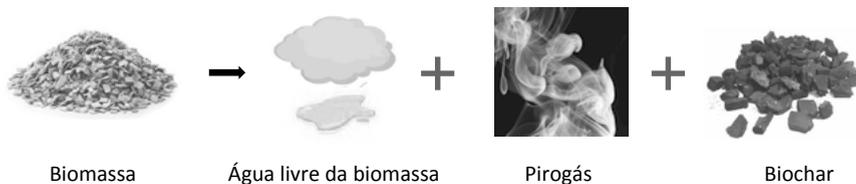


Figura 1.9 – Um conceito simples do balanço de massa na pirólise.

Para além da água a granel, o pirogás inclui água “química” que é libertada ou formada durante a pirólise. Normalmente, o pirogás é totalmente queimado em excesso de ar para liberar a sua energia. Parte desta energia liberada é utilizada para conduzir a pirólise, em seguida, a energia residual nos gases de escape é desperdiçada para a atmosfera ou uma parte pode ser aplicada para aquecimento (por exemplo, estufas ou água) ou para produzir eletricidade.

A energia necessária para aquecer a biomassa até a temperatura de pirólise (250 °C - 280 °C) e para quebrar as ligações químicas é conhecida como calor ou entalpia de pirólise, que varia consoante a biomassa.⁷ A cerca de 280 °C, o processo torna-se exotérmico e não é necessário mais calor para que a temperatura da biomassa carbonizada aumente para 350 °C - 400 °C. Adicionalmente, alguma energia é perdida por radiação e convecção a partir do forno.

Os cálculos básicos podem ser efetuados utilizando equações de balanço de massa e energia.

Balanço de massa:

Secagem: Massa da biomassa úmida = Massa de água a granel + Massa da biomassa seca

Pirólise: Massa de biomassa seca = Massa de carvão seco + Massa de pirogas

Combustão de pirogas: Massa de pirogas + Massa de ar = Massa de gases de escape

Balanço energético:

Energia na biomassa úmida = Calor de vaporização da água química + Energia no carvão seco + Energia no pirogás + Entalpia de pirólise + Energia perdida no forno

O balanço de massa e energia dependerá da matéria-prima, do teor de umidade e do forno. Para a pirólise de uma matéria-prima lenhosa com um teor de umidade de 20% em base úmida e um rendimento de 20% de biochar em base seca (como se pode obter num forno agrícola de baixa tecnologia), um modelo simplificado para o balanço energético revela que 17% da energia da biomassa é necessária para conduzir os processos de pirólise (vaporização da água, aquecimento da biomassa seca, decomposição química e perda de calor). Cerca de 28% é retido no carvão, deixando 55% da energia da biomassa libertada no pirogás. Se um forno de alta tecnologia com um rendimento de biochar de 33% for alimentado com matéria-prima com 25% de teor de umidade, então, com base nos mesmos fatores energéticos, 47% da energia da biomassa é retida no carvão e apenas 35% da energia da

biomassa está disponível no pirogás. Os fornos de alta tecnologia podem ser projetados para obter uma combustão limpa e uma utilização eficiente da energia do pirogás. Isto pode envolver a secagem do pirogás (por exemplo, condensando a umidade e os voláteis como o vinagre de madeira), queimando o pirogás seco num oxidador térmico para conseguir uma combustão completa, transferindo eficientemente o calor necessário de volta para o processo de pirólise e aplicando o equilíbrio da energia a outras utilizações valiosas. Mais pormenores, com exemplos de cálculos, serão fornecidos no próximo manual do biochar.

Referências

1. Martinka J. et al. (2018). Cálculo da taxa de carbonização e da profundidade de carbonização da madeira de abeto e pinho a partir da perda de massa. *J Therm Anal Calorim* 132, 1105-1113. doi.org/10.1007/s10973-018-7039-8
2. Rinta-Paavola A. et al. (2023). Modelling Charring and Burning of Spruce and Pine Woods During Pyrolysis, Smoldering and Flaming. *Fire Technol* 59, 2751-2786. doi.org/10.1007/s10694-023-01458-9
3. Fonseca, E.M.M. (2009). Determinação da taxa de carbonização de perfis de madeira de pinho submetidos a altas temperaturas. doi.org/10.2495/SAFE090421
4. Atreya A. et al. (2017). O efeito do tamanho, forma e condições de pirólise na decomposição térmica de partículas de madeira e tições. *Jornal Internacional de Transferência de Calor e Massa* 107 (2017) 319-328 doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2016.11.051
5. Lu X. et al. (2019). Efeito da temperatura de pirólise nas características do vinagre de madeira derivado de resíduos de abeto chinês: Um estudo abrangente sobre seu desempenho e mecanismo de regulação do crescimento. *ACS Omega* 4:19054-19062 doi.org/10.1021/acsomega.9b02240
6. Emrich W. (1985). *Handbook of Charcoal Making*, Springer Science & Business Media. link.springer.com/book/10.1007/978-94-017-0450-2
7. Daugaard D.E. e Brown R.C. (2003). Enthalpy for Pyrolysis for Several Types of Biomass. *Energy Fuels*, 17:934-939 DOI: pubs.acs.org/doi/10.1021/ef020260x

CAPÍTULO 2

Práticas artesanais de produção e utilização de biochar

Pontos principais

- As tradições de utilização do biochar remontam a milhares de anos em todos os continentes.
- A compreensão das técnicas tradicionais pode melhorar a utilização do biochar na agricultura moderna.
- As práticas tradicionais envolviam o tratamento térmico de biomassa fresca e compostada misturada com fontes minerais como solo e argila, ossos, conchas, fragmentos de argila cozida e cerâmica descartada.
- A biomassa reage com os minerais e nutrientes para formar um complexo biochar-organo mineral.
- Os chineses e os japoneses fabricavam biochar a partir de bambu e madeira dura, e também capturavam, condensavam e refinavam a fumaça para produzir extrato pirolenhoso. Era utilizado para melhorar a germinação, aumentar o crescimento das plantas e matar as pragas.
- Os métodos tradicionais de produção de biochar incluem:
 - Queima parcial de biomassa em poços escavados, empilhadas ou amontoadas nos canteiros ou perto deles, cobertos com argila ou terra (por vezes deixando orifícios de ar), acendendo-a e deixando-a queimar de forma controlada;
 - Queima completa de casca de arroz, cascas de coco ou serragem de madeira, curar tijolos, cerâmica ou telhas em fornos de baixa tecnologia.
- Foram desenvolvidas práticas tradicionais específicas para a aplicação do biochar na germinação de sementes e na produção de culturas hortícolas, de cereais e arbóreas.
- Os indígenas aguardam de uma a três semanas (ou uma estação inteira) antes de plantar no solo com biochar. Isto permite que o biochar envelheça, desenvolva características favoráveis e que microrganismos se desenvolvam.
- A aplicação de biochar pelas comunidades indígenas continuou durante séculos, produzindo um aumento do pH, da capacidade de troca catiônica, dos nutrientes vegetais disponíveis, do carbono orgânico, do carbono total, da fertilidade duradoura e do rendimento das culturas nos solos.

INTRODUÇÃO

A tradição de utilização do biochar em todos os continentes remonta a milhares de anos. O mundo moderno foi alertado para os benefícios agrícolas e de sequestro de carbono proporcionados pelo biochar quando estudos associaram a fertilidade e a longevidade dos solos de Terra Preta da Bacia Amazônica à presença de carvão antropogênico arqueológico.

Os cientistas consideram que a incorporação de biomassa carbonizada (proveniente das práticas de manejo do fogo nas aldeias) nos solos dos assentamentos levou à produção e aplicação intencionais de biochar para aumentar a fertilidade do solo. Esta hipótese é apoiada pela prática generalizada, encontrada nas culturas indígenas existentes na América do Sul, Austrália, África e Ásia, de incorporar materiais carbonizados no solo para aumentar a fertilidade. Estas práticas representaram um progresso em relação ao método nômade de agricultura de “corte e queima” e continuam a ser utilizadas em zonas onde as populações fixas não têm meios para comprar fertilizantes químicos.

Neste capítulo, apresentamos uma visão geral do uso tradicional histórico e contemporâneo do biochar, com ênfase no que podemos aprender sobre as suas técnicas, a fim de melhorar a eficácia das aplicações do biochar nas nossas práticas agrícolas.

MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE BIOCHAR

As práticas tradicionais envolviam o tratamento térmico de misturas de biomassa fresca e compostada, acompanhadas de fontes minerais como solo e argila, ossos, conchas, fragmentos ou pelotas de argila cozida e cerâmica descartada. A biomassa incluía madeira, casca de árvore, bambu e resíduos agrícolas, como casca e palha de arroz, juntamente com biomassa rica em nutrientes, como restos de comida, esterco de animais e dejetos humanos. Nestes processos, a biomassa reage com os minerais e os nutrientes para formar um complexo biochar-organo-mineral (BOMC) num ambiente de altas temperaturas. Durante séculos, as técnicas tradicionais chinesas e japonesas de produção de biochar a partir de bambu e de madeira dura também capturaram, condensaram e refinaram a fumaça para produzir um líquido (frequentemente designado por ácido pirolenhoso ou vinagre de madeira) utilizado para melhorar a germinação, aumentar o crescimento ou atuar como biopesticida ou bioherbicida.

Os métodos específicos utilizados para a produção tradicional de corretivos à base de biochar variam consoante as culturas e as regiões. O método mais simples consiste em misturar ou colocar em camadas as diferentes biomassas e minerais (cinzas) e queimá-las num fogo aberto. A temperatura média do biochar nesse método de produção é geralmente inferior a 450 °C, embora haja pontos quentes onde a temperatura pode exceder os 600 °C. São frequentemente produzidas muita fumaça e cinzas e alguns dos produtos químicos destes resultantes são absorvidos pelas superfícies do biochar e dos minerais.

Na Austrália e na Nova Zelândia, o biochar foi produzido em poços escavados (Figura 2.1). A investigação de locais com estes solos com elevado teor de carbono revelou que, em comparação com os locais adjacentes, os solos escuros tinham um pH e uma capacidade de troca catiônica mais elevados. Também tinham níveis mais elevados de carbono orgânico e total, e de N total, Ca, K e P.¹

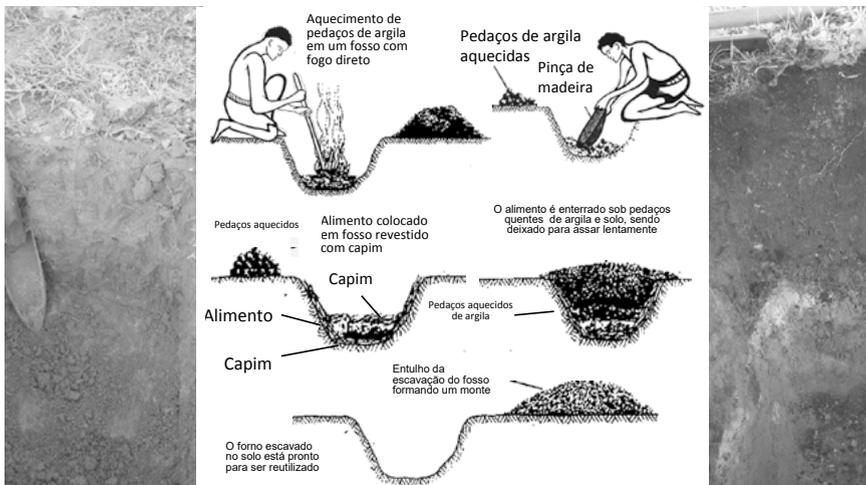


Figura 2.1 – Os métodos australianos tradicionais de produção de biochar resultaram na formação de solos de terra escura com carvão vegetal e pedações de barro cozido (**à direita**), em comparação com os solos adjacentes (**à esquerda**). Escavava-se um poço e utilizava-se fogo para aquecer pelotas de argila. Depois de os alimentos terem sido cozidos, os resíduos de terra, argila e capim pirolisado formaram o monte. (Adaptado de Downie et al. e Coutts et al.),^{1,2}

Um outro método muito utilizado consiste em dispor a biomassa em camadas nos canteiros para formar um monte, cobri-la com argila ou terra e acendê-la. Uma equipe que visitou o Nepal encontrou uma aldeia chamada Tamang nas montanhas onde esta técnica era praticada há muitas gerações (Figura 2.2). O exame ao microscópio eletrônico de varredura do biochar mostrou a matriz de carbono cheia de minerais disponíveis para as plantas e os microrganismos (Figura 2.3). A agricultora disse que as suas sementes de painço poderiam não germinar e vingar sem o biochar. Só raramente, em situações de estresse severo, como secas ou eventos de temperatura, é que ela precisa adicionar fertilizantes químicos caros, e apenas uma pequena quantidade de ureia porque o biochar torna a ureia muito eficaz.





Figura 2.2 – Produção de biochar numa aldeia Tamang no Nepal. **Da esquerda para a direita:** 1: Uso de uma enxada para revirar o solo. 2: Adição de palha e capim no solo. 3: Adição de esterco em combustão lenta sobre a biomassa. 4: Cobertura com uma camada de folhas e gravetos. 5 Cobertura com terra solta, após o que se deixa queimar durante três dias, tornando o solo avermelhado e produzindo biochar. 6 O material carbonizado é trabalhado no solo e deixado durante 15 dias antes de se plantar o painço. Fotos: S Joseph.³

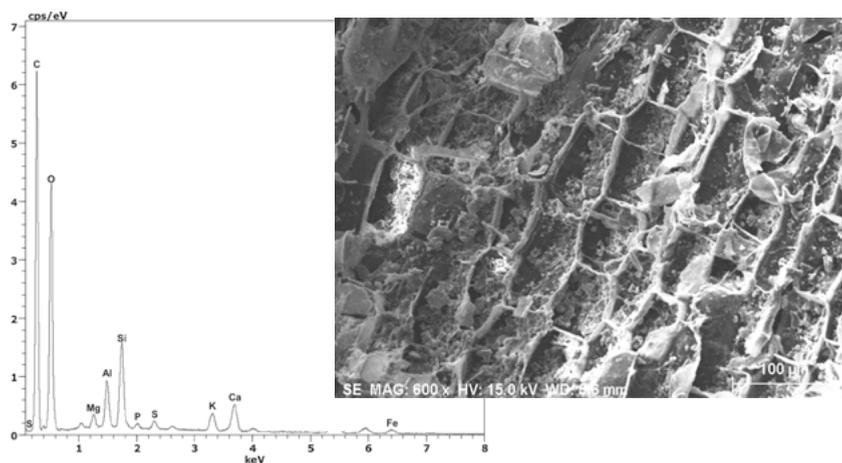


Figura 2.3 – Análise ao microscópio eletrônico de varredura de uma amostra de biochar coletada em um campo de painço, mostrando a matriz de carbono cheia de minerais disponíveis para as plantas e os microrganismos. Os quatro maiores picos no espectro de raios X são C, O, Si e Al.³

Outro método consiste em encher poços ou trincheiras com biomassa, cobrir com terra deixando alguns orifícios para a entrada de ar, colocar fogo na biomassa e deixá-la queimar parcialmente. A figura 2.4 mostra uma versão deste método praticada no Vietnã.



Figura 2.4 – A produção de biocharvã com o método da trincheira no Vietnã consiste em colocar palha e casca de arroz no canteiro do jardim, ou numa trincheira pouco profunda, formar chaminés a intervalos com a palha (em cima e embaixo à esquerda), cobrir com terra, acender nos buracos das chaminés (embaixo à direita) e deixar queimar lenta e parcialmente.

No Sudeste Asiático, era prática comum queimar tijolos e telhas com casca de arroz e serragem em fornos ineficientes feitos de tijolos. A mistura residual de biomassa carbonizada e fragmentos de cerâmica ou de tijolo era utilizada pelos operadores dos fornos para os seus próprios plantios de alimentos ou vendida aos agricultores. Os fornos de carvão vegetal feitos de terra ou de tijolos também foram utilizados para produzir carvão para cozinhar e para uso agrícola.

No Vietnã, em alguns vilarejos mergulha-se a lenha e o bambu durante seis a doze meses nas lamas ricas em minerais das lagoas no fundo dos seus terraços de arroz (Figura 2.5). Os minerais incorporados na biomassa e no seu interior reduzem a taxa de emissões voláteis, fazendo com que a combustão seja mais eficiente e limpa. O material é protegido da oxidação, resultando num elevado rendimento de biochar e cinzas ricas em minerais, que são utilizados em hortas domésticas para o cultivo de vegetais.

Verificou-se que o biochar contém minerais como K, Ca, Mg e Si ligados à sua superfície e poros.

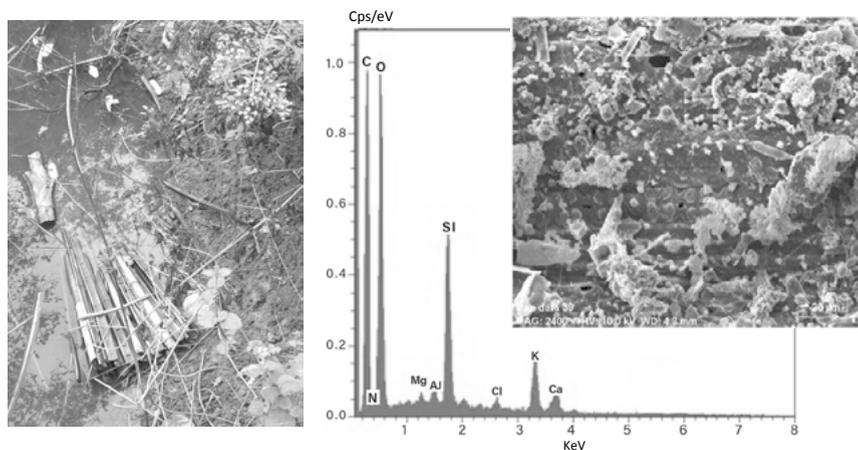


Figura 2.5 – Embebe-se bambu e madeira em lagos ricos em nutrientes, argila e minerais no Vietnã. Depois de queimar o combustível seco numa fogueira, o biochar e as cinzas são usados no jardim. A microscopia eletrônica encontrou as superfícies e os poros do biochar revestidos de minerais. A difração de raios X mostrou picos elevados para C, O, Si, K e picos mais baixos para Mg, Al, Cl e Ca. (Modificado de Joseph et al.)⁴



MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE MISTURAS DE BIOCHAR E MINERAIS

Existe pouca documentação sobre a forma como as pessoas aplicavam as misturas minerais de biochar no passado, mas as práticas locais contemporâneas são provavelmente continuidades ou redescobertas de práticas históricas.

Segue-se um resumo das práticas comuns de aplicação, baseadas tanto na literatura como nas observações do autor, que ainda podem ser encontradas em locais remotos em todo o mundo:

- Germinação de sementes** O biochar, especialmente o biochar produzido a partir de palha e cascas, é amplamente utilizado na Ásia em misturas de vasos para germinar sementes e cultivar plântulas para transplante.
- Culturas de cereais** Os aditivos de biochar são misturados no solo, muitas vezes com esterco, geralmente duas a três semanas antes do plantio.
- Vegetais** Os sulcos são cavados e os condicionadores de biochar, juntamente com o esterco, são aplicados no fundo do sulco (Figura 2.3). O sulco é novamente preenchido com solo, formando um monte no topo, e os vegetais são plantados no monte. Para algumas plantas (por exemplo, cebolinhas e brássicas), o biochar é colocado na superfície em torno do caule da planta.
- Culturas arbóreas** Os corretivos à base de biochar são colocados por baixo das plantas jovens. No caso das estacas a transplantar, são colocadas pequenas quantidades do corretivo nas raízes. Para as árvores maduras que sofrem de doenças, abre-se uma vala à volta da linha de gotejamento e coloca-se biochar inoculado com microrganismos nessa vala.

Invariavelmente, as populações indígenas deixam passar um período de tempo, pelo menos uma a três semanas e, por vezes, uma estação, antes de colocarem as sementes ou as plantas no solo com biochar. Isto pode estar relacionado a várias razões:

- Quando o biochar é produzido in situ com o solo, os microrganismos patogênicos e benéficos podem ser esterilizados. Além disso, o nitrogênio e o carbono orgânico do solo podem perder-se temporariamente do solo afetado pelo calor.
- O biochar fresco, se não for produzido a partir de material rico em nutrientes ou se não for pré-carregado com nutrientes, pode competir com os microrganismos e as plantas na absorção dos nutrientes do solo.
- O biochar produzido em fogueiras com fumaça contém compostos condensados, que podem incluir compostos tóxicos. Microrganismos específicos do solo podem decompor estas toxinas ao longo de semanas até um nível em que a toxicidade não é um problema para a planta.
- Outras propriedades do biochar podem estimular microrganismos benéficos e a germinação de sementes.

Em todos os casos, é necessário tempo para que as populações de microrganismos cresçam ou se regenerem, para que o solo afetado pelo calor se regenere e para que as interações benéficas biochar-solo-microrganismos amadureçam, reduzindo assim as toxicidades e carregando o biochar com nutrientes.

ALTERAÇÕES DE LONGO PRAZO NO SOLO COM O USO TRADICIONAL BIOCHAR

A aplicação contínua de biochar pelas comunidades indígenas tem-se prolongado, por vezes, durante milênios, como acontece nos solos de Terra Preta da Amazônia, nos solos aborígenas da Austrália e nos solos antropogênicos do Paleolítico na Europa. Este fato permitiu estudos de alterações a longo prazo, raramente acessíveis nas práticas modernas. Os estudos que comparam os solos de longa data tratados com biochar com os solos adjacentes onde o biochar não foi aplicado revelaram que os solos tratados com biochar têm:

- Aumento do pH e da capacidade de troca catiônica (CTC) no solo;
- Maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, como o nitrogênio e o fósforo;
- Aumento dos níveis de carbono orgânico e total no solo; e
- Aumento do rendimento das culturas.

Os biochars formados a partir de ingredientes que incluem argila rica em ferro podem ser magnéticos. A investigação indicou que microrganismos específicos que fixam o carbono e disponibilizam Fe e S crescerão em áreas onde existem pequenas partículas minerais ricas em ferro na superfície do biochar.

Os solos amazônicos de Terra Preta são uma mistura de argila vermelha, areia, silte, matéria orgânica, biochar (carvão vegetal intemperizado), cerâmica queimada, conchas e aglomerados de pequenos pedaços de carbono negro, minerais de vários tipos, fósseis e matéria orgânica. Uma terra castanha menos rica, chamada Terra Preta, é muito mais extensa. Geralmente rodeia os sítios das aldeias onde se encontra a Terra Preta e contém poucos ou nenhum artefato. As evidências sugerem que pode ter resultado de um cultivo relativamente intensivo e intencional durante longos períodos de tempo.

Os solos escuros da Amazônia, em relação aos solos adjacentes, pobres em nutrientes e ricos em ferro, têm:

- Um aumento do pH para 5-6;
- Elevado teor de carbono e de nutrientes (por exemplo, P, 100-300x e Zn, 10x);
- Elevada capacidade de troca de nutrientes;
- Elevada abundância de microrganismos benéficos; e
- Propriedades magnéticas.

Quando o biochar é extraído dos solos de Terra Preta, os investigadores encontraram pedaços de dimensões que variam entre menos de 0,1 mm e mais de 10 mm, enterrados até um metro abaixo da superfície. Uma fina camada de compostos orgânicos e minerais cobre o exterior do biochar, e raízes e pelos radiculares entraram nos poros do biochar. A presença dos complexos biochar- organo minerais melhorou consideravelmente os solos muito pobres, ácidos e ricos em ferro.

Estas observações das práticas e formulações tradicionais serviram de inspiração para o desenvolvimento de biochars melhorados para condições específicas do solo e necessidades de nutrientes das plantas.

Referências

1. Downie A.E. et al. (2011). Terra Preta Australis: Reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. *Agriculture, ecosystems and environment*. 140:137–147 doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.020
2. Coutts P.J.F. et al. (1979). A Preliminary Investigation of Aboriginal Mounds in North-Western Victoria. *Records of the Victorian Archaeological Survey* 9:1–116 search.informit.org/doi/10.3316/informit.883017489074457
3. Joseph S. et al. (2022). A Nepali Villager’s Tradition of Making Low Temperature Biochar. *International Biochar Initiative* biochar-international.org/profile-a-nepali-villagers-tradition-of-making-low-temperature-biochar
4. Joseph S. et al. (2022). Stoves in Vietnam. *International Biochar Initiative* biochar-international.org/stoves-in-vietnam

CAPÍTULO 3

Escolhendo uma unidade de produção de biochar que atenda às suas necessidades

Pontos principais

- Escolha um reator de biochar e sistemas de produção relacionados que sejam adequados para a matéria-prima, os recursos e as propriedades finais desejadas do biochar.
- Certifique-se de que o reator de biochar atenderá às normas de emissões locais. O ideal é que a energia excedente da pirólise seja utilizada.
- Para ajudá-lo a escolher entre os vários projetos de reatores de biochar disponíveis, a Parte 1 deste capítulo resume as principais classes de fornos e suas características, aplicações, vantagens e desvantagens.
- Para operações do tipo “faça você mesmo” e de pequenas empresas ou fazendas, os fornos com tampa de chama, como o Kon-Tiki, são os mais populares. As instruções para sua operação segura e eficiente são fornecidas na Parte 2, inclusive as maneiras como podem ser usados para produzir complexos biochar-organo minerais (BOMC) aprimorados.
- Os fornos de produção de biochar podem ser divididos em fornos do tipo retorta e gaseificadores Top-Lit UpDraft (TLUDs). Os TLUDs podem ser ampliados e usados para pirolisar matérias-primas finas, enquanto os fornos de retorta podem queimar vários combustíveis e produzir BOMC. A Parte 3 descreve seu projeto, operação e uma variedade de fornos comerciais.
- Os fornos comerciais são divididos em operação em batelada e contínua. A Parte 4 apresenta um resumo dos diferentes fornos disponíveis na Austrália e no Brasil.
- Consulte os princípios de projeto e as dicas de segurança descritas na Parte 5. Considere a possibilidade de participar de um workshop de treinamento ou solicitar o apoio de um projetista ou operador de forno profissional ou qualificado.
- Garanta a segurança!
- Evite incêndios e queimaduras.

- Não respire a fumaça ou o pó do biochar, pois podem ser tóxicos.
- O gás proveniente da pirólise pode explodir se misturado ao ar em espaço fechado.
- Assegure-se de que o biochar seja completamente resfriado e umedecido a 30% de umidade antes do armazenamento para eliminar a poeira e o risco de incêndio.

INTRODUÇÃO

A produção de biochar tem se tornado cada vez mais popular e agora há muitos projetos diferentes de reatores de biochar publicados na internet ou disponíveis para compra. Este capítulo tem como objetivo ajudá-lo a escolher um forno adequado, seja para comprar de um fornecedor, construir a partir de um projeto publicado ou desenvolver o seu próprio. Se você pretende comprar biochar, este capítulo o ajudará a entender como o método de produção pode afetar algumas propriedades do biochar. O capítulo está dividido em cinco partes:

Parte 1: Categorias de reatores;

Parte 2: Métodos simples de fabricação de fornos para a produção de biochar;

Parte 3: Fornalhas para produção de biochar;

Parte 4: Fornos de batelada comerciais; e

Parte 5: Especificação de um reator de biochar e operação segura.

PARTE 1: CATEGORIAS DE REATORES

Os reatores ou pirolisadores de biochar são comumente chamados de fornalhas, ou fornos (menores ou maiores), de acordo com as definições comuns desses termos (consulte o quadro Terminologia). Entretanto, os reatores de biochar são especializados na produção de biochar e devem ser projetados para:

- Ser fácil de carregar e descarregar;
- Lidar com calor elevado;
- Queimar ou separar os gases liberados sem poluição;
- Atender às normas locais de emissões;
- Ser seguro para operar; e
- Utilizar preferencialmente energia residual como fonte de aquecimento.



Terminologia

Fornalha é um espaço fechado no qual o combustível é queimado para fornecer aquecimento, seja para aquecer a própria fornalha e o espaço no qual ela está situada, seja para aquecer itens colocados na fornalha.

Um **forno** é uma câmara com isolamento térmico para o aquecimento de uma substância. Um forno é um tipo especializado de estufa que produz temperaturas suficientes para concluir algum processo, como secagem ou mudança química.

Uma **retorta** é um recipiente no qual as substâncias são aquecidas externamente, geralmente produzindo gases a serem coletados ou processados posteriormente.

Um **reator** é um recipiente projetado para conter e controlar reações.

Um **pirolisador** é um reator projetado para a decomposição térmica de biomassa em um ambiente de oxigênio limitado (pirólise).

Um **gaseificador** é um reator no qual o ar é intencionalmente injetado no processo para produzir uma quantidade maior de pirogás mais limpo. Normalmente, ele opera em uma temperatura mais alta do que um pirolisador.

O biochar pode ser produzido de várias maneiras, com diferentes vantagens e desvantagens. A escolha do reator depende de muitos fatores, inclusive matéria-prima, escala e orçamento. Para ajudá-lo a selecionar um reator que seja adequado às suas necessidades e condições, a Tabela 3.1 descreve as principais categorias e considerações na escolha de um reator de biochar. A Tabela 3.2 apresenta as principais características operacionais e faixas de custo. Essas informações devem ser usadas em conjunto com as informações dos capítulos seguintes sobre as propriedades do biochar, biochar aprimorado e restrições do solo.

Tabela 3.1 – As principais categorias e características dos reatores de biochar

<p>Aquecimento direto (pirólise de chama)</p> <ul style="list-style-type: none"> • A energia para a pirólise da matéria-prima vem da ignição direta em um forno ou da queima a céu aberto. ✗ Um antigo método poluente está queimando no ar de forma limitada. ✓ Um método melhor é a pirólise por chama, em que os gases queimam em excesso de ar e as chamas protegem o carvão. 	<p>Aquecimento indireto (retortas)</p> <ul style="list-style-type: none"> • O calor externo é aplicado a um recipiente contendo biomassa. • O pirogás da retorta é enviado para um queimador separado, que aquece externamente a retorta, ou a exaustão quente do queimador pode ser passada através da biomassa. ✓ Permite melhor rendimento e controle de temperatura.
<p>Pirólise óxica</p> <ul style="list-style-type: none"> • O oxigênio está presente (necessário para a pirólise de chama). • Temperatura mais alta. • Os minerais e o C são oxidados, o que faz com que o biochar tenha maior área de superfície e adsorção. 	<p>Pirólise anóxica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nenhum ou pouco oxigênio é admitido no reator. • Típico em uma retorta aquecida externamente. • Pode ter um rendimento maior. • O oxigênio controlado pode ser injetado se ou quando necessário.
<p>Fornalhas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Projetadas para aplicar calor a um dispositivo para cozimento. • O gás de síntese se separa do carvão e se inflama em um queimador. • Normalmente, a produção é em escala de pequenos subgrupos, mas pode ser maior. 	<p>Fornos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Termo comumente aplicado a dispositivos em bateladas. • O calor não é facilmente aplicado a outros usos (integração térmica), mas sempre que possível deve ser reaproveitado.

<p>Pirolisadores de batelada</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carregue com biomassa, processe completamente e depois descarregue. ✓ As vantagens são o baixo custo, a capacidade de usar matéria-prima maior, a facilidade de operação e a portabilidade. ✓ Baixas emissões, quando bem projetados e bem operados. ✗ Ciclos de aquecimento ou resfriamento entre o carregamento e o descarregamento levam a condições de produção e emissões variáveis. 	<p>Pirolisadores contínuos</p> <ul style="list-style-type: none"> • A biomassa é alimentada em uma extremidade da linha de produção, enquanto o biochar é continuamente descarregado pela outra. ✓ Proporcionam uma maior produtividade com uma determinada quantidade de equipamentos e mão de obra. ✓ Podem funcionar de forma constante, proporcionando mais controle sobre as condições do processo de biochar e menos emissões.
<ul style="list-style-type: none"> ✗ Inadequados para produção em larga escala devido à mão de obra intensiva para a operação e à baixa produtividade por máquina. ✗ Inadequados para matéria-prima fina, como serragem e esterco. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usados para produção industrial em larga escala, acima de 100 kg/hora, e podem processar matérias-primas finas. ✗ Mais complexos e caros.
<p>Pirolisadores fixos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalados em locais fixos para os quais a biomassa é levada e que podem incluir instalações para armazenamento e processamento da biomassa. ✓ Pode ser maior e mais barato do que um pirolisador móvel. 	<p>Pirolisadores móveis</p> <ul style="list-style-type: none"> • Transportado para o local da biomassa. ✓ Produz biochar para ser usado no local e evita o transporte de biomassa, que normalmente é três vezes mais pesada e volumosa do que o biochar resultante.
<p>Matéria-prima com pedaços maiores</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pedaços maiores, como troncos, galhos, costaneiras de desdobro de madeira, retalhos de assoalho e pedaços maiores de casca de árvore. ✓ prontamente disponível e pode ser processada mais rapidamente do que a biomassa fina. A matéria-prima de grandes dimensões é frequentemente usada na produção de biochar em larga escala. 	<p>Matéria-prima fina</p> <ul style="list-style-type: none"> • Em pó ou granulado, como serragem, casca de arroz, cascas de nozes, esterco e lodo de esgoto seco. ✓ Pode ser aquecida de forma rápida e uniforme durante a pirólise. ✓ Produz um biochar homogêneo e granular. ✓ É mais fácil de transportar, armazenar e manusear do que a biomassa em partículas grandes.

<p>Pirolisadores manuais de biochar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dependem de trabalho manual para aumentar a biomassa no reator, remover o biochar e ajustar os parâmetros. ✓ Simples e de baixo custo, mas mais tempo e esforço para operar. ✗ A qualidade do biochar depende da habilidade do operador. 	<p>Pirolisadores automáticos de biochar</p> <ul style="list-style-type: none"> • Usam tecnologia avançada, monitoramento e sistemas de controle. ✓ Eficientes e consistentes na produção de biochar de alta qualidade, com menos trabalho e intervenção do operador. ✗ Mais caros e podem exigir um operador qualificado.
<p>Pirolisadores (faça você mesmo) Construídos por indivíduos e fazendeiros com recursos limitados, usando projetos e materiais simples.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geralmente são operados manualmente. • Podem não ser aprovados por governos locais ou estaduais. 	<p>Pirolisadores comerciais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Várias marcas e modelos disponíveis. • Podem variar em tamanho, desde modelos de bancada até grandes sistemas em escala industrial. • Podem ter controles e manuseio de materiais automatizados.

Principais conclusões

- O aquecimento direto é uma pirólise oxidativa que ocorre em temperatura de tratamento térmico mais alta, tem menor rendimento, maior teor de Carbono e mais oxigênio na superfície do biochar.
- O aquecimento externo ou indireto da biomassa em uma retorta pode ser não-redutivo ou não-oxidativo, com a capacidade de produzir um rendimento maior de biochar de baixa temperatura. O oxigênio ainda pode ser admitido no forno em um estágio final para “finalizar” o biochar e produzir características de biochar oxidado de temperatura mais alta.
- Deve-se escolher um reator adequado para a matéria-prima e vice-versa. As matérias-primas finas geralmente são mais bem processadas em pirolisadores de alimentação contínua. As matérias-primas volumosas podem ser convenientemente processadas em um forno com tampa de chama. O gaseificador Top-Lit UpDraft (TLUD), operado em bateladas, requer uma matéria-prima uniforme e granular, como cascas de nozes, pellets ou lenha.
- Se os recursos para aquisição da unidade de produção forem limitados, a matéria-prima deverá ser adquirida ou processada de acordo com a necessidade do equipamento. A matéria-prima volumosa pode ser cortada ou moída, enquanto a matéria-prima fina, como serragem ou resíduos agrícolas, pode ser peletizada.

Tabela 3.2 – Características de várias categorias de reatores de biochar. Todas as categorias, dependendo do projeto, podem ter aquecimento interno ou externo; podem variar em baixas a altas emissões; e podem usar madeira ou resíduos agrícolas. Os bio sólidos e os adubos geralmente exigem máquinas contínuas. Todas as faixas numéricas são aproximadas. TMA= Temperatura máxima de aquecimento.

Tipo	Tipo de matéria-prima, kg de biochar produzido por tempo	Emissões de CO e NOx. TMA do biochar	Geração de calor (th) Eletricidade (el)	Facilidade de uso	Custo estimado e vida útil
Fornalhas	Madeira seca e resíduos agrícolas, 0,5-1 kg em três ciclos de processamento/dia	300-5.000 ppm TMA 350-500 °C	2-10 kWth	Fácil de operar	\$10-300 1-5 anos
Fornos de batelada - portáteis/ transportáveis	Madeira úmida ou seca e resíduos agrícolas, 10-1.000 kg em 4-24 h	100-5.000 ppm TMA 350-600 °C	50-200 kWth	Fácil de operar, necessita de 1 a 3 dias de treinamento	\$100- \$500.000 2-10 anos
Fornos de batelada - fixos	Madeira úmida ou seca e resíduos agrícolas 100-2.000 kg/8-24 h	100-5.000 ppm TMA 350-700 °C	50-2.000 kWth	Carga/descarga difícil; Requer operador qualificado	\$2.000- \$60.000 2-10 anos
Fornos contínuos - portáteis/ transportáveis	Madeira úmida ou seca e resíduos agrícolas 100-300 kg/h	100-1.000 ppm TMA 350-600 °C	200-500 kWth 20-100 kWth	Requer um grau razoável de habilidade	\$60.000- \$500.000 3-10 anos
Fornos contínuos - fixos	Madeira úmida ou seca e resíduos agrícolas 200-10.000 kg/h	50-1.000 ppm TMA 350-800 °C	200-4.000 kWth 50-1.000 kWth	Requer um alto grau de habilidade	\$350k-\$10m sem eletricidade

PARTE 2: MÉTODOS ARTESANAIS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCHAR

Esta seção se concentra em métodos artesanais simples do tipo “faça você mesmo” para a produção de biochar, que, se implementados adequadamente, são seguros, eficazes e pouco poluentes. O capítulo aborda opções para pirólise de matérias-primas volumosas ou finas, produção de complexos minerais de biochar (modernizando os métodos tradicionais) e produção de extrato pirolenhoso.

Para o uso em hortas urbanas, geralmente é desejável uma máquina de biochar simples e compacta. Uma fazenda pode exigir um forno fechado maior e mais caro para uma produção eficiente. O usuário precisa estar ciente e cumprir todos os requisitos ou limitações específicos impostos pelas autoridades locais sobre o uso desses dispositivos. Não se pode produzir biochar quando houver proibições de uso de fogo na área. As medidas de segurança incluem separar a área de queima de materiais inflamáveis e ter à mão meios de supressão de incêndio, como água ou terra, pás, luvas e brigadistas.

Métodos de cobertura de chama aberta

O forno mais comum em uso é o Kon-Tiki. O forno é um avanço em um método japonês usado há mais de 200 anos para produzir biochar a partir de madeira e bambu. A pirólise ocorre dentro do cone, enquanto a combustão dos gases emitidos ocorre acima da biomassa, formando uma capa de chama sobre o topo do cone. A biomassa pode ser adicionada continuamente através da tampa da chama até que o forno esteja cheio, o que permite que o volume do contêiner seja totalmente utilizado. O forno em uso e os princípios de operação são mostrados na Figura 3.1.

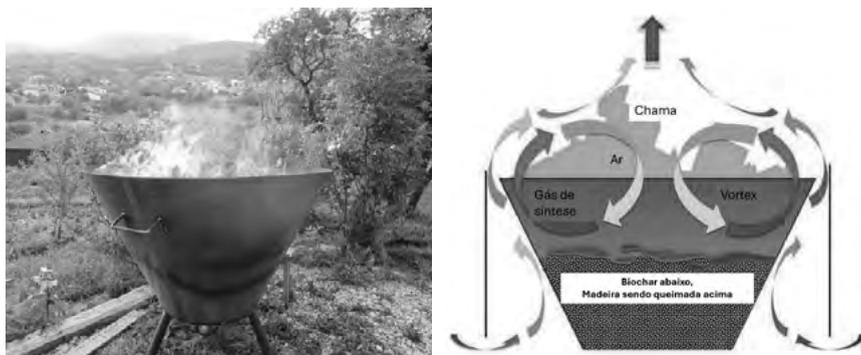


Figura 3.1 – À esquerda: O Kon-Tiki original de cone profundo com 1,5 m de diâmetro (volume de 900 L), desenvolvido no Ithaka Institute na Suíça. A tampa da chama queima os gases de forma limpa e protege o carvão do oxigênio. **À direita:** Dinâmica de convecção do Kon-Tiki. A corrente de ar que passa pela borda do forno arrasta um vórtice rolante para dentro do forno. Isso puxa o ar para o centro do forno, fornecendo ar primário para a pirólise. Os gases e a fumaça liberados da zona de pirólise são capturados no vórtice e misturados com o ar na zona de chama para uma combustão mais limpa. Um escudo térmico (opcional) que envolve o forno fortalece a dinâmica de vórtice natural do Kon-Tiki e torna a operação do forno mais confortável e eficiente. (Foto: Paul Taylor, Hans Peter Schmidt.)

Um cone de 1,2 m de diâmetro de borda, com um volume de 375 L, pode ser enrolado a partir de uma única chapa de aço de 1,2 m x 2,4 m. Um cone maior pode ser criado enrolando-se dois meios cones a partir de duas dessas chapas, que são então soldadas para formar um cone de até 1,65 m e volume de até 1.100 L. O projeto original do Kon-Tiki (Fig. 3.1) incluía uma base soldada (plana ou ligeiramente abobadada) com um tubo de drenagem curto e uma válvula para permitir a inundação do fundo com água de resfriamento ou soluções nutritivas e para drenagem. No entanto, os fornos com tampa de chama podem ser tão simples quanto um tambor (de preferência com mais de 0,7 m de diâmetro), um anel de fundo aberto assentado no chão, uma fogueira de fundo fechado ou até mesmo um furo no chão. Os fornos do tamanho de um tambor exigirão pedaços de madeira menores, enquanto um recipiente de 1,6 m de diâmetro pode pirrolisar toras de 100 mm, lembrando que esse tamanho pode levar de duas a três horas para pirrolisar completamente.

Um estudo que comparou as emissões de vários fornos com cobertura de chama constatou que as emissões de monóxido de carbono, partículas finas e óxido de nitrogênio eram significativamente mais baixas nesses fornos do que nas retortas e nos fornos tradicionais.¹ Outros trabalhos mostraram

quase nenhuma emissão de metano (0-3,6 g/kg de biochar) para matéria-prima seca (<15% de umidade) composta de galhos e folhas.² A matéria-prima úmida (>40% de umidade), no entanto, gerou metano significativo (>500 g/kg de biochar), ressaltando a importância da preparação da matéria-prima. O Kon-Tiki é visivelmente sem fumaça quando utiliza material seco com uma boa cobertura de chama. Entretanto, a fumaça pode ser emitida quando a tampa da chama é perturbada quando o material é adicionado ao forno. A fumaça indica combustão incompleta, que seria acompanhada de emissão de metano. Para reduzir o impacto ambiental, é preciso desenvolver habilidades para minimizar a fumaça durante toda a operação de um forno tampa de chama ou de qualquer outro forno artesanal.

OPERAÇÃO DOS FORNOS KON-TIKI OU DE TAMPA DE CHAMA

Seja qual for a forma do forno, o gerenciamento do fogo é crucial para obter um alto rendimento de biochar, boa produtividade e poluição mínima. As instruções de operação a seguir podem ser complementadas com instruções on-line, como em www.youtube.com/user/TheBiocharRevolution



Preparação e acendimento do fogo:

- Reúna biomassa com um teor de umidade abaixo de 20%. O Kon-Tiki funciona melhor com material volumoso, como arbustos, galhos de madeira ou restos de carpintaria. O diâmetro ideal é de 25 a 35 mm. Prepare de duas a três vezes o volume do forno.
- Coloque o forno em uma superfície estável, bem longe de qualquer material inflamável.
- Certifique-se de que equipamentos e ferramentas de segurança, como água, pás e luvas, estejam à mão.
- No forno, faça uma pilha de gravetos secos.
- Acenda o graveto na parte superior para proporcionar um início mais limpo e com menos fumaça.
- Coloque gravetos no fogo para construir uma tampa de chama completa e um leito de fogo robusto.



Mantenha a tampa da chama e alimente as chamas:

- Adicione material a uma taxa que mantenha as chamas altas e a fumaça baixa. As chamas fortes queimam a fumaça, ajudam na secagem e na pirólise rápidas e protegem o carvão do O_2 .
- Comece com material pequeno, adicione qualquer material grande no meio da tiragem e, em seguida, afine para terminar com material pequeno. Dica: Aguarde cerca de 20 minutos por cm de raio para carbonizar totalmente a madeira.
- Se as chamas forem muito pequenas, alimente-as com material fino e seco. Se as chamas forem grandes, alimente com material maior ou mais úmido. Não apague as chamas e crie fumaça.
- Não deixe a queima sem supervisão. Mantenha o fogo forte.



Finalização da pirólise:

- Depois que o último combustível é adicionado, as chamas amarelas desaparecem, pois a maioria dos gases de pirólise foram despreendidos. Adicione pequenos gravetos, folhas, grama ou palha para manter a tampa da chama enquanto termina.
- Uma névoa de água pode ser borrifada para gerar vapor e hidrogênio, potencialmente ativando o carvão e levando a uma combustão mais limpa.



Resfriamento:

- Inunde o carvão quente com água por meio de um dreno inferior. O vapor que é expelido e reabsorvido racha o carvão e ativa as superfícies. Como alternativa, o carvão quente de cima para baixo até esfriar e verifique a cada meia hora se há calor ou fumaça.
- Você pode adicionar nutrientes à água de resfriamento, incluindo pó de rocha, esterco e ácidos (fosfórico, acético ou de enxofre) para neutralizar o pH.
- Para preservar os microrganismos do esterco, ele pode ser misturado à pasta de biochar depois que a massa esfriar.



Processamento do biochar:

- O Kon-Tiki pode ser drenado durante a noite ou, se for temperado com uma solução rica em nutrientes, pode ser deixado durante a noite para carregar o biochar.
- Colete a “água de fumaça” rica em produtos químicos ou a água de nutrientes para reutilização. Escolha as diluições adequadas e teste antes de aplicar nas plantas.
- Quando estiver frio, descarregue a estufa e espalhe o carvão para secar por mais de dois dias.
- O biochar de madeira na Kon-Tiki terá, em sua maioria, um tamanho de 10 a 30 mm. Triture o biochar para partículas de ≤ 2 mm de tamanho para aplicação no solo. Uma maneira rápida e completa de triturar o biochar é usar um triturador de martelo.

PRODUÇÃO DE COMPLEXOS BIOCHAR-ORGANO MINERAIS NO KON-TIKI

Há várias maneiras fáceis de gerar formas aprimoradas de biochar no Kon-Tiki, incluindo a adição de nutrientes e produtos químicos à água de resfriamento, conforme mencionado acima. Ao queimar uma fornalha de tampa de chama com ingredientes adicionais, é possível produzir complexos de biochar-organo-mineral (BOMC, consulte o Capítulo 7). A seguir, apresentamos três métodos utilizados pelos autores.

1. Apague as chamas cobrindo-as com terra

Após a conclusão da operação normal do Kon-Tiki, o carvão foi apagado com camadas de composto, terra e argila vermelha. Uma camada de biochar (não completa na foto) foi adicionada para absorver qualquer fumaça que escapasse. O carvão continuou a arder a 350 °C por três dias sem fumaça. (Observação: Apagar o fogo com uma camada espessa de terra é uma alternativa ao apagamento com água, especialmente para um forno ou poço queimado no campo ou na floresta sem água disponível).



<p>2. Ingredientes diretamente no Kon-Tiki</p> <p>Uma vez estabelecido um fogo com forte chama e um leito de brasas, foram adicionadas camadas de lascas de madeira, esterco de galinha e argila. Observação: As lascas de madeira, a menos que estejam muito secas, não são o combustível ideal para o Kon-Tiki, pois exigem a adição de pedaços de madeira seca para manter uma boa chama e queimar a fumaça.</p>	
<p>3. Ingredientes de fogo em uma retorta, aquecidos no Kon-Tiki</p> <p>Uma mistura de ingredientes (lascas de madeira, palha, argila vermelha, esterco e minerais) foi misturada em tambores. Os tambores eram fechados parcialmente para que o gás de síntese pudesse escapar e colocados em um Kon-Tiki no meio de seu funcionamento, onde eram aquecidos a 500 °C. As adições de lenha ao Kon-Tiki continuaram até que os tambores estivessem cobertos de carvão, resultando em 700 L/116 kg de biochar Kon-Tiki (rendimento em massa de 15% em base seca) e 86 kg de BOMC retornado.</p>	

PIRÓLISE DE QUEIMA ABERTA COM CHAMA SUPERIOR

A pirólise de queima aberta Top-Lit (ou pirólise de pilha) é uma técnica que pode ser usada no gerenciamento de propriedades e na silvicultura para lidar com pilhas acumuladas de resíduos de poda ou limpeza, quando um forno é inconveniente ou não é econômico. Também chamada de “queima de conservação”, essa técnica foi ensinada a fazendeiros e silvicultores no oeste dos EUA para reduzir as emissões da queima de arbustos e da queima de árvores.

Para produzir biochar substancial de forma limpa, em vez de principalmente cinzas, a pirólise com chama superior difere de uma pilha de queima padrão em quatro aspectos:

1. Para a pirólise de biomassa empilhada, é vantajoso fazer a pilha para torná-la mais uniforme, aberta e contida.
2. A pilha é acesa na parte superior para que os gases de síntese sejam liberados abaixo da chama. Uma pilha de queima normal acesa por baixo pode gerar muita fumaça porque as chamas aquecem o material acima, liberando gases que escapam das chamas.

3. A pulverização estratégica de água é usada para resfriar qualquer carvão que esteja exposto ao ar e, portanto, à incineração.
4. Depois que as chamas se apagam, as brasas são apagadas com água ou resíduos para preservar o carvão.

Um método alternativo para lidar com pilhas de arbustos ou arbustos espalhados é alimentar o material sequencialmente em um fogo aberto. Uma vantagem dessa abordagem é que ela pode ser gerenciada para produzir uma queima mais estável com menos fumaça. Nesses métodos de queima a céu aberto, grande parte do carbono é convertida em CO₂ e a porcentagem de produção de biochar é relativamente pequena, embora muito maior do que se o fogo fosse iniciado a partir do fundo da pilha.

Uma abordagem mais controlada, limpa e conservadora, com maior rendimento de biochar e renda potencial, é acender o fogo em um poço e continuar a alimentá-lo até que o poço esteja cheio de biochar, gerenciando o fogo da mesma forma que um forno Kon-Tiki (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Queima aberta com chama superior em um poço. A colocação de gravetos no fogo continua até que o forno esteja cheio de carvão. (Foto: Pacific Biochar - pacificbiochar.com/open-pit-biochar-production)

PARTE 3: FORNALHAS PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR

A grande dependência da biomassa para cozinhar e aquecer contribui para uma série de impactos negativos, incluindo o desmatamento, a poluição do ar em ambientes fechados e problemas de saúde, principalmente para mulheres e crianças que passam a maior parte do tempo na cozinha. O uso de fogões mais eficientes e de queima mais limpa, que podem ser operados para produzir biochar, pode ajudar a reduzir esses impactos negativos e, ao mesmo tempo, proporcionar o sequestro de carbono e promover a saúde do solo e dos alimentos por meio da produção e aplicação de biochar no solo.

Os dois principais tipos de fogões de produção de biochar são os gaseificadores TLUD e os fogões de retorta.

Gaseificador de corrente ascendente com chama superior (TLUD)

O TLUD foi projetado para lidar com matéria-prima de partículas uniformes, como cascas de nozes, pellets de madeira, casca de arroz e lascas de madeira seca. Ele é chamado de gaseificador porque o ar primário é alimentado na frente da pirólise para gaseificar a biomassa, e o gás pode se separar da biomassa e queimar de forma limpa no excesso de ar. Os princípios de operação estão detalhados abaixo.

O fogo é aceso no topo de uma coluna de combustível de biomassa.

Uma zona de incandescência quente desce pelo leito de combustível estacionário, convertendo a biomassa em biochar e liberando gás de síntese.

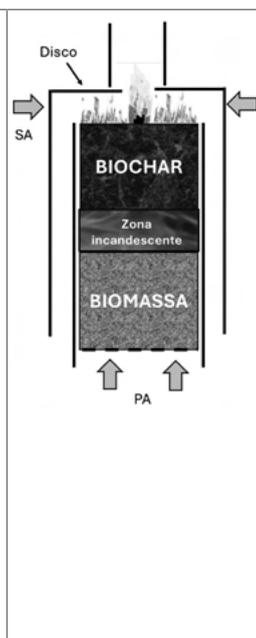
O ar primário (PA) entra na parte inferior da câmara de combustível e flui para cima através do leito de combustível. O volume do fluxo é limitado, de modo que apenas uma parte do gás liberado é queimada.

A mistura de gás quente que se move para cima tem pouco oxigênio restante para oxidar o carvão.

Os gases quentes da pirólise, a fumaça e os alcatrões que sobem pelo carvão quente são quebrados em moléculas menores, emergindo como gás para uso doméstico.

O excesso de ar secundário (SA) é introduzido abaixo de um disco concentrador e se mistura com os gases à medida que eles passam pelo orifício, resultando em uma chama de queima limpa.

- Uma chaminé cria uma corrente de ar para o PA e o SA.
- Vários arranjos mais sofisticados de “queimadores” foram desenvolvidos para otimizar a combustão limpa.



O princípio do TLUD foi aplicado principalmente a pequenos fabricantes de biochar, utilizando tambores de 200 litros. Os TLUDs podem ser fabricados a partir de latas e tambores reciclados usando projetos disponíveis on-line. Os TLUDs também estão disponíveis comercialmente em vários tamanhos para diferentes tipos e necessidades de biomassa (Figura 3.3). Se a biomassa disponível for cavacos de madeira, cascas de nozes ou outra biomassa particulada, então os TLUDs maiores são bons candidatos de baixa tecnologia e baixo custo para a produção de biochar. Uma vez iniciado, o TLUD geralmente precisa de pouca atenção até que a pirólise seja concluída, normalmente após uma ou duas horas. Uma única pessoa pode iniciar vários TLUDs de tambor de 200 litros e gerenciar sua conclusão em sequência, produzindo quase dois metros cúbicos em um dia.



Figura 3.3 – Fogões de cozinha com gaseificador para fabricação de biochar. **1.** Fogão Champion TLUD desenvolvido por Paul Anderson e fabricado pela Servals na Índia. **2.** FabStove, um avanço do Champion acionado por ventilador, fabricado na África do Sul e disponível on-line. **3-6.** Uma linha de gaseificadores desenvolvida e fotografada por Paul Olivier no Vietnã: **3.** Fogões domésticos com 250, 500 e 800 mm de altura. **4.** Gaseificador de 800 mm de altura, 500 mm de diâmetro e 80 kW com vários queimadores. **5.** Queimador de fio de nicromo no gaseificador funcionando com pellets de algaroba. **6.** Gaseificador de 1200 mm de altura com iluminação inferior e tempo de funcionamento de 8 horas.

RETORTA

Em uma retorta, o calor de um queimador de madeira é utilizado para acionar a pirólise de matérias-primas colocadas em uma câmara de retorta separada. Os gases liberados da retorta passam por orifícios para a câmara de combustão, onde entram em combustão para fornecer calor para continuar a pirólise e para o processamento. O biochar de alta temperatura é produzido na câmara de queima e em baixa temperatura (cerca de 450 °C) na retorta. O arranjo tem flexibilidade de matéria-prima e flexibilidade de processamento. Por exemplo, gravetos de madeira ou espigas de milho podem ser usados no queimador, enquanto outras matérias-primas disponíveis, como misturas de resíduos de colheitas, adubos e minerais para a fabricação de complexos minerais de biochar, são usadas na retorta. Depois que a retorta terminar de emitir gases, o cozimento pode ser continuado, se necessário, bastando adicionar mais lenha fina combustível ao queimador. Os autores desenvolveram várias versões de retortas, uma das quais é ilustrada na Figura 3.4. Os esquemas desses equipamentos podem ser obtidos com os autores.

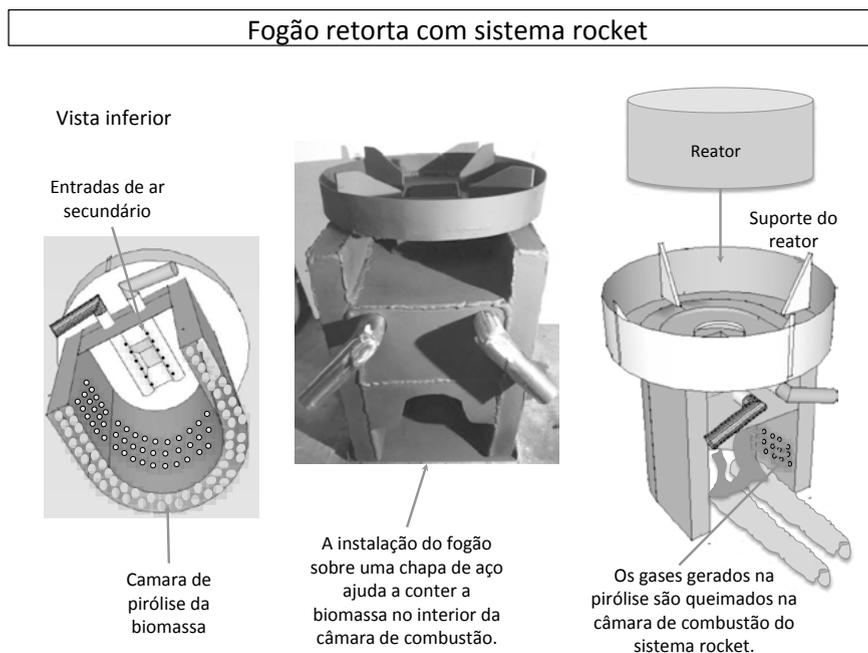


Figura 3.4 – Retorta usada para pirólise de casca de arroz. (Foto: Stephen Joseph.)

PARTE 4: FORNOS COMERCIAIS

Fornos comerciais em batelada

Os fornos de batelada são produzidos e vendidos para a produção de biochar há mais de 100 anos. Há pelo menos três fabricantes na Austrália. Há vários outros fornos de batelada em operação na Austrália que foram comprados no exterior.

Visite biochar-us.org/biochar-systems-and-equipment-manufacturers para conhecer os fornos produzidos nos EUA. Para a Europa, acesse energy-xprt.com/companies/keyword-biochar-15990/location-europe.

Muitas empresas na China produzem fornos em lote e podem ser acessadas pela internet. Há poucas informações disponíveis sobre seu histórico de funcionamento.

Terra Preta Developments - Kon-Tiki

A Terra Preta Developments fabrica o Stretched Kon-Tiki. Com um volume de 1,85 m³, em um forno basculante para facilitar o descarregamento, ele foi projetado para fazendeiros, empreiteiros ou proprietários de terras.



Figura 3.5 – Modelo comercial do Kon-Tiki Kiln, produzido pela Terra Preta Developments Pty, Ltd. (www.terrapretadevelopments.com.au/products/kon-tiki-tas-deep-cone-kilns/kon-tiki-tas-stretch-deep-cone-kiln.)

Retorta móvel da empresa Carbon Offset Zone

A tecnologia de pirólise móvel da Carbon Offset Zone oferece uma solução econômica para a conversão de biomassa em biochar, que pode ser usada para compensações de carbono e outras aplicações. As retortas móveis Series II e Series III também são capazes de coletar ácido pirolenhoso. Elas podem processar uma variedade de matérias-primas, incluindo galhos inteiros, resíduos de culturas e toras rachadas. Essas unidades utilizam aproximadamente 10-15% de sua matéria-prima para iniciar a pirólise completa, seguida de uma produção autossustentável. Elas podem ser facilmente montadas em um trailer, não requerem energia ou combustível externos e podem ser operadas por uma única pessoa. A empresa vende pacotes de planos que incluem desenhos em CAD e layouts para corte a plasma ou oxicorte, pré-perfuração e montagem, além de consultoria de construção e procedimentos operacionais seguros.



Unidade móvel de pirólise	Series II	Series III
Capacidade	1.4 m ³	3 m ³
Entrada de madeira por batelada	450 kg	900 kg
Saída de biochar	0.9 m ³	2 m ³
Biochar triturado	0.45 m ³	1 m ³
Rendimento de biochar por batelada	90 kg	200 kg
Ácido pirolenhoso por batelada	9 litros	20 litros
Tempo de pirólise	6–10 h	8–12 h
Tempo para o sistema se tornar autossustentável em combustível	3 h	2 h
Bateladas necessárias para obter 1 ton de Biochar	15	5

Figura 3.6 – Retorta móvel Carbon Offset Zone Série III em um trailer (do site carbonoffsetzone.com).

O Big Roo

O Big Roo foi projetado para palha degradada, ervas daninhas e outras biomassas fibrosas, bem como para madeira. Ele pode ser uma instalação fixa ou rebocado por um veículo utilitário. A gaiola é preenchida com biomassa, o reator é movido para cobrir a gaiola e o fogo é aceso na parte superior. O soprador fornece um equilíbrio de ar abaixo e acima da gaiola para manter a pirólise e queimar os gases voláteis (consulte o Capítulo 3 e a Tabela 1).



Figura 3.7 – O forno portátil de quatro metros cúbicos Big Roo projetado para palha. (para obter mais informações acesse: www.allthingsbiochar.com.au)

Forno de carbonização da Ucrânia

O forno de carbonização da Ucrânia é um forno do tipo retorta projetado para o processamento de madeira em toras e resíduos vegetais briquetados. O forno consiste em duas câmaras conectadas a um forno com pós-combustor e chaminé. A biomassa é carregada em cestos com rodízios, que são rolados para dentro das câmaras. As câmaras podem alternar entre secagem e pirólise. Os gases combustíveis liberados da câmara de pirólise são direcionados para o forno, que divide o calor de volta para as câmaras de secagem (com vapor liberado para a atmosfera) ou para manter a pirólise.



Figura 3.8 – Forno de carbonização da Ucrânia, Ekko-2.

Empresa Earth Systems – Fabricante de Carvão Planta Móvel de Pirólise

O CharMaker MPP (Mobile Pyrolysis Plant) da Earth Systems é uma tecnologia de pirólise em bateladas transportável aplicável a troncos ou biomassa lenhosa de tamanho pequeno; não é necessário lascar a biomassa. O Char-maker MPP é fornecido em dois tamanhos: um container de 6 m e 12 m de comprimento, que foram vendidos na Austrália e em outros países. Mais de 20 matérias-primas foram testadas, algumas com umidade acima de 50%. A tecnologia pode ser usada para produzir carvão vegetal padrão, bem como biochar

com conteúdo de carbono >90%. Uma batelada leva aproximadamente cinco horas para ser concluída, dependendo do tamanho e da umidade da madeira.



Figura 3.9 – Empresa Earth Systems - Fabricante de Carvão Planta Móvel de Pirólise PMP. Para obter mais informações, visite thecharmaker.com

Fornos comerciais contínuos

Existem alguns fabricantes de fornos contínuos na Austrália e também muitos fornos produzidos na Europa, América do Norte, Japão e China. Uma lista de fabricantes e fornecedores de equipamentos de biochar pode ser obtida na ANZBIG. A seguir, um breve resumo.

Pirolisador open-source

Um pirolisador de calha de projeto de código aberto foi desenvolvido por um dos autores em colaboração com a Cornell University. Várias empresas, incluindo Energy Farmers P/L, Allthingsbiochar e Carbon Powered Minerals Technology and Products, fabricam, operam e vendem versões desse forno.

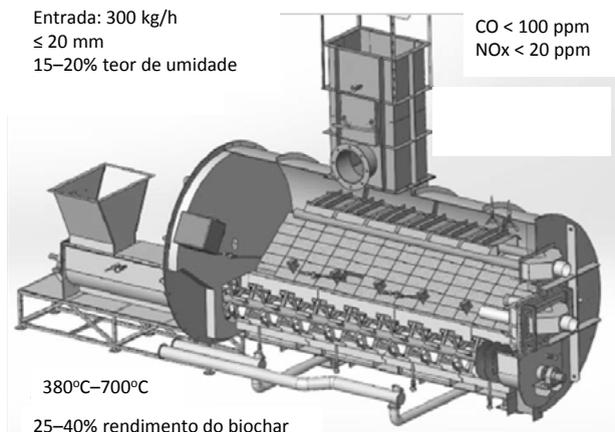


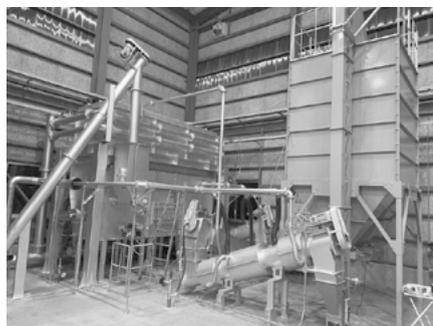
Figura 3.10 – Um pirolisador de calha projetado por S e B Joseph.

O método de operação é o seguinte:

Um queimador pré-aquece a câmara, e a biomassa é transportada para a calha por uma rosca sem fim onde é processada. O ar primário entra por meio de jatos logo acima das calhas para iniciar o processo de pirólise. O gás de síntese da biomassa pirolisada sobe, mistura-se com o ar secundário e terciário e entra em combustão acima do leito. O fluxo sobre o leito seca e pirolisa o material à medida que ele se move ao longo da calha. A biomassa pirolisada é continuamente girada e movida ao longo da calha por meio de um sistema combinado de pás revolvedoras e roscas alimentadoras. Quando a temperatura do forno atinge 650 °C, o ar primário é desligado. Quando a temperatura acima da calha atinge 850 °C, é injetada água para produzir uma chama translúcida e muito limpa. Alterando a taxa de alimentação, a quantidade de ar primário e a taxa de névoa de água no leito servem para controlar a temperatura do biochar.

Pirolisador de calha

Um dos primeiros fornos modernos para casca de arroz e serragem foi um forno de pirólise de calha desenvolvido pela Kansai Corporation no Japão em 1960 (www.kansai-sangyo.co.jp/en/products-page). Mais de 200 unidades desses fornos foram construídas e usadas no Japão. A empresa também fabrica fornos rotativos de pirólise de cavacos de madeira.



Especificações

Tipo	LM-900
Alimentação	900 kg/h (casca de arroz)
Capacidade de produção	220 kg/h (biochar)
Dimensões	12 (C) × 7 (L) × 8 (A) m
Peso	16 toneladas
Potência	13 kW
Água de resfriamento	50 L/min
Opcionais	Enfardadeira automática

Figura 3.11 – Forno contínuo Kansai para casca de arroz e serragem.

Earth Systems CharMaker CPP

A Earth Systems agora está fabricando sistemas de pirólise contínua alimentados externamente. O CharMaker CPP (Continuous Pyrolysis Plant) consiste em um forno, câmara de pirólise, câmara de oxidante térmica de baixa emissão e um painel de controle. A CharMaker CPP foi projetado para pirolisar eficientemente biomassa de pequenas partículas em biochar de alta qualidade e foi testado com diversas matérias-primas, incluindo cascas de arroz, cobertura vegetal, resíduos verdes úmidos e secos, caroços de azeitona, pellets de madeira, pellets de composto e biossólidos (lodo). O CPP opera com aproximadamente 200 a 2.000 kg/h de entrada de matéria-prima, dependendo da escala da unidade. Em uma base seca, ele converte aproximadamente 25% da matéria-prima em biochar e, se usado em conjunto com uma opção de pré-secador, pode lidar com matérias-primas com 50% de umidade. Um oxidador térmico sofisticado torna a tecnologia adequada para fontes de biomassa contaminada. As unidades CPP podem ser implantadas com recuperação de energia térmica e recuperação de líquidos condensados em um arranjo fixo de centro de bioenergia.



Figura 3.12 – Earth Systems CharMaker PPC (Planta de Pirólise Contínua). Para obter mais informações, visite <https://thecharmaker.com>

Metamorf CHARCELL™

A tecnologia patenteada CHARCELL™ utiliza o calor da zona de combustão de gases voláteis para pirolisar o material sólido alimentado. O ar de combustão controla a atmosfera e as temperaturas do processo, garantindo a combustão completa com baixas emissões. Os sólidos não queimados são misturados com água e descarregados como biochar, retendo o conteúdo de

cinzas dos materiais de alimentação. O gás de combustão limpo e quente pode substituir os combustíveis fósseis ou gerar eletricidade. A tecnologia permite o controle da pirólise para obter propriedades específicas de biochar, como tamanho dos poros, teor de carbono (>90%), capacidade de retenção de água e rendimento. Ela também pode transformar o biochar em carvão ativado por meio de um processo de ativação de baixa temperatura em colaboração com o parceiro tecnológico Bygen. A tecnologia CHARCELL™ é adequada para diversas matérias-primas, apresenta baixas emissões de gases de escape, baixo ruído e baixo consumo de eletricidade, além de ser totalmente automatizada para produção 24 horas por dia, com monitoramento e suporte remotos. As capacidades modulares incluem o CHARCELL™ THREE, com uma taxa de alimentação de 600 kg/h e produção de calor de 600 a 1050 kW, e o CHARCELL™ FOUR, com uma taxa de alimentação de 2.500 kg/h e produção de calor de 2.500 a 4.500 kW. A Metamorf pode fornecer soluções completas e prontas para uso, desde o projeto e a engenharia iniciais até o fornecimento, a construção, a instalação e o gerenciamento de projetos.



Figura 3.13 – Tecnologia CHARCELL THREE™ da Metamorf. Para obter mais informações, visite metamorf.engineering.

Sistema Pyrocal CCT

O sistema CCT da Pyrocal é otimizado para produzir biochar e energia a partir de biomassa de resíduos agrícolas e florestais, como cascas de nozes e cavacos de madeira, e biossólidos do processo de tratamento de esgoto. Recentemente, uma usina de biochar de biossólidos foi comissionada em uma estação de tratamento de esgoto em Logan, Queensland, Austrália.³

O projeto básico da tecnologia é apresentado na Figura 3.14. A matéria-prima é dosada continuamente na plataforma superior de um gaseificador

de tambor rotativo, onde entra em contato com o gás quente (1). A biomassa seca é arrastada por uma série de plataformas perfuradas, carboniza-se, quebra-se e cai pelas plataformas (2). Os pedaços maiores são arrastados para orifícios maiores, o que permite um tempo de residência mais longo (aproximadamente 120 segundos em um forno de três decks). O biochar sai no nível mais baixo (3). Uma pequena fração dos voláteis liberados da matéria-prima queima em uma quantidade controlada de ar que entra na parte inferior (A). Os gases quentes ascendentes, sem oxigênio (B), secam e aquecem o combustível. Os perfis de temperatura e oxigênio no forno são controlados para obter o rendimento e a qualidade desejada do biochar. Os gases residuais inflamáveis saem (C) e queimam completamente em CO_2 e H_2O em um oxidador térmico. Recuperador de calor e controles de emissões a jusante podem ser incluídos no sistema. Os sistemas de controle e monitoramento programáveis permitem a operação autônoma.

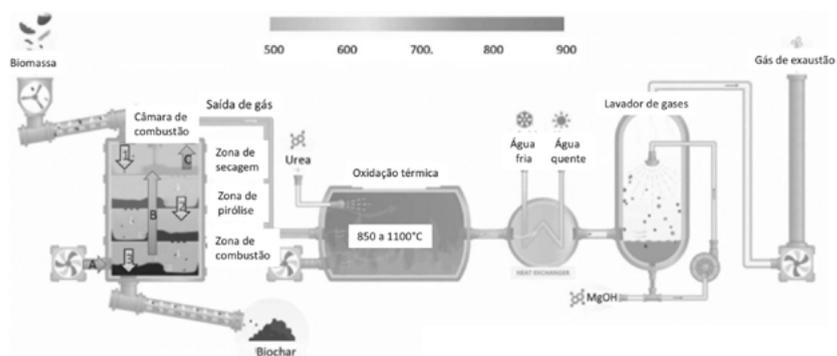


Figura 3.14 – O componente central do sistema Pyrocal CCT é o gaseificador de soleira rotativa. Os componentes a jusante asseguram a combustão completa dos gases, a recuperação de calor e o controle das emissões. **Abaixo:** versão móvel inicial do gaseificador de soleira rotativa da Pyrocal. Para mais informações, visite: www.pyrocal.com.au

Gaseificador de parafuso Rainbow Bee Eater

A empresa Rainbow Bee Eater fabrica um gaseificador de parafuso que produz um gás de síntese de queima limpa para fornecer calor residual para estufas ou para outros processos, geração de eletricidade e produção de biochar. O módulo automatizado MK 4 ECHO2 converte resíduos de madeira locais em gás de síntese limpo que é queimado para produzir continuamente até 800 kW de água quente, 300 kg/hora de CO₂ de gás de combustão, 400 kg/hora de biochar úmido com alto teor de carbono e 1.000 kg/hora de certificados de remoção de carbono (CORCs).

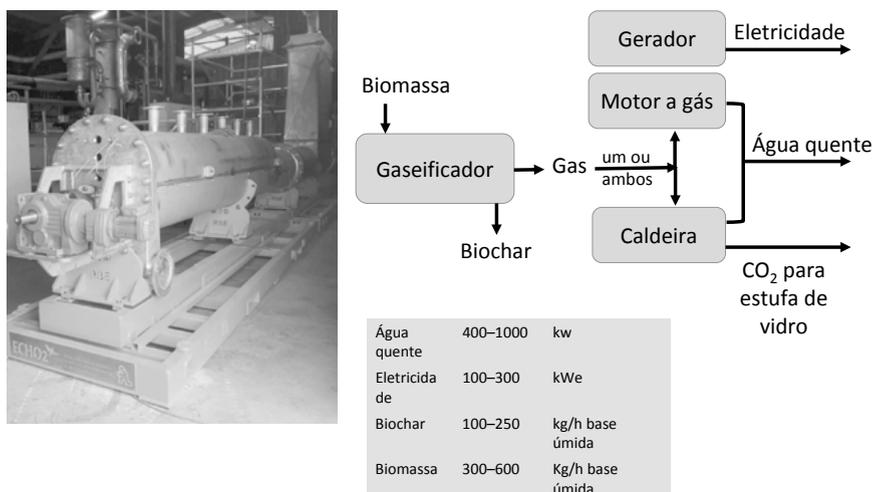


Figura 3.15 – Sistema de biomassa para energia Rainbow Bee Eater Mk4 ECHO2 para produção de calor, eletricidade e exaustão limpa da caldeira rica em CO₂ para aquecimento de estufas. Para mais informações, visite: rainbowbeeeater.com.au

Fornos rotativos de pirólise e gaseificação

Os fornos rotativos de pirólise e gaseificação estão sendo fabricados na Ásia, na América do Norte e na Europa. Os custos variam de AU\$ 350.000 a >\$ 2.000.000 para fornos com uma entrada de alimentação base seca de 0,25 a 2 toneladas/hora. A Figura 3.16 mostra os princípios de operação de um forno rotativo operando no Brasil pela NetZero com uma produção de 250 kg/hora de biochar. Nesses fornos, a biomassa é girada em um tambor inclinado aquecido externamente. O gás de síntese, retirado do tambor rotativo, pode ser limpo com água e as partículas e o condensado são recuperados. Parte do gás de síntese frio é queimado para aquecer o forno e o restante pode ser usado para

outras aplicações, como aquecimento de estufas ou geração de eletricidade. O condensado pode ser separado em ácido pirolenhoso e alcatrão, sendo este último também queimado para aquecimento. O biochar é produzido a cerca de 450 °C, ou os fornos podem funcionar em temperaturas mais altas. A água recuperada da limpeza do gás de síntese pode ser usada para resfriar o biochar.

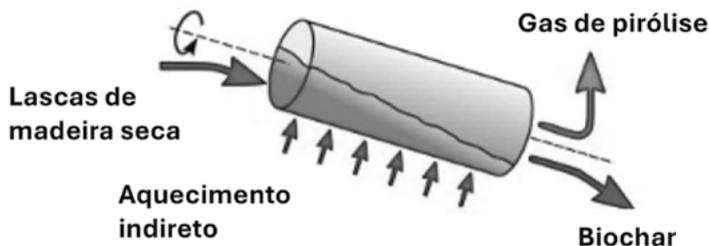


Figura 3.16 – Esquema da operação de um pirolisador de tambor rotativo e de um forno rotativo em operação no Brasil.

Uma versão deste forno foi construída e operada no Brasil pela NetZero. Este forno é projetado para converter todos os diferentes tipos de resíduos em biochar e para fazer complexos minerais de biochar. A entrada de alimentação pode variar de 1 a 1,5 toneladas/h. O calor residual é capturado e usado para secagem e/ou para produzir fertilizantes orgânicos e inorgânicos à base de biochar.



Figura 3.17 – Pirolisador em larga escala (NetZero).

Pirolisador de batelada

AtlantiCO2 é uma empresa pioneira de remoção de carbono sediada no Brasil, focada em transformar resíduos agrícolas e industriais em armazenamento de carbono de longo prazo. Com uma visão ousada de remover uma gigatonelada de CO₂ da atmosfera, a empresa combina profunda expertise técnica com soluções escaláveis e projetadas localmente. Sua tecnologia de pirólise proprietária — desenvolvida pela OBY e projetada para alta eficiência e confiabilidade — transforma biomassa residual em biochar estável, enquanto simultaneamente gera energia limpa para alimentar suas operações. Além da agricultura em larga escala, a AtlantiCO2 também planeja aplicar seu biochar em projetos de reflorestamento e em propriedades de pequenos agricultores e agricultura familiar, visando maximizar tanto o impacto ambiental quanto o benefício social em diversas paisagens.



Figura 3.18 – Pirolisador de batelada (AtlantiCO2).

Kon-Tiki

A Takuatec, empresa de base familiar localizada no Sítio São Luiz, município de São Pedro do Ivaí (PR), atua na produção de bambu lenhoso em sistema de cortinas vegetais, totalizando quatro hectares de cultivo, e na conversão dessa biomassa em biochar via processos de pirólise. Após experiências iniciais com tambores metálicos de 200 litros e fornos do tipo “rabo quente”, a empresa atualmente opera fornos do modelo Kon-Tiki. O reator Kon-Tiki utilizado possui capacidade de um metro cúbico, atingindo temperaturas médias de 750 °C (Fig. 3.19). O processo de tempera é realizado por injeção de água na base do forno, assegurando a estabilização térmica e a conservação das propriedades físico-químicas do material. Cada ciclo produtivo tem duração aproximada de seis horas, com rendimento entre 800 a 1000 litros de biochar por batelada.



Figura 3.19 – Reator Kon Tiki (Takuatec).

Fornos de alvenaria

Existem muitas empresas que produzem carvão vegetal no Brasil, utilizando uma variedade de fornos diferentes. O carvão vegetal é vendido como combustível para cozinhar ou para a produção de aço. Os agricultores compram os resíduos, finos de carvão vegetal para serem utilizados na agricultura. Estes fornos podem ser adaptados para produzir biochar a partir de resíduos agrícolas, e a fumaça pode ser capturada para a produção de ácido pirolenhoso. O sistema forno-fornalha desenvolvido pela Universidade

Federal de Viçosa é um sistema onde a emissão de gases do efeito estufa é minimizada pelo processo da queima desses gases na fornalha, sendo assim um processo mais limpo e ambientalmente amigável.



Figura 3.20 – Fornos de alvenaria (Carvoaria Festeiro).

P&D Reator de Pirólise

A Universidade Federal do Rio de Janeiro instalou uma máquina de pirólise em batelada com um reator de três metros cúbicos para realizar pesquisas sobre os diversos aspectos técnicos e econômicos da pirólise de resíduos urbanos e agrícolas.



Figura 3.21 – Pirolisador de batelada (UFRJ).

Queimadores de cortina de ar (Air curtain burners)

Os queimadores de cortina de ar modificados para produzir biochar são uma inovação recente. Esses queimadores transportáveis ou móveis, semelhantes a caçambas, que foram desenvolvidos em versões contínuas ou em lotes, são levados até o resíduo ou biomassa. A biomassa é lançada em uma câmara de queima, enquanto uma cortina de ar de alta velocidade é soprada pela abertura. Isso resulta na rápida incineração da biomassa e, ao mesmo tempo, cria uma barreira que impede a liberação de emissões nocivas e fumaça no meio ambiente. Alguns fabricantes modificaram seus projetos e procedimentos operacionais para produzir biochar em vez de queimá-lo em cinzas. A Figura 3.22 é uma foto de um queimador de cortina de ar, conhecido como Carbonator, que consome dez toneladas de biomassa por hora. Entretanto, a produção de biochar é de apenas 5% ou 500 kg/hora. Esse queimador está operando em Queensland e o biochar é vendido para empresas usuárias. Outro fabricante também disponível na Austrália, a Airburners, produz o Charboss rebocável, com um rendimento de até 1 t/h. O Char-Boss foi recentemente testado pelo Serviço Florestal dos Estados Unidos para produzir 17% de biochar e pode se qualificar para créditos de carbono com base na LCA.⁴ Queimadores de cortina de ar são fornecidas em uma variedade de tamanhos com rendimento de até 13 t/h. Esses equipamentos podem processar resíduos de biomassa volumosos, sem a necessidade de pré-tratamento adicional, a taxas 40 vezes mais rápidas do que a queima a céu aberto, embora, se não forem modificadas para a produção de biochar, produzam apenas 2% de biochar. A Airburners também fabrica um queimador de trincheira e uma Firebox que gera energia elétrica.

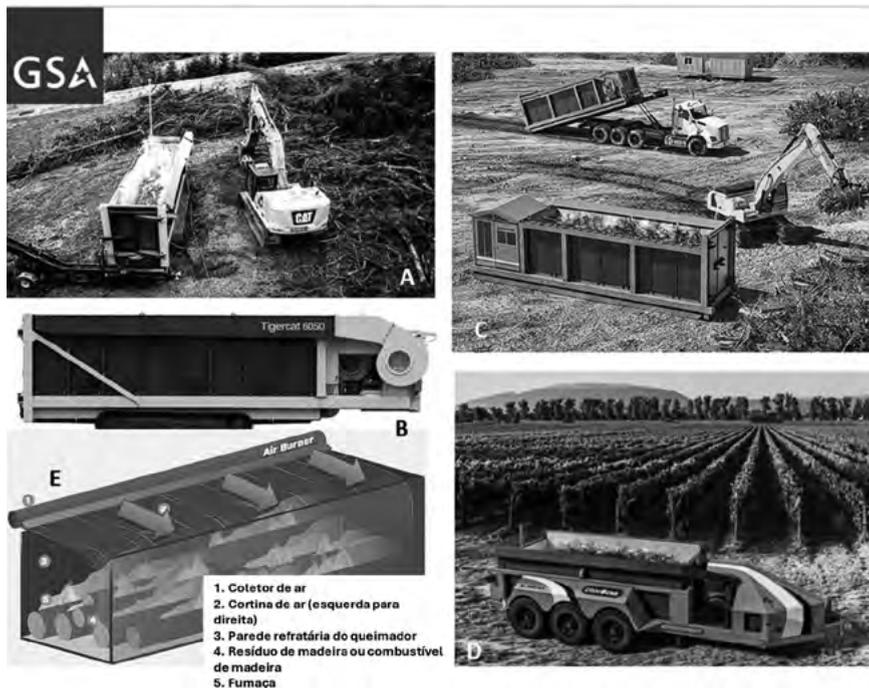


Figura 3.22 – Queimadores de cortina de ar. **A, B:** Carbonator 6050 (12,2 m de comprimento total) da Tigercat International. **C:** Caixa de queima rolante dos queimadores de ar. **D:** Carboss transportável para queimadores de ar. **E:** Princípio da cortina de ar projetada na abertura superior da fornalha. (Carbonatador⁵, Queimadores de ar⁶.)

PARTE 5: ESPECIFICAÇÃO DE UM REATOR DE BIOCHAR E OPERAÇÃO SEGURA

Há uma interação complexa entre as entradas, as saídas, o tipo de reator e os parâmetros de controle do reator. A International Biochar Initiative (IBI) publicou uma diretriz de trinta páginas para auxiliar no desenvolvimento e teste de pequenas plantas de pirólise.⁷ A seguir, destacamos os pontos mais importantes.

Considerações sobre a especificação de um reator de biochar

- Sempre leve em consideração:
 - Objetivo do reator,
 - Quantidade e tipo de biomassa disponível,
 - Práticas atuais de agricultura e gerenciamento de resíduos,
 - Localização e tamanho dos mercados para os produtos,
 - A aceitação de pequenos reatores depende do alinhamento com o contexto socioeconômico,
 - Regulamentos locais ou estaduais.
- Para aplicações industriais:
 - Não deve haver emissões de gases de síntese para a atmosfera,
 - A composição do gás de síntese deve atender às normas locais de emissões atmosféricas.
- As unidades de escala industrial devem considerar o ambiente econômico e regulatório, as habilidades necessárias para operar, a confiabilidade dos suprimentos de matéria-prima e o sistema de controle (operação manual ou automatizada).
- Participe de um workshop ou trabalhe em uma usina de biochar existente antes de tentar usar um forno se você tiver pouca ou nenhuma experiência em trabalhar com biochar.
- Conte com o apoio de um engenheiro ou de um operador de forno treinado que tenha projetado ou construído e operado um forno.
- Para um processo de pirólise contínua, minimize a entrada de ar com a matéria-prima por meio da purga com gás ou vapor com baixo teor de oxigênio (por exemplo, com gás de combustão resfriado) ou especifique um sistema de câmara de ar.

- O pré-aquecimento da alimentação com vapor, gás de combustão ou gás de escape de um motor ajuda a reduzir o ar que entra na alimentação, otimiza o uso de energia e aumenta o rendimento.

Dicas importantes de segurança

- Mesmo em fornos simples, podem ocorrer acidentes se os procedimentos operacionais corretos não forem seguidos.
- Mantenha a operação de biochar bem longe de materiais inflamáveis.
- Os fornos com tampa de chama e os TLUDs podem emitir cinzas quentes, que podem provocar incêndios.
- O gás de síntese pode explodir se o ar se misturar a ele em um recipiente fechado na presença de uma fonte de ignição.
- O gás de síntese é tóxico. Não respire nem permita que ele entre em contato com a sua pele.
- Evite respirar o pó de biochar. As partículas finas de biochar são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Tome cuidado ao manusear o biochar durante o processamento, o armazenamento e o transporte.
- Certifique-se de que o biochar esteja totalmente resfriado à temperatura ambiente na ausência de ar, ou cheio de água, antes de ficar no ar. O biochar produzido incorretamente (por exemplo, não totalmente pirolisado) ou insuficientemente resfriado ou umedecido pode entrar em autocombustão.
- Por segurança, ao armazenar ou transportar, certifique-se de que o biochar tenha pelo menos 30% de água quando estiver em condições ambientais. Isso eliminará as partículas de poeira e o risco de incêndio.
- Para medir o teor de umidade, pese o biochar antes e depois de ser aquecido a 140 °C por 12 horas para eliminar toda a umidade dos poros muito pequenos.

Referências

1. Cornelissen G, Pandit NR, Taylor P. et al. (2016). Emissões e qualidade do carvão vegetal de fornos “Kon-Tiki” com cortina de chamas para a produção de carvão vegetal/biochar em escala de fazendeiros. *PloS one*, 11(5), p.e0154617. doi.org/10.1371/journal.pone.0154617
2. Cornelissen. et al. (2023). Fornos de cortina de chama produzem biochar a partir de biomassa seca com emissões mínimas de metano. *Science of the Total Environment* 903:166547 doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166547
3. A tecnologia Pyrocal está criando energia e biochar para a cidade de Logan. pyrocal.com.au/biosolids-to-energy-biochar
4. Avaliação do ciclo de vida de GHG da produção de biochar CharBoss® e uso potencial para a geração de certificados CDR biochar- us.org/sites/default/files/presentations/USFS_USBI-CharBoss-LCA-Report-FEB-29-2024-FINAL.pdf
5. 6050 Carbonator www.tigercat.com/wp-content/uploads/2020/01/6050-carbonator-1.0-1119-web.pdf
6. de ar airburners.com/?msclkid=136c22de4f231109b6464723e921a591
7. Diretrizes para o desenvolvimento e teste de plantas de pirólise para a produção de biochar https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Pyrolysis_Plant_Guidelines.pdf

CAPÍTULO 4

Introdução às propriedades básicas do biochar

Pontos principais

- O biochar pode ser produzido a partir de praticamente qualquer tipo de biomassa, incluindo diferentes tipos de resíduos.
- A adequação de um biochar para aplicações específicas pode ser aprimorada por meio da seleção estratégica de matérias-primas, pré-tratamento da matéria-prima, controle do processo de produção e pós-tratamento do biochar.
- Ao produzir um biochar para atender a uma aplicação ou restrição específica, é importante considerar suas propriedades físicas, químicas e elétricas.
- As propriedades físicas do biochar, inclusive sua porosidade, área superficial e capacidade de retenção de água afetam sua mobilidade no ambiente, interação com a água, minerais e nutrientes do solo e a adequação como nicho ecológico para a biota do solo.
- As propriedades químicas do biochar incluindo compostos orgânicos e minerais, afetam sua solubilidade, capacidade de calagem, troca de cátions e ânions e disponibilidade de nutrientes para as plantas.
- As propriedades elétricas (capacidade de estocar ou doar elétrons) do biochar permite que ele impulsione os ciclos de nutrientes e altere a composição química do solo e seu estado de oxidação-redução. Isso impacta a forma como o biochar afeta a biodisponibilidade dos nutrientes, o pH, a estrutura do solo e a disponibilidade de água e ar.
- A capacidade de adsorção dos biochars, proporciona benefícios ambientais poderosos para a remediação do solo, da água e de ambientes agrícolas contaminados por metais pesados, pesticidas e outras toxinas.
- Os níveis de metais pesados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) e dioxinas em biochars geralmente estão dentro dos limites de segurança. A disponibilidade dessas toxinas na planta é geralmente menos de 1%.
- Os herbicidas e pesticidas podem ter sua eficácia reduzida se aplicados em solos onde o biochar fresco tenha sido aplicado.

INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as principais propriedades físicas e químicas do biochar. Exploramos suas relações com os tipos de biomassas e as condições de produção, além de algumas aplicações do biochar.

É importante observar que as propriedades do biochar geralmente mudam substancialmente quando ele é usado no solo, na compostagem ou na ração animal. Essas alterações podem até mesmo anular a importância de suas propriedades originais.

As propriedades do biochar também podem ser deliberadamente alteradas por meio de tratamento pré-pirólítico com produtos químicos ou minerais, ou por tratamentos pós-pirólise. Isso será discutido no Capítulo 7.

De modo geral, é fundamental entender as propriedades do biochar para garantir seu uso eficaz como condicionador de solo.

Fontes de biomassa

As matérias-primas mais comumente usadas para produção de biochar são madeira, palha, cascas de diferentes vegetais, bambu, bagaço, esterco e cama de aves.

Muitas outras fontes de biomassa podem ser exploradas, como lodo de esgoto, resíduos alimentares, aguapé, resíduos animais, algas marinhas e resíduos de alimentos, que produzem biochars valiosos. O European Biochar Certificate (EBC) tem uma lista de matérias-primas permitidas para a produção de biochar.

Embora a maior parte da biomassa possa ser pirolisada, as aplicações ambientais do biochar, incluindo a melhoria da qualidade do solo e da água, o aumento da produção de alimentos e a mitigação das mudanças climáticas, exigem que a matéria-prima seja adquirida de forma sustentável.

Também é fundamental excluir biomassa com altos níveis de substâncias químicas, como cromo, chumbo, arsênico e cádmio, ao produzir biochar para aplicações agrícolas no solo, na água ou em rações animais.

Por fim, para que um sistema de pirólise-biochar atinja uma redução líquida efetiva de CO_2 da atmosfera, a matéria-prima deve ser derivada de biomassa de crescimento rápido, de resíduos ou detritos que de outra forma, seriam queimados ou se decompõem rapidamente, enviando todo o seu carbono (C) para a atmosfera na forma de CO_2 . Isso é explicado na Figura 4.1.

ESTABILIDADE DO BIOCHAR NO SOLO

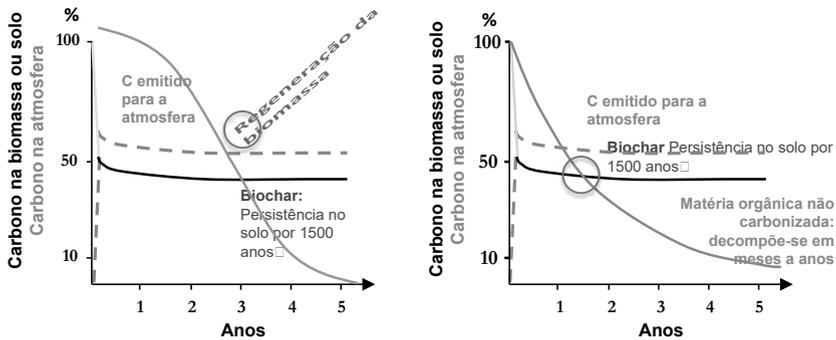


Figura 4.1 – Ilustração do balanço de carbono e do ciclo de vida da produção de biochar.

Quando o biochar é produzido a partir de biomassa colhida (esquerda) ou de resíduos em decomposição (direita) inicialmente, 100% do carbono (C) está na biomassa. Durante a pirólise, cerca de 50% do C permanece no biochar e 50% do C é liberado para a atmosfera.

Quando aplicado ao solo, parte do C do biochar se decompõe e o restante permanece sequestrado de forma estável por séculos. Portanto, o processo de pirólise, embora sequestre o C no solo, também resulta em um aumento nos níveis de C atmosférico (curvas tracejadas). Supondo que a maior parte do crescimento da biomassa (gráfico à esquerda) ou a decomposição da biomassa (gráfico da direita) ocorra dentro de 5 anos após a conversão da biomassa, a liberação inicial de C no processo de pirólise é compensada em três anos pela biomassa de crescimento rápido (à esquerda), ou em um ano e meio pelas emissões evitadas dos resíduos que, de outra forma, estariam se decompondo (à direita).

Em ambos os casos, dentro de cinco anos, o balanço do carbono da produção de biochar resultou em um aumento líquido no C armazenado de cerca de 40% do C na biomassa original.

Condições do processo

As propriedades físicas e químicas do biochar são determinadas principalmente pela escolha da matéria-prima (especialmente o teor de cinzas da biomassa) e as condições do processo, como a taxa de aquecimento, o tempo e a temperatura de pirólise.

Entretanto, é importante observar que:

- As propriedades, conforme medidas em laboratório, do biochar produzido a partir de biomassa limpa podem ser diferentes daquelas observadas para materiais produzidos a partir de resíduos de campo ou biomassa armazenada que tenha estado em contato com o solo, adubos ou fertilizantes.
- As propriedades físicas e químicas do biochar podem ser modificadas pelo condicionamento, incluindo o pós-tratamento do biochar com minerais, nutrientes e microrganismos.
- As propriedades do biochar mudarão à medida que o biochar interagir com microbiota, raízes de plantas, matéria orgânica e mineral do solo ou com o intestino do animal após a sua ingestão.

PROPRIEDADES FÍSICAS

As principais propriedades físicas que afetam a eficácia do biochar quando ele é introduzido pela primeira vez no solo ou como alimento aos animais são:

- Densidade a granel (massa de biochar por unidade de volume de sua massa),
- Densidade da partícula (massa do pedaço de biochar por unidade de volume),
- Distribuição do tamanho das partículas (tamanhos das partículas individuais),
- Macro e microporosidade (% da partícula que é vazia),
- Área superficial (área total das superfícies internas do biochar),
- Hidrofobicidade (tendência de um material de repelir a água),
- Capacidade de retenção de água (grama de água retida por grama de biochar),
- Capacidade de moagem (facilidade de moagem, medida como energia específica utilizada),

A mobilidade do biochar no ambiente e sua interação com a água, os minerais e os nutrientes do solo são influenciadas por essas características interconectadas. O biochar cria um habitat ecológico para a microbiota e fungos micorrízicos do solo, oferecendo superfícies, espaço para crescimento e proteção contra predadores. A melhor adequação do biochar como nicho ecológico também depende de suas propriedades físicas.

Tamanho das partículas

O biochar produzido a partir de gramíneas, palhas, serragem e alguns esterços tem um tamanho médio de partícula variando de 1 micrão a 5 mm. Já o biochar produzido a partir de galhos, blocos ou toras de madeira e bambu, pode ter um tamanho de partícula muito maior.

O biochar deve ser peneirado ou processado para uma faixa de tamanho de partícula ideal para a aplicação. Normalmente, o processamento do biochar pode envolver moagem ou trituração para obtenção de um tamanho menor e uniforme.

A maioria do biochar que é aplicado ao solo ou é utilizado como alimentação de animais é fornecido com um tamanho médio de partículas menores do que 1 mm.

Como regra geral, quanto menor o tamanho, maiores serão os efeitos benéficos do biochar em termos de absorção nutricional, adsorção e capacidade de retenção de água.

Pedaços maiores de biochar (1-5 mm) são usados para melhorar a estrutura do solo, como cobertura morta ou no processo de compostagem, enquanto pedaços ainda maiores (7-15 mm) são usados como agregado em estradas e concreto.

Densidade a granel

A densidade aparente é a massa de uma unidade de volume de um conjunto de partículas ou pedaços. Ela não é uma propriedade intrínseca de um material, mas depende do tamanho, da forma e da compactação das partículas.

A densidade aparente é um fator importante a ser considerado com relação ao manuseio de materiais, ao rendimento da produção e às aplicações. A densidade aparente do biochar varia de 0,06 a 0,7 g/cm³.

Porosidade

O “volume de poros” de um biochar refere-se aos espaços vazios dentro do material, enquanto a “porosidade” é a porcentagem do volume do material que é vazia. O tamanho dos poros e a porosidade do biochar refletem a estrutura celular da biomassa da qual é feito e também são influenciados pelas condições de produção e pelo envelhecimento do solo (Figura 4.2).

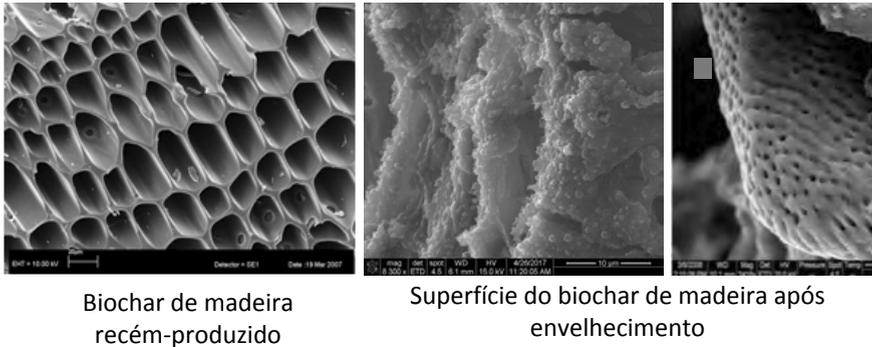


Figura 4.2 – A estrutura de poros dos biochars. **À esquerda:** biochar de madeira fresca. **Ao centro:** às mudanças drásticas que ocorrem nas superfícies do biochar após 12 meses no solo. **À direita:** biochar feito a 550 °C a partir de cama de frango mostra porosidade reduzida devido à fusão dos minerais.

O tamanho dos poros do biochar pode variar em mais de seis ordens de magnitude, desde poros em forma de fenda sub-nanométricos entre “flocos” de carbono aromático semelhantes a grafite, até estruturas celulares parcialmente preservadas com tamanho de poro de dezenas de micrometros. Os poros são normalmente caracterizados como microporos (ou nanoporos, menores que 2 nm), mesoporos (entre 2 e 50 nm) e macroporos (maiores que 50 nm) (Figura 4.3).

Os microporos (encontrados em materiais como zeólita, carvão ativado e algumas argilas) retêm gases e água com muita força. Os mesoporos fornecem uma grande área de superfície para processos de adsorção química.

As plantas não conseguem superar as altas forças capilares que retêm a água em poros pequenos, portanto, a água disponível para as plantas fica restrita aos macroporos.

Os microrganismos residem em poros com diâmetro maior que aproximadamente 1 micrón, enquanto os pelos radiculares e as raízes finas das plantas penetram em poros maiores que 5 microns (consulte o Capítulo 5). Os poros com mais de 5 microns são ideais para os microrganismos devido à entrada de plantas (rizodeposição) e à disponibilidade simultânea de água e oxigênio (Figura 4.3).

Embora a maior parte do volume de poros (aproximadamente 3 cm³/g de biochar) seja encontrada na faixa de tamanho de poro de 1 a 100 µm, importante para o habitat microbiano, há muito mais poros de tamanho menor

que contribuem menos para o volume dos poros, mas são importantes para a área de superfície e a adsorção química.

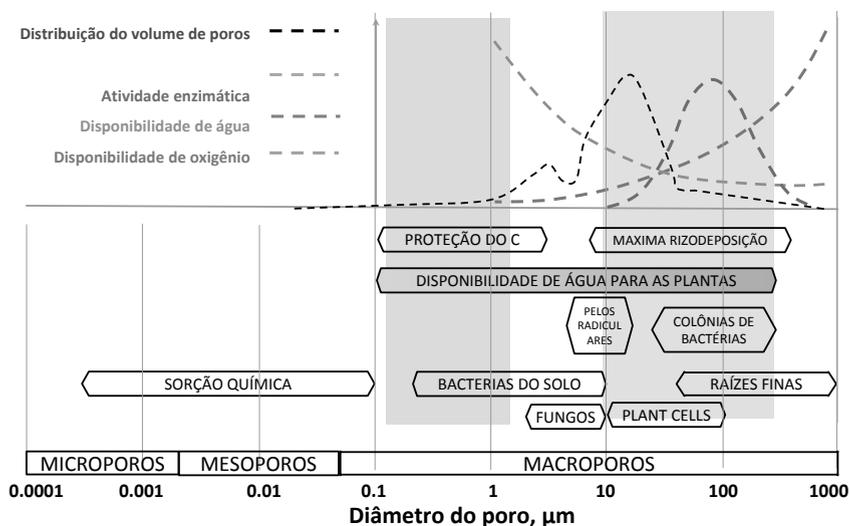


Figura 4.3 – Faixa de tamanho de poros e fenômenos físicos, químicos e microbianos associados em biochar e solos.

Os gráficos mostram a disponibilidade de água e oxigênio, a atividade enzimática no solo e uma típica distribuição bimodal do volume de poros encontrada em biochars de plantas.

A rizodeposição máxima ocorre onde os microrganismos interagem com as raízes e os pelos radiculares. A faixa de tamanho dos poros de água disponível para as plantas é estendida até o limite permitido pelas forças capilares (linha tracejada). (Modificado de Brewer et al. e Kravchenko et al.)^{1,2}

Área superficial

A área superficial é a medida da superfície por unidade de peso. A área de superficial varia de 5 a 600 m² por grama, normalmente aumentando à medida que a temperatura da pirólise aumenta, sendo alta para biochars de madeira e baixa para biochars com alto teor de cinzas, como por exemplo, esterco.

Para o biochar de alto teor mineral, o derretimento e a fusão podem ocorrer em altas temperaturas, fazendo com que a área da superfície e a porosidade diminuam ainda mais (Figura 4.2).

As superfícies e a estrutura de poros do biochar podem ser abertas e regulares, como no biochar de madeira, ou complexas e irregulares, como no biochar de cama de aviário (Figura 4.2).

A área superficial e o volume dos poros, sejam eles baixos ou altos, podem mudar à medida que os elementos minerais se dissolvem ou são extraídos por raízes e microrganismos ou, ao contrário, à medida que os minerais são adicionados por complexação na superfície do biochar.

Capacidade de sorção

A sorção refere-se à absorção ou retenção geral de substâncias por um material sólido, que pode incluir a adsorção na superfície e a absorção na estrutura interna do material.

Os biochars podem ter uma alta capacidade de adsorção e absorção devido à sua natureza porosa e à grande área superficial quimicamente ativa.

A absorção envolve a penetração e a difusão de moléculas ou substâncias na estrutura porosa do biochar. Os biochars podem absorver água, nutrientes e compostos orgânicos dissolvidos, influenciando a retenção de umidade do solo e a disponibilidade de nutrientes.

A adsorção refere-se especificamente à adesão ou ligação de moléculas de um fluido (líquido ou gás) na superfície do biochar. Esse processo ocorre devido às forças de atração entre as moléculas do fluido e a superfície do sólido. Os biochars, com sua grande área superficial, apresentam uma capacidade de adsorção significativa. Eles podem atrair e reter várias substâncias, inclusive nutrientes, compostos orgânicos e contaminantes do solo.

A capacidade de adsorção do biochar é altamente influenciada pelas propriedades químicas da superfície do biochar, conforme descrito na seção sobre Propriedades Químicas, especialmente na subseção: “Adsorção e ligação de elementos tóxicos”.

Hidrofobicidade

O biochar que possui uma alta hidrofobicidade se repele ou apresenta uma dificuldade em se misturar com a água. Por outro lado, um biochar que atrai água é conhecido como hidrofílico.

A hidrofobicidade é causada por alcatrões (compostos alifáticos) que se condensam na superfície do biochar durante a pirólise. Os biochars de baixa temperatura são fortemente hidrofóbicos, mas o tempo de pirólise mais

longo ou a lavagem do biochar podem reduzir essa hidrofobicidade. À medida que o biochar reage no solo, a hidrofobicidade também pode diminuir.

Capacidade de retenção de água

A capacidade de retenção de água (CRA) é a quantidade de água que o biochar pode adsorver e é medida como:

$$\text{CRA} = \frac{\text{Massa de água retida pelo biochar}}{\text{Massa de biochar}} \quad \%$$

Maneiras simples de medi-la são descritas no Capítulo 10. A capacidade de retenção de água é uma importante propriedade do biochar, que afeta sua adequação como corretivo do solo.

Em sua estrutura porosa, o biochar tem a capacidade de reter e liberar água. Essa qualidade torna a aplicação do biochar uma abordagem eficaz para melhorar a retenção de água no solo e o crescimento das plantas, além de minimizar o consumo de água.

A capacidade de retenção de água de um biochar depende de vários fatores, inclusive sua porosidade, área de superfície, composição química e propriedades das partículas.

Pesquisadores australianos descobriram que os produtos de biochar com tamanhos de partículas mistos, poros ásperos e irregulares e propriedades hidrofílicas têm CRA mais alto, enquanto os biochars com superfícies lisas e propriedades hidrofóbicas têm CRA mais baixo. A água foi armazenada principalmente nos espaços entre os poros (entre as partículas de biochar), embora os espaços internos dos poros também tenham sido significativos para alguns biochars.

As variações de CRA com o tipo de matéria-prima e a temperatura são mostradas na Figura 4.4.

As gramíneas e os resíduos de cana-de-açúcar apresentaram a maior capacidade de retenção de água – até 700%; os biochars de madeira retêm até 450%, e os biochars de esterco, cerca de 300%. Os biochars com alto teor de cinzas (incluindo algumas gramíneas e esterco, juntamente com resíduos de fábricas de papel, resíduos de alimentos e biossólidos) podem desenvolver poros bloqueados, levando a uma baixa CRA. Um biochar de serragem de madeira produzido acima de 800 °C apresentou baixa CRA, provavelmente devido à fusão dos poros.

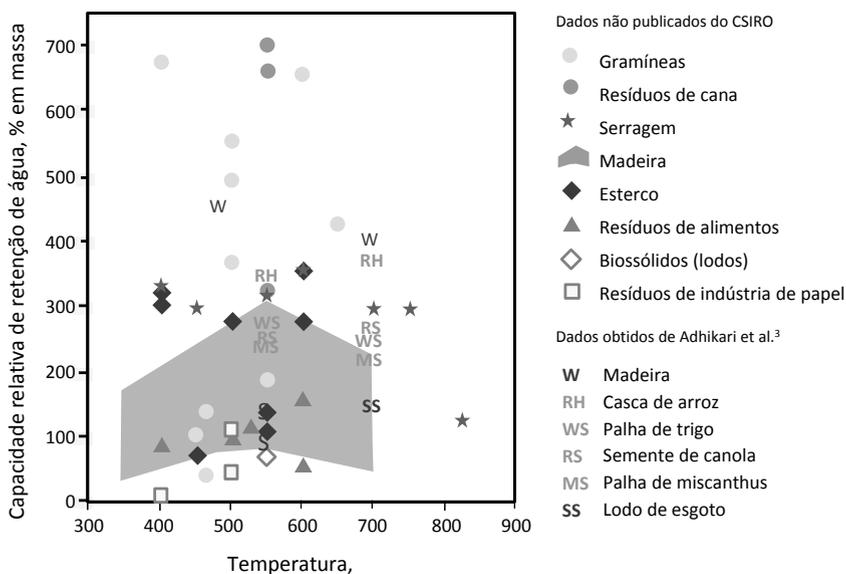


Figura 4.4 – Capacidades de retenção de água (CRA) de mais de 60 biochars (BC) em função da temperatura, combinando dados não publicados da CSIRO e dados recentes de Adhikari et al.³

A forma sombreada abrange 26 pontos de dados individuais para biochars produzidos a partir de madeira entre 375 °C e 700 °C. A faixa de CRA para biochars de madeira é ampliada até o nível de 450% pelos pontos de dados medidos por Adhikari et al.

Densidade da partícula e mobilidade

A densidade da partícula corresponde à razão entre sua massa e o volume delimitado pelo seu contorno externo. O biochar feito de madeira e cascas de nozes podem ser muito denso (500-900 kg/m³). Um tempo de pirólise mais longo pode aumentar a densidade e a dureza, tornando esses materiais mais difíceis de moer e semelhantes ao carvão.

A maioria dos resíduos de cultivos agrícolas tem uma densidade de partículas entre 250-300 kg/m³ é fácil de moer. A exceção são os resíduos com alto teor de sílica, como o biochar feito de casca de arroz.

PROPRIEDADES QUÍMICAS

Elementos e compostos orgânicos no biochar

Os principais elementos orgânicos do biochar são o carbono (C), o hidrogênio (H), o oxigênio (O) e o nitrogênio (N).

O conteúdo de carbono do biochar é orgânico ou um sal de carbonato (inorgânico). Ele pode variar de 50 a 95% da massa do biochar e depende da matéria-prima e da temperatura na qual o biochar é produzido.

Temperaturas de produção mais altas resultam em biochars com um maior teor de carbono estável (Figura 4.5).

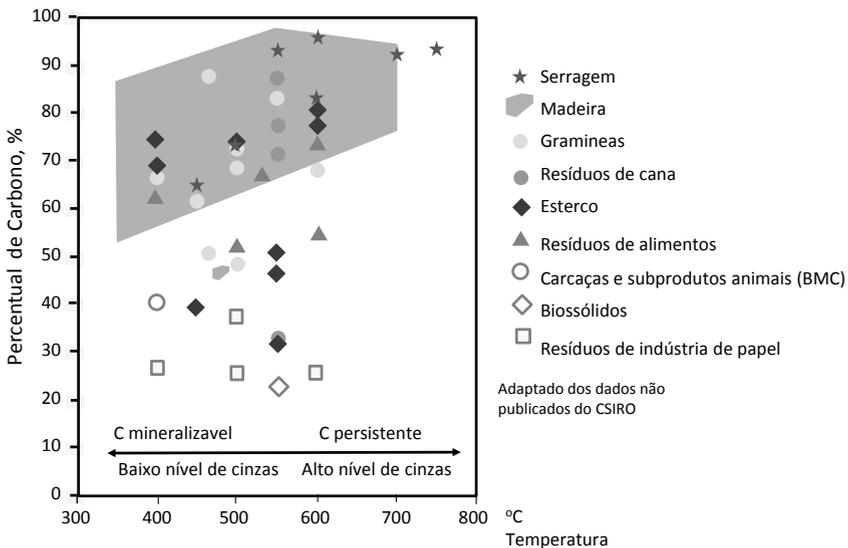


Figura 4.5 – Conteúdo de carbono de diferentes biochars em função da temperatura.

A forma sombreada abrange 26 pontos de dados individuais para biochars produzidos a partir de madeira pirolisada entre 375 °C e 700 °C. Os pontos de dados individuais são mostrados para serragem de madeira e outras matérias-primas. Muitos biochars de grama, esterco e resíduos de alimentos apresentaram teores de carbono semelhantes aos da madeira. Os biochars de matérias-primas com alto teor de cinzas, como o BMC (complexo mineral de biochar), biossólidos e resíduos de fábricas de papel, juntamente com alguns adubos e resíduos de cana-de-açúcar, tinham baixos teores de carbono. (Dados de um estudo não publicado da CSIRO).

O conteúdo de hidrogênio varia de 1 a 5% da massa do biochar. Pesquisas demonstraram que a proporção de hidrogênio para moléculas de carbono orgânico (a razão molar, H/C_{org}) é um indicador de quanto tempo o biochar persistirá no solo, conforme ilustrado na Figura 4.6.

Observe que a razão molar de hidrogênio para carbono orgânico (H/C_{org}) é 12 vezes a proporção das porcentagens de massa devido aos pesos atômicos do C (=12) e H (=1). Por exemplo, um biochar com 2% de H e 60% de C orgânico em peso tem uma razão molar de H/C_{org} de 0,4. A maior parte do carbono nesse biochar pode permanecer estável por cem anos a muitos milhares de anos.

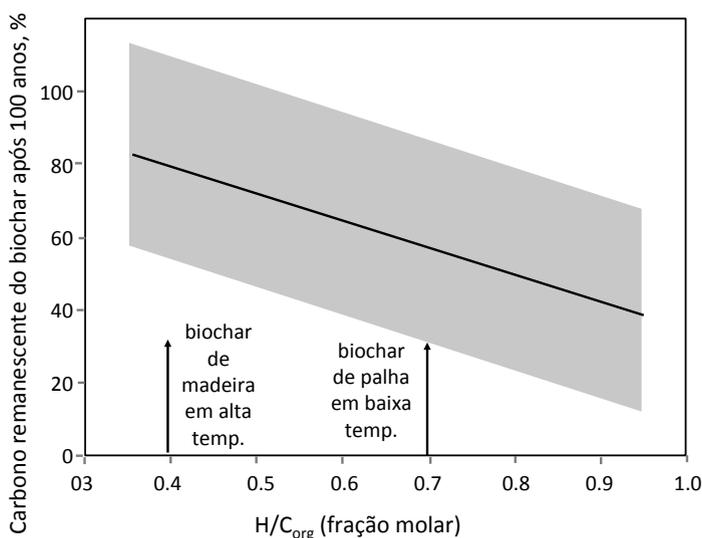


Figura 4.6 – Conteúdo remanescente de carbono proveniente do biochar no solo após 100 anos como uma função de H/C_{org} . A linha sólida representa a correlação média dos biochars avaliados. A faixa representa o intervalo de predição dentro do qual 95% das futuras medições de biochar devem cair. (Modificado de Budai et al.)⁴

Os biochars produzidos em temperaturas abaixo de 450 °C têm um alto teor de compostos orgânicos solúveis em água, que estão disponíveis como fonte de alimento para os microrganismos. Algumas dessas moléculas são importantes para a germinação das plantas e para protegê-las contra doenças, e algumas são responsáveis por ajudar as plantas a absorver nutrientes.

O biochar, se não for produzido com cuidado, também pode conter hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) e dioxinas. Esses compostos são tóxicos se aplicados em altas concentrações. Se um biochar tiver cheiro

de alcatrão, provavelmente apresentará um alto teor de PAH e deve ser enviado a um laboratório certificado para análise.

Para biochars produzidos adequadamente, a biodisponibilidade desses compostos tóxicos geralmente é muito baixa, conforme discutido na seção posterior, Propriedades potencialmente tóxicas do biochar.

O teor de nitrogênio dos biochars pode ser tão baixo quanto 0,1% e tão alto quanto 5% (Figura 4.7). O nitrogênio pode ser superior a 5% para biochar produzido a partir de matérias-primas com alto teor de proteína, como penas de frango. Há menos nitrogênio no biochar de alta temperatura do que no biochar de baixa temperatura.

Normalmente, o biochar retém 50-60% do nitrogênio original da biomassa quando produzido a 400 °C-450 °C, reduzindo para 30-40% em biochars de alta temperatura. Nos biochars de alta temperatura, o nitrogênio está ligado à estrutura estável do carbono e geralmente não está muito disponível para as plantas, enquanto no biochar produzido a temperatura abaixo de 400 °C, o nitrogênio está fracamente ligado à rede de carbono, geralmente como amônio. O nitrogênio não é apenas mais concentrado, mas também mais disponível para as plantas em biochars de temperatura mais baixa.

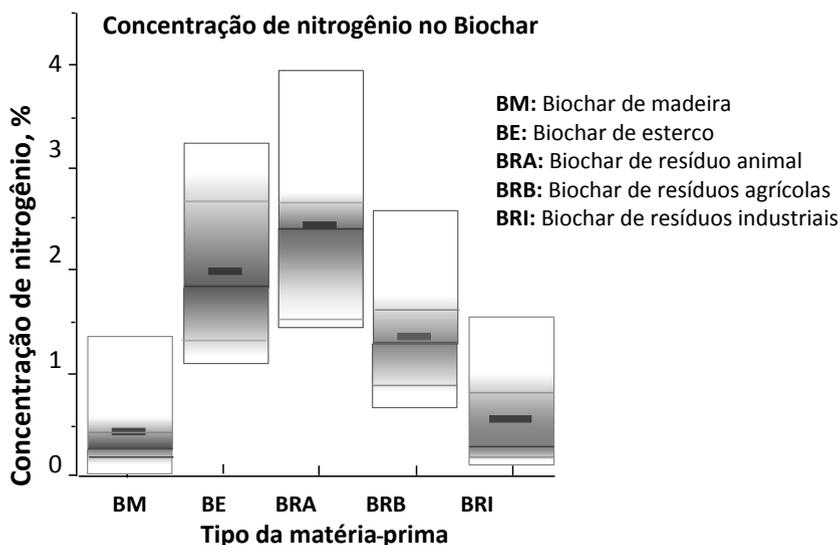


Figura 4.7 – Concentração percentual de nitrogênio em biochars produzidos com diferentes matérias-primas.

Os dados da Figura 4.7 são de uma meta-análise de 37 estudos, incluindo 146 valores médios. A caixa externa abrange toda a faixa de médias relatadas para um determinado biochar, enquanto a caixa sombreada interna captura os 50% internos dos valores. A linha sólida central representa a mediana, e a barra curta e grossa é a média geral da categoria. (Modificado de Ahmad et al.)⁵

Elementos inorgânicos (cinzas)

O componente inorgânico do biochar, muitas vezes chamado de cinzas, consiste principalmente no que os cientistas do solo chamam de macronutrientes P, K, Ca, Mg e N, e micronutrientes, incluindo Fe, Si, Mn, Se, B, Zn, Cu, Mo, Cl, Ni e S. Alguns desses elementos estão ligados a átomos de carbono e outros existem como partículas minerais muito pequenas (por exemplo, cloreto de sódio, óxido de ferro, argila, dióxido de silício).

Alguns dos sais minerais são cristalinos, enquanto outros não têm estrutura cristalina e são chamados de amorfos. Os minerais cristalinos no biochar incluem fosfato de rocha (CaPO_4), sal (NaCl), silvita (KCl), estruvita ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), anatásio (TiO_2), sílica (SiO_2), argilas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sulfeto de ferro (FeS), hematita (Fe_2O_3) ou magnetita (Fe_3O_4).

Os elementos inorgânicos também incluem metais pesados, como mercúrio (Hg), arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr) e chumbo (Pb). Alguns metais pesados e metalóides, como o cobre (Cu) e o zinco (Zn), são necessários em pequenas quantidades para as plantas.

Uma análise típica de um biochar de madeira e palha é apresentada na Tabela 4.1. Para obter informações mais detalhadas sobre minerais, consulte o item seis da lista de referências.

Tabela 4.1 – Composição de biochars de madeira e palha. (Dados do autor SJ.)

Elemento	<i>Acacia saligna</i> 400°C mg/kg	Palha de trigo 480°C mg/kg	Elemento	<i>Acacia saligna</i> 400°C mg/kg	Palha de trigo 480°C mg/kg
Ca	245,000	195,000	Sr	1,350	763
K	6,600	33,700	Ba	125	123
Mg	16,400	51,500	Ti	334	778
Si	19,000	447,000	Mn	102	382
Cl	7,540	135,000	Li	76	17
Na	6,100	8,680	I	32	24
Fe	1,595	11,300	Ni	34	0
Al	3,150	8,260	Rb	30	91
P	2,540	4,000	B	28	9

pH e valor de calagem de biochars

O pH do biochar é sua atividade de H⁺ ou próton. Biochars podem ter pH alcalino ou ácido. Foi descoberto que o pH varia de menos de 5 para biochars de madeira de baixa temperatura a 11 para biochars de resíduos alimentares produzidos a 600 °C (veja Figura 4.8).

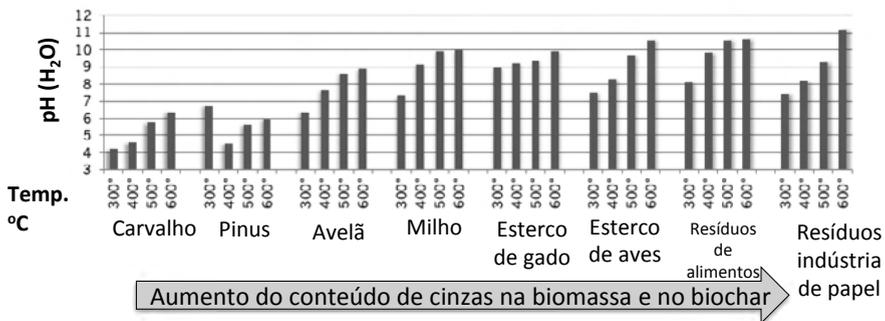


Figura 4.8 – pH de uma gama de biochars produzidos em diferentes temperaturas. (Dados de Rajkovich)⁷

O valor de calagem de um corretivo é sua capacidade de neutralizar solos ácidos em relação à capacidade do CaCO₃ puro (cal), que é indexado como 100%. O efeito de calagem dos biochars pode melhorar o suprimento de nutrientes minerais para o crescimento das plantas e aliviar o estresse de Al e P para melhorar a saúde das culturas em solos tropicais ácidos.

O valor de calagem do biochar aumenta com seu teor de cinzas. O teor de cinzas geralmente aumenta com a temperatura, enquanto o pH nem sempre segue essa tendência, como pode ser visto na Figura 4.8.

Valores de calagem para biochars feitos de matérias-primas selecionadas são mostrados na Tabela 4.2. O valor de calagem do biochar de milho é mais de dez vezes superior ao dos biochars de madeira. Alguns biochars com elevado teor de cinzas, como os de resíduos de papel, poderiam substituir a calcário como corretivo.

Tabela 4.2 – pH, teor de cinzas, e valores de calagem como uma função de temperatura de aquecimento alta.

Matéria-prima	Temp. °C	pH	Cinzas %	CaCO ₃ , Equ %
Eucalipto	400	6.9	3.6	-0.9
Pinus	400	6.9	3.7	0.7
Pinus	550	7.9	4.1	1.0
Milho	350	8.9	9.1	11
Estercos e cavacos	450	10.0	30.4	9.5
Resíduos da ind papel	700	9.2	45.4	40.9

Condutividade elétrica

Quando o biochar é colocado na água, alguns de seus sais são dissolvidos e a água é capaz de conduzir eletricidade. A condutividade elétrica (CE) é uma medida do total de sais dissolvidos (TDS) e fornece uma indicação da disponibilidade de nutrientes ou da presença em excesso de cinzas ou sais.

Quando adicionados ao solo, os biochars feitos de biomassa com alto teor de cinzas, como esterco, resíduos de papel e biossólidos, provavelmente aumentarão a CE e TDS do solo (Figura 4.9).

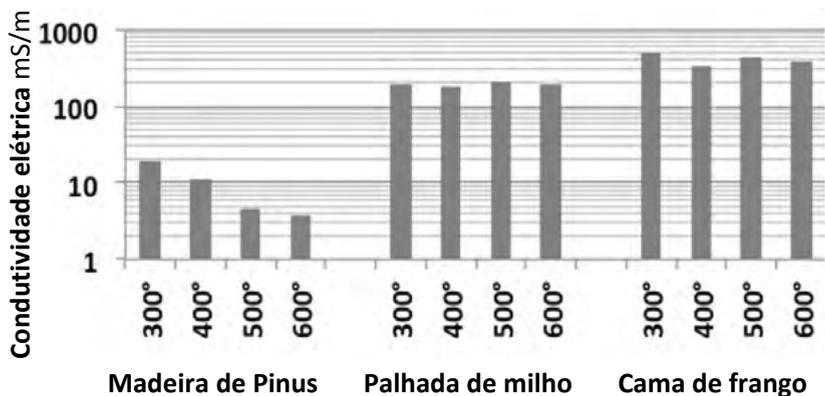


Figura 4.9 – Condutividade elétrica (EC) para três biochars diferentes, plotados em uma escala logarítmica, como uma função de temperatura. Os ECs de biochars de palha de milho (talos) são de 10 a 50 vezes maiores do que os biochars de madeira, enquanto os ECs de biochars de esterco são de 1,5 a 2,5 vezes maiores do que os da palha de milho. (Dados de Rajkovich.)⁷

Cátions e ânions solúveis

Compreender a composição e as taxas de liberação dos cátions e ânions solúveis do biochar em diferentes níveis de pH do solo é necessário para avaliar a quantidade adequada de biochar necessária para atender às necessidades de nutrientes das plantas. Vale ressaltar que, após a liberação inicial de nutrientes solúveis, a superfície do biochar adsorve matéria orgânica e minerais, levando à formação de aglomerados organo minerais (conforme discutido no próximo capítulo). Esses aglomerados, por sua vez, têm a capacidade de se ligar a cátions e ânions presentes no solo.

Em um laboratório no Canadá, os pesquisadores agitaram 36 biochars com água e analisaram os líquidos separados. As matérias-primas para a preparação do biochar incluíram espigas de milho, palha de milho, casca de cacau, casca de semente de algodão, palha de trigo, resíduo de lúpulo, graminha, casca de pinheiro, esterco de aves e gado e substrato de produção de cogumelos. Em geral, a quantidade de nutrientes liberados foi muito maior em água ácida com $\text{pH} < 6,5$ do que na água alcalina com $\text{pH} > 7,5$. Não foram observadas diferenças significativas entre biochars de baixa temperatura (300 °C) e alta temperatura (600 °C) da mesma matéria-prima em termos de liberação de NO_3^- , Cl^- , Na^+ , Ca_2^+ , Fe , Cu , PO_4^- , P , NH_3^- , N e K^+ em água.

O biochar à base de esterco liberou concentrações significativamente maiores de Cl^- , Na^+ , Mn , Ca_2^+ e K^+ em comparação com os biochars de resíduos agrícolas. Além disso, o biochar à base de esterco tinha uma concentração maior de nitratos do que os biochars de madeira.

Grupos funcionais e capacidades de troca de cátions e ânions

Os grupos funcionais, que consistem em átomos de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, são componentes cruciais na superfície dos biochars, desempenhando um papel fundamental em várias funções do biochar. Esses grupos funcionais ligam cátions (por exemplo, K^+) e ânions (por exemplo, PO_4^{3-}) quando introduzidos no solo ou na água, tornando os cátions potencialmente disponíveis para as plantas.

A concentração de grupos funcionais na superfície do biochar e consequentemente, o desempenho do biochar, pode aumentar à medida que o biochar envelhece ou passa por tratamentos químicos.

A Figura 4.10 ilustra as diversas maneiras pelas quais os compostos metálicos, cátions e ânions, inclusive metais pesados e nutrientes, se ligam à superfície do biochar por meio de grupos funcionais e outros mecanismos. Essa ligação é um processo complexo que envolve interações com a matriz de carbono.

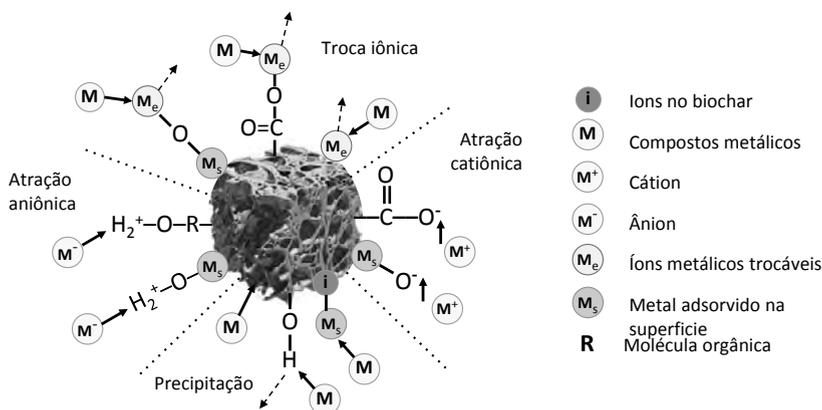


Figura 4.10 – Algumas das maneiras pelas quais cátions e ânions se ligam por meio de diferentes grupos funcionais na superfície do biochar ou metais que estão incorporados na matriz de carbono. (Adaptado de Ahmad et al.)¹¹

A capacidade de troca catiônica (CTC) e capacidade de troca aniônica (CTA) são medidas-chave da capacidade de um biochar de reter cátions e ânions trocáveis, respectivamente. A CTC é influenciada principalmente pela concentração de grupos funcionais de oxigênio na superfície do biochar, conforme mostrado na Figura 4.11.

A CTA está ligada à presença de minerais carregados positivamente na superfície. Notavelmente, os biochars de palha produzidos em baixas temperaturas geralmente exibem a CTC mais alta, conforme ilustrado na Figura 4.11.

Por outro lado, os biochars de alta temperatura demonstram a CTA mais alta, conforme ilustrado na Figura 4.12.

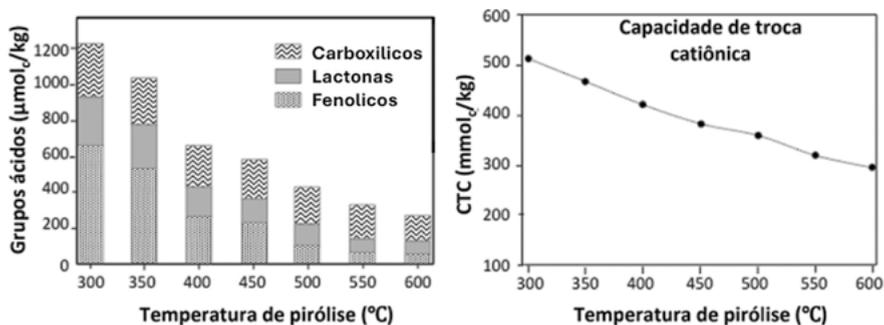


Figura 4.11 – Grupos funcionais ácidos (fenólicos, lactonas e carboxílicos) e capacidade de troca de cátions (CTC) de biochar de cama de frango produzidos nas temperaturas de pirólise indicadas. (Fonte: Song e Guo, 2011).

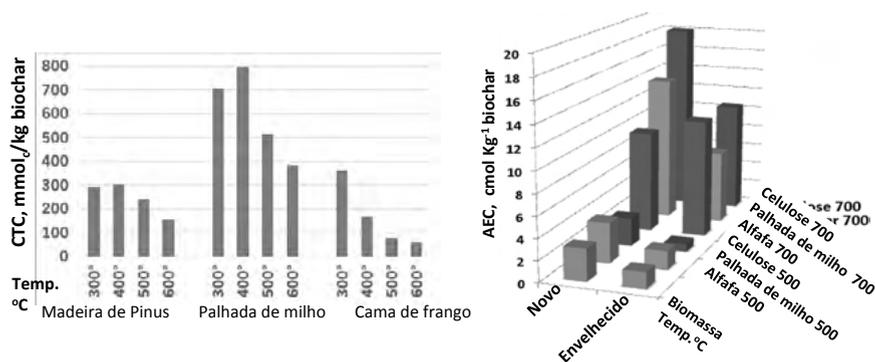


Figura 4.12 – À esquerda: CTC disponível para biochars em diferentes matérias-primas e temperaturas (adaptado de Rajkovich7). À direita: Capacidade de troca aniônica de biochars frescos e envelhecidos por 4 meses para diferentes matérias-primas e temperaturas de produção (adaptado de Lawrinenko14,15).

Adsorção e ligação de elementos tóxicos

As propriedades únicas do biochar o tornam um adsorvente eficaz para contaminantes devido à sua alta área de superfície específica e superfície reativa. Para remediação de solos ou água, altas concentrações de biochar (>10 toneladas/ha no solo) serão mais eficazes. No entanto, pequenas quantidades de biochar focadas na rizosfera da planta aumentarão a adsorção de contaminantes como metais pesados ou hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), reduzindo sua biodisponibilidade para plantas e vários organismos do solo.

Metais pesados

A adsorção de metais pesados envolve múltiplos mecanismos: complexação, troca iônica, precipitação, interações eletrostáticas e redução química, a maioria dos quais são ilustrados na Figura 4.10.

Diferentes mecanismos são observados para adsorção de diferentes metais pesados, resultando em diferentes capacidades de sorção de biochars para metais pesados específicos. As capacidades de adsorção são uma relação complexa com fatores como matéria-prima e temperatura.¹⁶

Biochars de alta temperatura (550 °C–700 °C) caracterizados por elevados pH, área superficial e volume de poros, exibem maior adsorção para certos metais pesados. Por outro lado, biochars feitos em baixas temperaturas com um conteúdo substancial de grupos funcionais de carbono e oxigênio podem exibir uma alta capacidade de sorção para outros metais pesados.

Li et al.¹⁶ descobriram que um biochar de aroeira produzido a uma temperatura de 300 °C teve a maior adsorção de Hg, enquanto que o biochar de fibra de coco produzido a 250 °C e então acidificado teve a maior adsorção para CrVI. A sorção de ambos os biochars diminuiu com temperaturas mais altas – veja Figura 4.13. Em contraste, um biochar de lodo produzido a 550 °C teve uma alta adsorção para chumbo.

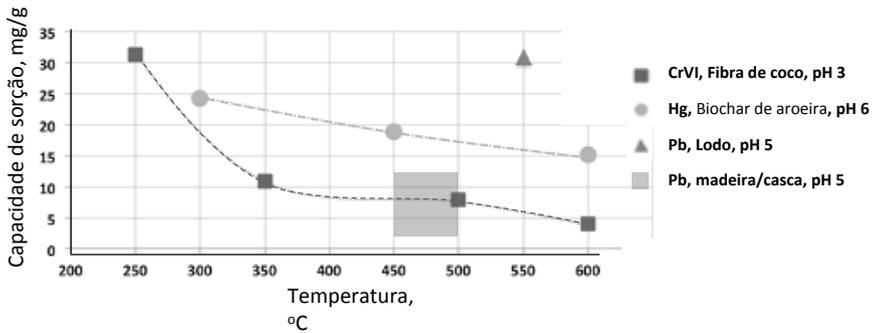


Figura 4.13 – Capacidade de biochars selecionados produzidos em diferentes temperaturas para sorção de metais de soluções aquosas. A legenda lista em ordem: espécies de metais pesados, matéria-prima, pH do biochar. O quadrado maior para sorção de Pb abrange a faixa medida para biochars feitos de madeira e casca pirrolisada a 400 °C–450 °C (Dados de Li et al., 2017)¹⁶

Compostos orgânicos tóxicos

Biochars de alta e baixa temperatura adsorvem compostos orgânicos tóxicos (por exemplo, naftalina e triclorobenzeno),¹⁷ antibióticos residuais, pesticidas e herbicidas.¹⁸ Os mecanismos de adsorção são os mesmos dos metais pesados.

Os mecanismos que dominam dependem da matéria-prima e da temperatura de produção. Uma vez adsorvidos em alguns tipos de biochar, a toxicidade desses produtos químicos pode ser reduzida ou eliminada por meio de reações redox e por certos microrganismos que vivem nos poros do biochar. Isto é especialmente verdadeiro para biochars que têm uma alta concentração de nanopartículas de óxido de Fe e Mn.

O biochar também pode adsorver e reter microplásticos na água. Um estudo realizado no Reino Unido descobriu que o biochar de colmo de milho produzido a 500 °C e um biochar de madeira de um forno de carvão vegetal foram os mais eficazes na captura de microplásticos em um filtro de água.¹⁹ Um grupo internacional descobriu que adicionar 10% de biochar de esterco de gado ao composto aumentou a degradação de microplásticos durante a compostagem por meio do aumento da abundância de microrganismos específicos que degradam plásticos. As reações de oxidação também degradaram os plásticos.²⁰

Certos tipos de biochar e biochars projetados adsorvem glifosato residual que se move do solo para a água. Uma equipe de químicos em Camarões descobriu que uma composição de argila e biochar de madeira foi mais eficiente na remoção de glifosato da água do que um biochar de madeira puro.²¹

A aplicação de biochar em solos agrícolas diminui a lixiviação de nutrientes ou pesticidas aplicados, reduzindo assim seu escoamento para lagos ou corpos d'água vizinhos e diminuindo sua contaminação de águas subterrâneas.

Deve-se considerar que herbicidas e pesticidas podem ter eficácia reduzida se aplicados a solos contendo biochar fresco.

Propriedades potencialmente tóxicas do biochar

O próprio biochar pode conter substâncias tóxicas derivadas da contaminação na matéria-prima da qual o biochar foi feito ou do processo de produção.

Metais pesados

Os biochars feitos de matéria-prima contendo metais pesados reterão todos ou a maioria desses metais, pois não são volatilizados durante o processo de produção. As matérias-primas preocupantes incluem lodo de esgoto, madeira comercial e industrial urbana e resíduos retirados de terras contaminadas.

Metais presentes no biochar podem incluir arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), níquel (Ni), selênio (Se) e zinco (Zn). A maioria dos países tem regulamentações proibindo a aplicação em solos de materiais, incluindo biochar, com teores excessivos de metais pesados totais, embora pesquisas indiquem que a maioria desses metais é frequentemente imobilizada dentro do biochar.

Organizações certificadoras de biochar, como a The International Biochar Initiative (IBI) e Carbon Standards International, também estabeleceram padrões máximos permitidos. Em algumas jurisdições, isenções podem ser possíveis se o condicionante contiver apenas pequenas quantidades de metais pesados excedendo as concentrações permitidas ou se for comprovado que os metais pesados não são biodisponíveis. Um teste de lixiviação aquosa pode fornecer evidências aceitáveis.

Para contextualizar, investigação sobre contaminação por metais pesados do biochar na Polônia descobriu que os biochars derivados de plantas, composto e resíduos sólidos municipais tinham níveis de metais pesados

bem abaixo dos limites definidos pelo IBI para o biochar. Esses níveis também eram mais baixos do que aqueles encontrados no composto e lodo de esgoto, que são adições permitidas ao solo em muitos países.

Embora alguns biochars contivessem níveis mais altos de metais pesados específicos (Ni, Cu, Pb) em comparação a certos solos, os testes de lixiviação indicaram que as concentrações em extratos aquosos de biochar eram menores que 1/100 das normas prescritas para Cr, Ni, As e Pb disponíveis, e menores que 1/4 para Cd.²²

No entanto, como o biochar pode ser aplicado ao longo de vários anos, é aconselhável cautela ao produzir biochar a partir de resíduos contaminados com metais pesados.

PAH e dioxinas

Dependendo do processo de produção, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) e dioxinas podem ser produzidos dentro da estrutura do biochar. Numerosos estudos, incluindo um que mediu os PAHs totais e biodisponíveis em 60 amostras de biochar, descobriram que o conteúdo de PAHs totais estava geralmente dentro dos limites definidos pelos padrões regulatórios para aplicação de materiais em solos.

Os carvões de gaseificação tinham os PAHs mais altos, às vezes acima dos requisitos regulatórios para corretivos de solo, embora os conteúdos de PAH dos carvões gaseificadores Top-Lit UpDraft (TLUD) (veja o Capítulo 3) fossem baixos (<10% do padrão permitido). No entanto, os biochars ligam os PAHs até 400 vezes mais fortemente do que os solos.

Os níveis de PAHs extraíveis de água, uma medida da toxicidade biodisponível, eram geralmente menores que 1% do risco máximo tolerável. Para dioxinas, os pesquisadores descobriram que biochars de resíduos alimentares com alto teor de sal e, portanto, alto teor de cloro, tinham os maiores níveis de dioxinas.

No entanto, os níveis totais de dioxina eram todos menores do que o máximo especificado nas diretrizes para solos não sensíveis, e as concentrações biodisponíveis estavam abaixo do limite analítico de detecção.²³

Propriedades básicas do ácido pirolenhoso de madeira (extrato pirolenhoso)

Extrato pirolenhoso é um líquido translúcido marrom-avermelhado escuro a marrom-avermelhado claro que é uma mistura complexa de água e várias centenas de compostos orgânicos e inorgânicos, minerais e partículas muito pequenas de biochar. Normalmente tem um pH menor que 5, pois seu principal composto químico é o ácido acético (vinagre).

A concentração de metais pesados e compostos aromáticos policíclicos no extrato pirolenhoso de madeira refinado está abaixo do nível especificado na maioria dos regulamentos relacionados à aplicação de resíduos em solos. Se não tiver certeza sobre a pureza ou se não houver análise no rótulo, faça testes em vasos ou envie-o para um laboratório antes de aplicar no solo. Para obter mais informações sobre o extrato pirolenhoso de madeira, entre em contato com os autores.

PROPRIEDADES ELETROQUÍMICAS E ELÉTRICAS

O movimento de elétrons no solo, conhecido como atividade eletrônica, desempenha um papel fundamental na influência da saúde do solo, fertilidade e capacidade de sustentação de microrganismos além de influenciar no crescimento de plantas.²⁴

Esta atividade é fundamental para conduzir ciclos essenciais de nutrientes, incluindo os de carbono, nitrogênio e fósforo.

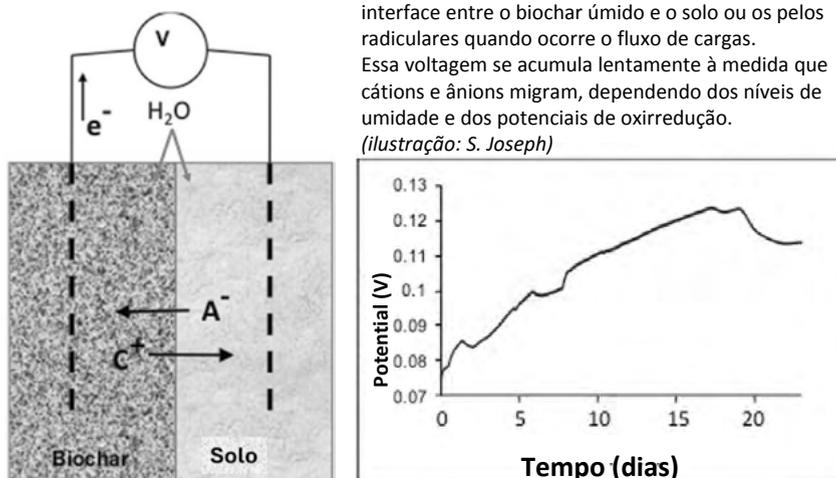
A atividade eletrônica altera a composição química do solo transformando espécies iônicas de uma forma para outra, impactando assim a biodisponibilidade de nutrientes. Além disso, a atividade eletrônica exerce influência em outras propriedades do solo, como estrutura do solo, níveis de pH, disponibilidade de água e ar e o estado geral de oxidação-redução do solo.

O biochar consiste em um material com alto teor de carbono, fases minerais e moléculas orgânicas que contêm uma variedade de grupos funcionais. Todos eles podem armazenar e liberar elétrons, agindo como uma espécie de bateria no solo (Figura 4.14).

Esta capacidade do biochar em facilitar os processos redox (transferência de elétrons), pode explicar muitos dos efeitos benéficos do biochar. Se os solos tiverem pouco carbono orgânico e um alto potencial redox (ou seja, se forem oxidados), então as plantas têm que gastar mais energia para absorver nutrientes.

As plantas também ficam mais estressadas, encorajando uma maior abundância de patógenos. O biochar reduz o potencial do solo e a concentração de espécies oxidadas.

Estando próximo ou sobre as raízes da planta, o biochar pode aumentar a diferença de voltagem entre o interior e o exterior da raiz, reduzindo a energia que a planta gasta para absorver nutrientes. Esses efeitos, por sua vez, fornecem mais energia para o crescimento de plantas e microrganismos benéficos (Fig. 4.15).



Uma diferença de potencial elétrico é criada na interface entre o biochar úmido e o solo ou os pelos radiculares quando ocorre o fluxo de cargas. Essa voltagem se acumula lentamente à medida que cátions e ânions migram, dependendo dos níveis de umidade e dos potenciais de oxirredução. (ilustração: S. Joseph)

Figura 4.14 – Biochar com água em seus poros pode armazenar e doar elétrons e íons como uma bateria. No solo, ele cria uma diferença de potencial entre o biochar e o solo, afetando a atividade dos elétrons. C+ representa os cátions carregados positivamente, como potássio, e A- representa ânions carregados negativamente, como nitratos.

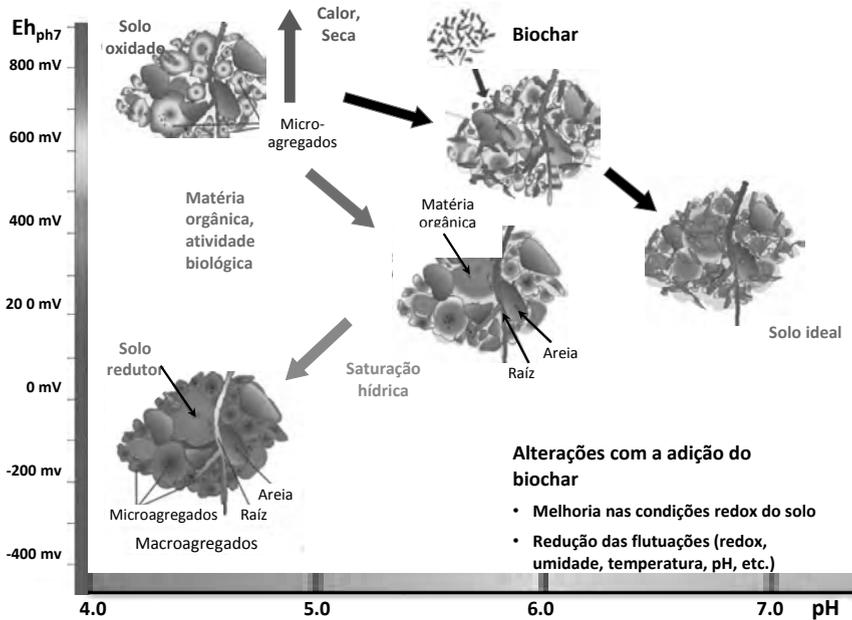


Figura 4.15 – Efeito do biochar e outros componentes em Eh e pH. A seca oxida o solo e a inundação reduz o solo. O biochar pode aumentar a capacidade da matéria orgânica de trazer o solo de volta ao equilíbrio e torná-lo mais resiliente e ideal para o crescimento das plantas. (Modificado de Husson.)²⁵

Existem várias medidas de potencial do solo e biochar que fornecem informações sobre a atividade eletrônica dentro do solo e a capacidade do biochar de influenciá-la.

O potencial redox (Eh) é uma medida da tendência de uma espécie química adquirir elétrons e assim ser reduzida, enquanto oxida o ambiente. No contexto do biochar, Eh indica o estado redox geral do biochar ou da mistura biochar-solo e sua capacidade de participar de reações de transferência de elétrons. Eh é expresso em milivolts com valores que variam de negativo com tendência a perder elétrons (condições redutoras) a positivo com tendência a ganhar elétrons (condições oxidantes).

Capacidade de Armazenamento de Elétrons (CAE) é uma medida do número total de elétrons livres que o biochar pode armazenar dentro de sua estrutura. Essa capacidade do biochar de funcionar como um reservatório de elétrons influencia sua reatividade em sistemas ambientais sob condições de redox variáveis.

A CAE varia de alguns milimoles ou mais de um bilhão de trilhões de elétrons que podem ser armazenados e trocados por um único grama de biochar, dependendo da fonte de biomassa e das condições de pirólise.²⁶

CAE foi correlacionado com a absorção de nitrogênio pelo biochar. Capacidade de Troca de Elétrons (CTE) é a capacidade do biochar de trocar seus elétrons armazenados com seu ambiente circundante. É definida como a soma da Capacidade de Aceitação de Elétrons (EAC) e Capacidade de Doação de Elétrons (EDC) e é uma propriedade quantificável e estável dos biochars.

A capacidade de troca de elétrons determina como o biochar interage com minerais do solo, matéria orgânica e comunidades microbianas, afetando o ciclo de nutrientes e a degradação de poluentes. A EDC é uma importante medida caso as substâncias no ambiente precisem ser reduzidas, enquanto a EAC é importante se o ambiente ou poluentes orgânicos nele precisam ser oxidados.

Considere isso como semelhante à relação entre “capacidade tampão” e pH em solos, onde a capacidade tampão quantifica a capacidade de resistir à mudança no pH absorvendo ou desorvendo íons H^+ e OH^- . Ao agir como uma bateria recarregável, aceitando, armazenando e liberando elétrons, o biochar tem uma alta capacidade de manter o Eh equilibrado em uma faixa ótima para solo, microrganismos e plantas.

A atividade eletrônica (pE) se relaciona ao fluxo real de elétrons no solo e (como o pH) é expressa como o logaritmo negativo da concentração de elétrons.²⁹

Conclusão

Essas propriedades eletroquímicas são paralelas a propriedades químicas como pH, efeito tampão, conteúdo total de nutrientes, disponibilidade de nutrientes e capacidades de troca de ânions e cátions. Está se tornando cada vez mais aparente que a atividade eletrônica no sistema biochar-solo-mineral-microrganismos e ambiente geral da rizosfera é promotor crucial da dinâmica do solo e da eficácia do biochar na criação de um ambiente de solo fértil e resiliente para o crescimento das plantas.

Referências

1. Brewer C.E. et al. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy* dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059
2. Kravchenko A.N. et al. (2020). Reply to: “Variables in the effect of land use on soil extrapore enzymatic activity and carbon stabilization” by Glenn (2020). *Nature Communications* 11:642 doi.org/10.1038/s41467-020-19901-8
3. Adhikari S. et al. (2023). Evaluating fundamental biochar properties in relation to water holding capacity. *Chemosphere* 328:138620 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138620
4. Budai A. et al. (2013). Biochar Carbon Stability Test Method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability International Biochar Initiative. biochar-international.org/wpcontent/uploads/2018/06/IBI_Report_Biochar_Stability_Test_Method_Final.pdf
5. Ahmad Z. et al. (2021). Biochar modulates mineral nitrogen dynamics in soil and terrestrial ecosystems: A critical review. *Chemosphere* 278:130378 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130378
6. More detailed information on minerals is available at the following sites: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8066251/>, <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.8b00523> e <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/814526>
7. Rajkovich S. et al. (2011). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* 48:271–284 doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7
8. Enders A. et al. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology* 114:644–653 doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022
9. Singh B. et al. (2017). Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. *Biochar: A guide to analytical methods*, p.23.
10. Liu P. et al. (2019). Release of Nutrients and Trace Elements from Wood, Agricultural Residue and Manure Based Biochars. *International Journal of Environmental Research* 13:747 link.gale.com/apps/doc/A706629826/AONE?u=monash&sid=bookmarkAONE&xid=9bc1a57d
11. Ahmad M. et al. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* 99:19–33 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
12. Lui A. (2020). Biochar and the Mechanisms of Nutrient Retention and Exchange in the Soil. medium.com/local-carbon-network/biochar-and-the-mechanisms-of-nutrient-retention-and-exchange-in-the-soil-733dacdc3ea

13. Song W. and Guo M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 94:138–145 doi.org/10.1016/j.japp.2011.11.018
14. Lawrinenko M and Laird DA (2015). Anion exchange capacity of biochar. *Green Chemistry*, 17:4628 doi.org/10.1039/C5GC00828J
15. Lawrinenko M. (2014). Anion exchange capacity of biochar. <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/d2290394-004d-4970-8ec4-1c106762fd5f>
16. Li H. et al. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere* 178:466e478 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072
17. Luo Z. et al. (2022). Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: a review. *Chemosphere* 287:132113 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132113
18. Dorner M. et al. (2022). Biochar-mediated abiotic and biotic degradation of halogenated organic contaminants – A review. *Science of The Total Environment* 852 158381 doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158381 Luo Z. et al. (2022) Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: a review. *Chemosphere* 287:132113 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132113
19. Wang Z. et al. (2020). Filtration of microplastic spheres by biochar: removal efficiency and immobilisation mechanisms. *Water Research* 184:116165 DOI: 10.1016/j.wares.2020.116165
20. Sun Y. et al. (2022). Enhancing microplastics biodegradation during composting using livestock manure biochar. *Environmental Pollution* 306:119339 doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119339
21. Rallet D. et al. (2022). Synthesis of clay-biochar composite for glyphosate removal from aqueous solution. *Heliyon* 8:e09112 doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09112
22. Kujawska J. (2023). Content of Heavy Metals in Various Biochar and Assessment Environmental Risk. *Journal of Ecological Engineering* 24:287–295 DOI:10.12911/22998993/166557
23. Hale SE. et al. (2012). Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. *Environmental science & technology* 46: 2830–2838 doi.org/10.1021/es203984k
24. Chiu P. et al. (2019). Electron storage and transfer in biochar materials. researchoutreach.org/wp-content/uploads/2019/10/Pei-Chiu.pdf
25. Husson O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil* 362:389–417 doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7
26. PrévotEAU A. et al. The electron donating capacity of biochar is dramatically underestimated. *Sci Rep* 6 32870 (2016). doi.org/10.1038/srep32870

27. Xin and Chiu (2018). Electron Storage Capacities (ESC) of Biochar and Other Black Carbon Materials. BIOCHAR 2018 Wilmington, DE [biochar-us.org/sites/default/files/presentations/3.3.1%20Electron%20Storage%20Capacity% 20of% 20Biochar%20and%20Other%20Black%20Carbon%20Materials%20-% 20Pei% 20Chiu.pdf](https://biochar-us.org/sites/default/files/presentations/3.3.1%20Electron%20Storage%20Capacity%20of%20Biochar%20and%20Other%20Black%20Carbon%20Materials%20-%20Pei%20Chiu.pdf)
28. Yuan et al. (2022). Biochar as a novel carbon-negative electron source and mediator: electron exchange capacity (EEC) and environmentally persistent free radicals (EPFRs): a review. *Chemical Engineering Journal* 429 132313 doi.org/10.1016/j.cej.2021.132313
29. Powers M. (2021). Regenerative soil. Powersperma culture 123 California matt-powers.mykajabi.com/regenerative-soil

CAPÍTULO 5

Mudanças nas propriedades do biochar após interação com solos, compostagem ou animais

Pontos principais

- As propriedades do biochar mudam quando ele é envelhecido.
- Microagregados organo minerais se formam na superfície do biochar à medida que ele interage com a matéria orgânica e mineral do solo. Isso resulta em mudanças no pH do biochar, na área superficial, nas capacidades de troca de cátions e ânions, na capacidade de aceitar e doar elétrons e na capacidade de adsorver e liberar nutrientes.
- O biochar no processo de compostagem passa por mudanças semelhantes, mais rapidamente.
- O biochar fornecido aos animais (galinhas, peixes, vacas, minhocas) ou usado na cama dos animais promove a saúde animal e a qualidade do produto. Segue-se uma cascata de benefícios à medida que o biochar passa pelo intestino do animal, ou pela cama, e entra no solo como biochar envelhecido e aprimorado.
- A taxa de envelhecimento de um determinado biochar, as mudanças em suas propriedades e os efeitos no solo e nas plantas são complexos e dependem de muitos fatores externos, como ambiente, solo, cultura e prática agrônômica.
- O envelhecimento aumenta os benefícios agrícolas e ambientais do biochar. Os biochars envelhecidos podem melhorar o rendimento e o valor nutritivo de culturas e pastagens, a capacidade de retenção de água no solo e a capacidade de estabilizar metais pesados, além de adsorver e oxidar metano e óxido nitroso.
- A compreensão das mudanças no biochar com o envelhecimento ajuda a projetar biochars aprimorados para aplicações específicas.

INTRODUÇÃO

Quando o biochar é introduzido no solo, no processo de compostagem ou nas rações de animais, ele passa por um processo dinâmico de mudança que aprimora suas propriedades. Neste capítulo, apresentamos como o biochar envelhece e as maneiras pelas quais esse processo de amadurecimento melhora sua eficácia.

ENVELHECIMENTO EM SOLOS

Uma série complexa de mudanças pode ocorrer ao longo do tempo quando o biochar é adicionado aos solos, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 5.1.

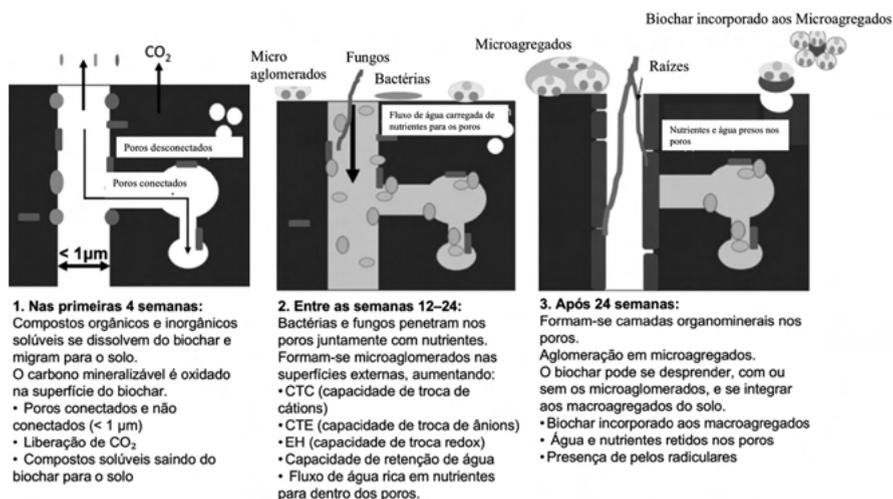


Figura 5.1 – Ilustração esquemática do processo de envelhecimento nas superfícies e nos poros rasos e profundos do biochar (BC) adicionado ao solo. Os períodos de tempo para os três estágios são aproximados, dependendo da chuva, da temperatura, do tipo de solo e das práticas agronômicas. (CEC/AEC= capacidade de troca de cátions/ânions, Eh = potencial de redução)

Quando a água se infiltra nos poros do biochar, os compostos orgânicos e minerais solúveis nas superfícies dos poros se dissolvem. Isso aumenta a concentração de carbono orgânico dissolvido (DOC), cátions e ânions na solução do solo, aumentando assim a condutividade elétrica e o pH, além de reduzir o potencial redox (Eh) do solo. A liberação de DOC e nutrientes do biochar é mais rápida durante a primeira semana e diminui gradualmente

nas semanas seguintes. A liberação de nutrientes é mais rápida em solos ácidos. Alguns dos compostos orgânicos dissolvidos promoverão a germinação de sementes e ajudarão a combater patógenos.

Após essa fase inicial, a superfície do biochar é revestida com matéria orgânica do solo. A matéria orgânica se combina com minerais, cátions e ânions da água do solo, formando pequenos aglomerados porosos de complexos organominerais na superfície do biochar, bem como dentro dos poros do biochar (conforme mostrado nas Figuras 5.1 e 5.2). Os aglomerados são ricos em grupos funcionais de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, o que permite que os aglomerados capturem nutrientes do solo ou fertilizantes adicionados.

As plantas e os fungos interagem com as regiões da superfície do biochar. As raízes das plantas entram nos poros do biochar, obtendo acesso aos nutrientes do biochar ou aos aglomerados de organo minerais. Elas também exsudam compostos orgânicos e gases que são adsorvidos nos poros do biochar. As moléculas orgânicas de microrganismos mortos e exsudatos de plantas também podem se ligar à superfície do biochar envelhecido. Grande parte do carbono fica protegida, o que leva a um aumento do carbono armazenado a longo prazo no solo e, portanto, aumenta o benefício do sequestro de carbono do biochar.

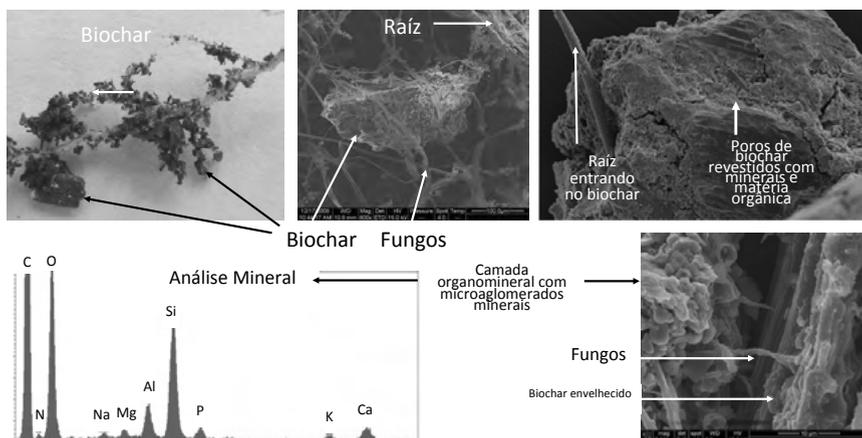


Figura 5.2 – Linha superior: Fungos e pelos de raiz se enredando e entrando nos poros de um biochar de madeira revestido com organomineral após 6 meses no solo. **Embaixo, à direita:** Imagem de alta ampliação dos microagregados organominerais que se formaram na superfície do biochar. **À esquerda:** Um espectro de raios X mostrando os elementos minerais no microagregado.

Com o passar do tempo, as partículas de biochar são decompostas ainda mais pelas ações dos microrganismos e da fauna do solo, que rompem e ingerem o biochar. A perturbação das raízes por meio do cultivo e a exposição aos ciclos de umidade-seca e congelamento-descongelamento também decompõem o biochar. Isso permite maior interação das superfícies frescas dos fragmentos de biochar com o solo para formar mais microaglomerados organominerais. À medida que as partículas de biochar envelhecem e diminuem de tamanho, a mobilidade delas no solo aumenta. A menos que sejam interceptadas e presas por raízes ou pelos radiculares, elas podem se mover para o subsolo, o que aumenta seu conteúdo de carbono e minerais e sequestra o carbono.



ENVELHECIMENTO EM PROCESSOS DE COMPOSTAGEM

Quando o biochar é incluído com a biomassa no processo de compostagem, o biochar, o composto e o próprio processo de compostagem são aprimorados. O biochar fornece um habitat para microrganismos de compostagem, aumentando a taxa de compostagem. O processo de compostagem reduz o pH do biochar e aumenta a CEC. Para melhorar a qualidade e a rentabilidade do biochar e do composto, a adição ideal de biochar à biomassa varia entre 5% e 10% do peso seco total (ou 10% a 20% do volume) da biomassa que está sendo compostada.

Quando o biochar está presente durante a compostagem, ele passa por mudanças semelhantes às que ocorrem no solo, mas em um período de tempo mais curto devido às temperaturas elevadas ($>50^{\circ}\text{C}$), à disponibilidade de nutrientes e à atividade dos microrganismos. O biochar ganha e retém nutrientes durante a compostagem devido ao alto teor de nutrientes da biomassa usada na compostagem, principalmente quando há inclusão de adubos ou gramíneas.

Uma camada orgânica de compostos orgânicos hidrofílicos reveste a superfície do biochar e, em seguida, aglomerados de organo minerais altamente permeáveis se formam nessa camada orgânica. Isso ajuda a aumentar a porosidade do biochar, a CEC e a capacidade de recepção/doação de

elétrons. As concentrações de N (especialmente nitrato), Ca, K, Al, Si e Fe aumentam (veja a Figura 5.3). O biochar também altera a abundância de microrganismos específicos. Essas alterações nas superfícies do biochar podem reduzir significativamente as emissões de metano e óxido nitroso durante o processo de compostagem.

Como o biochar envelhece no composto

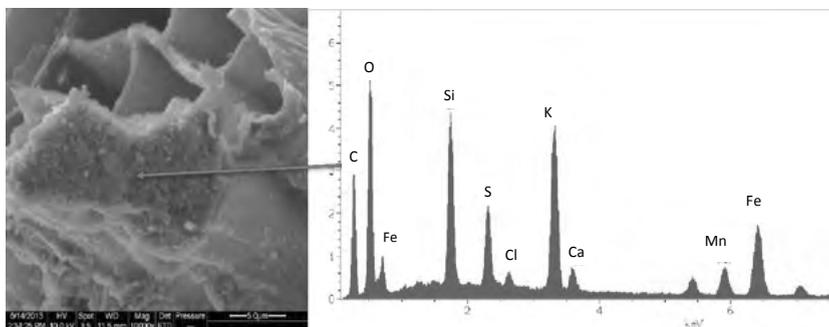


Figura 5.3 – Biochar de madeira em alta temperatura após a compostagem, mostrando a formação de aglomerados de organo minerais na superfície de um macroporo. A análise dispersiva de raios X mostra altas concentrações de K (potássio), S (enxofre), Si (sílica), Fe (ferro) e pequenas concentrações de Mn (manganês), Cl (cloro) e Ca (cálcio).

ENVELHECIMENTO EM ANIMAIS

Descobriu-se que a incorporação de biochars adequados à finalidade na ração animal melhora a digestão da ração e a microflora intestinal, além de reduzir a inflamação intestinal. Os biochars vendidos como suplementos para animais incluem biochars feitos de madeira, palha, casca de noz e bambu. Após a ingestão, os minerais solúveis no biochar se dissolvem no ambiente ácido do estômago. As superfícies de biochar ativadas adsorvem uma variedade de nutrientes intestinais, em um processo semelhante ao descrito anteriormente para a compostagem. Nessa fase, bactérias e fungos benéficos também se desenvolvem no biochar. Estudos mostraram que, quando esse biochar aprimorado pelo intestino do animal é excretado e incorporado ao solo por um evento de chuva ou por besouros rola-bosta, ele melhora o rendimento e o valor nutritivo do pasto em poucos meses. Mudanças semelhantes ocorrem no intestino das minhocas (Figura 5.4), resultando em propriedades aprimoradas do húmus de minhoca.

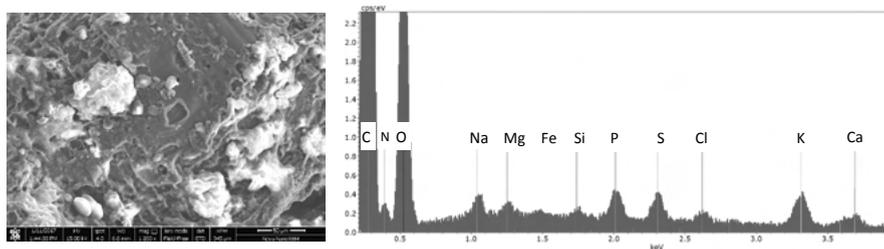


Figura 5.4 – Aglomerados de organo minerais em um biochar de madeira de alta temperatura retirado do intestino de uma minhoca. Observe os teores relativamente altos de nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) no espectro de raios X.

CONCLUSÃO

Os biochars geralmente formam microagregados organo minerais por meio de interações com solos, compostagem e animais. Esse processo aprimora suas propriedades, inclusive a área superficial, a capacidade de troca de cátions (CTC), a capacidade de troca de ânions (AEC), a capacidade de recepção/doação de elétrons e a capacidade de adsorver e liberar nutrientes. Esses biochars modificados demonstram maior eficácia no aumento da produtividade das culturas e das pastagens, melhorando o valor dos nutrientes, aumentando a capacidade de retenção de água no solo, estabilizando metais pesados e adsorvendo e oxidando metano e óxido nitroso. Compreender como as propriedades do biochar mudam após a interação com esses ambientes é essencial para o planejamento e o aprimoramento dos biochars para aplicações específicas. Deve-se reconhecer que a taxa de envelhecimento de um determinado biochar, as mudanças em suas propriedades e os efeitos no solo e nas plantas são complexos e dependem de muitos fatores externos, como ambiente, solo, cultura e prática agrônômica.

CAPÍTULO 6

Efeitos do biochar na produção agrícola e nos solos

Pontos principais

- Cada propriedade rural tem condições específicas de solo e ambiente. Este capítulo fornece diretrizes para atender a essas restrições usando combinações de biochars e nutrientes adicionais. As diretrizes deste capítulo não se aplicam a todas as fazendas. A experimentação na fazenda é recomendada para otimizar os benefícios.
- O potencial dos aditivos à base de biochar ao longo dos anos, a absorção nutricional, do solo, da biota do solo e das plantas, todos devem ser considerados.
- Se o aditivo de biochar e sua taxa e método de aplicação forem projetados para atender às restrições aplicáveis e à dinâmica nutricional, ele poderá ser eficaz ao máximo para restrições específicas ou em uma gama mais ampla de restrições.
- Os biochars produzidos em baixas temperaturas geralmente produzem maior rendimento da cultura, resistência a doenças e abundância de microrganismos benéficos do solo do que os biochars produzidos em temperaturas mais altas.
- Os biochars de alta temperatura têm melhor capacidade de retenção de água do que os biochars de baixa temperatura.
- Os biochars de gramíneas, palhas ou adubos ricos em nutrientes e os biochars lenhosos carregados de nutrientes (especialmente N e P) produzem maiores rendimentos do que os biochars lenhosos simples.
- O biochar adicionado a 5 t/ha ou menos a solos pobres (ou seja, solos ácidos, arenosos, argilosos, lixiviados, oxidados ou com baixo teor de matéria orgânica, ou aqueles com baixa capacidade de troca catiônica) melhora o rendimento relativamente mais do que quando adicionado a solos férteis.
- O biochar aplicado em altas doses pode melhorar a capacidade de retenção de água e a estabilidade agregada de solos degradados.
- O biochar envelhecido antes de ser aplicado ao solo é mais eficaz do que o biochar fresco para aumentar a produtividade. Entretanto, à medida que o biochar continua a envelhecer, a diferença diminui em dois a três anos.

- Os efeitos do biochar na fotossíntese podem ser diferentes em diferentes tipos de plantas, especialmente se o mecanismo fotos-sintético também for diferente.
- Em termos de resposta da planta (e retorno do investimento), uma combinação de biochar ou biochar-fertilizante é mais eficaz se aplicada na zona da raiz da planta.
- A aplicação de quantidades menores de biochar a cada ciclo de cultivo não é apenas mais econômica, mas também pode ser tão eficaz para melhorar o desempenho do cultivo e até mesmo mais eficaz para criar carbono no solo do que aplicações pontuais de uma grande quantidade.
- Para garantir a imobilização contínua de metais pesados em solos contaminados, o biochar deve ser adicionado pelo menos a cada dois anos.

INTRODUÇÃO

Este capítulo analisa os diversos efeitos da aplicação foliar e no solo do biochar sobre a produção agrícola e as propriedades do solo, sintetizando as descobertas de pesquisas publicadas, as práticas dos agricultores e as experiências pessoais.

Diferentes tipos de biochar aplicados em diferentes taxas de aplicação, solo, clima e condições de cultivo têm efeitos diferentes sobre:

- Propriedades do solo, crescimento da cultura e resistência a doenças;
- Qualidade e rendimento da safra (grãos, frutas, hortaliças, pastagens, nozes);
- Abundância de microrganismos específicos, especialmente na zona da raiz (rizosfera);
- Redução de gases de efeito estufa.

Os resultados de muitas meta-análises dos efeitos do biochar são apresentados neste capítulo. Para entender melhor a meta-análise e como integrar com os resultados, leia o quadro “O que significa uma meta-análise” no final deste capítulo.

EFEITOS DO BIOCHAR NA PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

O biochar funciona melhor combinado com fertilizantes

Descobriu-se que o biochar funciona muito melhor quando combinado com fertilizantes inorgânicos ou orgânicos. Em um período de três a seis semanas, o fertilizante se liga ou reage com o biochar. Isso resulta em uma liberação lenta de nutrientes e aumenta a eficiência da absorção de nutrientes.

Ye et al. (2019)¹ realizaram uma meta-análise da literatura publicada, considerando os anos entre 1998 e 2017, comparando os benefícios de rendimento da adição de biochar sem ou com fertilizante com controles não fertilizados e controles fertilizados. O estudo mundial abrangeu dados de diferentes climas, solos, biochars e práticas de gerenciamento. Bai et al. (2022)² publicaram uma meta-análise abrangente semelhante usando dados de 2014 a 2019.

É útil examinar separadamente os efeitos de rendimento dos aditivos à base de biochar quando aplicados a solos não fertilizados e fertilizados. Muitos agricultores de países em desenvolvimento e de alguns países desenvolvidos (especialmente em condições de seca) não podem pagar por fertilizantes e valorizarão o potencial do biochar acessível para aumentar seus rendimentos. Nos países em que a fertilização é uma prática padrão, deseja-se aumentar ainda mais a produtividade e reduzir o uso de fertilizantes. Portanto, é importante compreender a melhor maneira de usar o biochar em solos fertilizados e não fertilizados.

Os efeitos da aplicação de biochar (BC), fertilizante inorgânico (IF) ou uma combinação (BC+IF) sobre a produtividade das culturas após um ano são mostrados na Figura 6.1, separados de acordo com o tipo de controle, não fertilizado ou fertilizado.



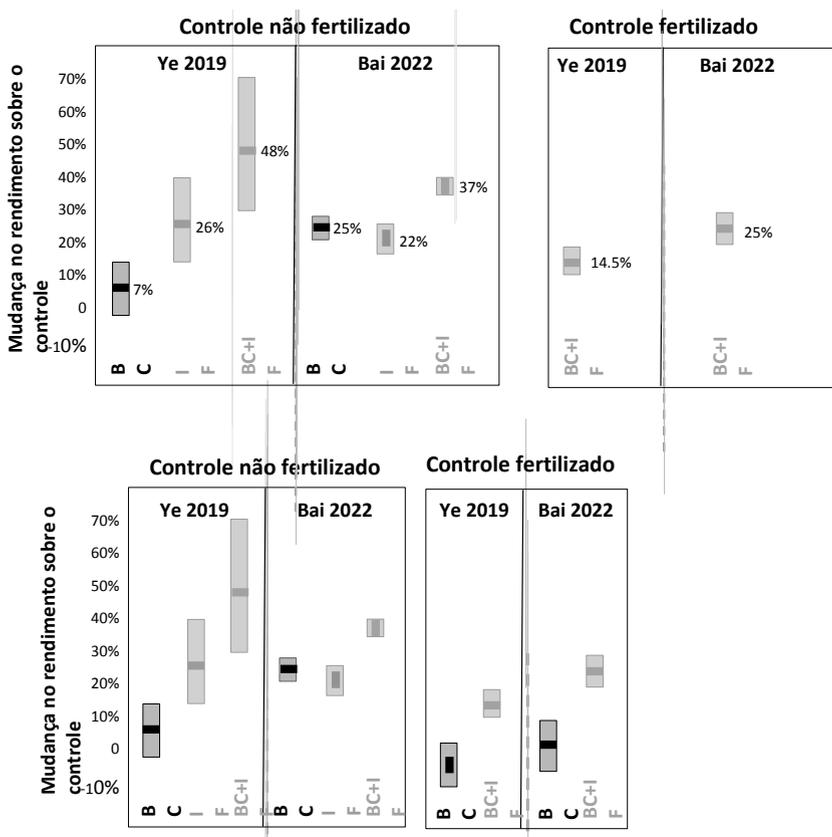


Figura 6.1 – Aumentos médios na produtividade das culturas em relação aos controles de solo fertilizado e não fertilizado (representados pelas linhas tracejadas) após aplicações de biochar (BC), fertilizante inorgânico (IF) ou uma combinação (BC+IF). Os dados foram extraídos de duas meta-análises, cada uma com mais de 55 estudos (Ye et al.¹ e Bai et al.²). Cada caixa representa 95% do intervalo. Observação: Para o controle fertilizado, o tamanho do efeito para IF é a linha tracejada, já que o controle fertilizado é IF. (Dados de Ye et al.)¹

Efeitos do rendimento do biochar em solos não fertilizados

- O estudo de Ye (2019) constatou que o biochar produziu menos efeito de rendimento do que o fertilizante em controles não fertilizados. No entanto, o biochar combinado com o fertilizante foi mais eficaz (em média, em todos os testes) do que a soma de ambos os efeitos isoladamente.

- O estudo posterior de Bai (2022), com maior confiança (intervalos de confiança de 95% menores), encontrou aproximadamente a mesma eficácia para o BC e o IF. Novamente, a combinação de biochar e fertilizante produziu um efeito de rendimento maior do que qualquer um deles isoladamente.

Pontos principais

- A melhoria relativa na eficácia do biochar isolado relatada no conjunto de dados mais recente pode, em parte, ser devida ao fato de os pesquisadores encontrarem melhores maneiras de direcionar o biochar para as restrições e condições do solo (ou seja, projetar aditivos de biochar mais adequados à finalidade).
- Quando não há fertilizante disponível, ou há um fertilizante limitado, a aplicação de biochar (especialmente um biochar adequado para a finalidade) pode ajudar bastante na produtividade.
- Entretanto, o fertilizante combinado com o biochar proporciona um aumento de rendimento muito maior do que qualquer um deles isoladamente, muitas vezes além da soma dos efeitos individuais. Isso se deve aos sinergismos entre biochar e fertilizante, incluindo a capacidade do biochar de reter e liberar nutrientes e aumentar a eficiência da absorção de nutrientes (discutida em seções posteriores). A combinação de fertilizante com biochar pode aumentar a eficácia e a confiabilidade do aumento da produtividade e reduzir o uso e o custo do fertilizante.

Efeitos do rendimento do biochar em relação aos controles fertilizados

- O biochar sozinho produziu menos rendimento (Y_e) ou um rendimento não significativamente maior (Bai) do que os controles fertilizados. (Isso não está representado na Figura. 6.1 porque os valores numéricos não estavam disponíveis nos artigos, mas é consistente com o resultado do biochar em relação ao fertilizante na análise dos controles não fertilizados).
- Em relação aos controles fertilizados, o BC+IF proporcionou aumentos no rendimento (média de todas as comparações) de 15% de acordo com Y_e e 25% de acordo com Bai.

Pontos principais

- Quando a alteração do fertilizante é uma prática padrão, a aplicação bem-sucedida do biochar para aumentar a produtividade geralmente requer a combinação do biochar com o fertilizante para obter seus efeitos sinérgicos.
- No entanto, alguns biochars, como o biochar feito de cama de frango, podem produzir um aumento de rendimento semelhante ou superior ao do fertilizante químico.
- Considerando as médias simples das meta-análises de Ye (2017) e Bai (2019), podemos resumir o efeito geral do rendimento em ambos os estudos:

Efeito de rendimento em relação a solos de controle não fertilizados	43%	A
Efeito da produtividade em relação aos solos de controle fertilizados	20%	B
Efeito do fertilizante em relação aos controles não fertilizados	24%	C
Notavelmente, $A = B + C$ é muito próximo		

- Em sua meta-análise, Bai et al. constataram aumentos muito grandes na produtividade em estudos que combinaram biochar com IF e aditivos orgânicos (resultados não mostrados na Figura 6.1).²
- Deve-se ter em mente que esses aumentos substanciais de rendimento são médias de todos os tipos e condições de emendas. Aumentos mais substanciais serão obtidos em solos fertilizados e não fertilizados quando os aditivos de biochar e as taxas de aplicação forem otimizados para atender às restrições e condições específicas do solo (projeto adequado à finalidade).
- Ao projetar os aditivos de biochar, é importante garantir que haja nutrientes suficientes no aditivo combinado com o solo para saturar o biochar e atender à necessidade da planta por nutrientes disponíveis, além de garantir que o aditivo de biochar seja sustentável em termos de custo. Os métodos para fazer isso estão descritos no Capítulo 8.

EFEITOS DO RENDIMENTO DO BIOCHAR AO LONGO DO TEMPO

Ye et al. também estudaram os efeitos da aplicação de biochar ao longo do tempo, extraindo dados dos estudos que relataram rendimentos de colheitas subsequentes por três a quatro anos após uma única aplicação de biochar.¹ Eles descobriram que uma única aplicação de biochar, com ou sem fertilizante, produziu o maior aumento de rendimento em relação a um controle não fertilizado no segundo ano após a aplicação (105%; variação de 59% a 177%; Figura 6.2). O efeito médio no primeiro ano foi menos da metade (48%), e nenhum efeito significativo foi observado após o segundo ano. Por outro lado, um efeito significativo na produtividade das culturas em relação aos controles fertilizados só foi observado após o segundo ano, com um efeito médio de 30% em mais de três anos.

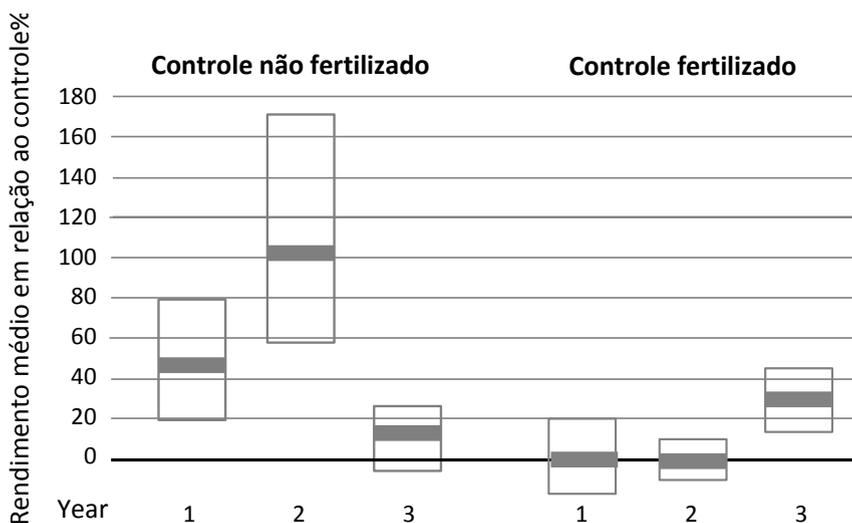


Figura 6.2 – Mudanças no rendimento da cultura ao longo dos anos, desde uma única aplicação de biochar (combinando todos os ensaios com e sem o uso de fertilizante) em relação aos controles não fertilizados e aos controles fertilizados. As caixas de erro contêm 95% da variação. Os tamanhos médios dos efeitos foram calculados a partir do número total de comparações entre pares (170 e 69). (Modificado de Ye et al.)¹

O aumento do rendimento ao longo do tempo após uma única aplicação de biochar vem das propriedades que se desenvolvem com o envelhecimento do biochar. O biochar que envelheceu no solo por um ou dois anos pode ser mais eficaz do que o biochar fresco (ou seja, em seu primeiro ano). No entanto, o efeito do rendimento do biochar pode diminuir novamente após

dois ou mais anos, dependendo do tipo de biochar usado, do solo, da prática agronômica e de outros fatores ambientais. A redução no rendimento foi atribuída à lixiviação progressiva do biochar e dos nutrientes e ao esgotamento da alcalinidade.³ Outros mecanismos também podem ser aplicados, incluindo a mineralização do biochar e a cobertura dos poros ativos e da superfície com minerais e matéria orgânica.

Essas descobertas sugerem que é importante reaplicar regularmente o biochar. Notadamente, as comunidades indígenas adicionam biochar a cada um a três anos para manter a produtividade das plantas, e estudos históricos descobriram que essa prática resultou em fertilidade e carbono do solo a longo prazo. Estudos recentes de longo prazo demonstraram que uma mistura de material orgânico e biochar aplicada a cada safra pode melhorar substancialmente o rendimento.⁴

Ponto principal

A eficácia do biochar para aumentar a produtividade, a resistência das plantas a doenças, a qualidade dos alimentos e a saúde do solo depende das mudanças ocorridas à medida que o biochar envelhece. A taxa de alteração é uma função do tipo de biochar, das propriedades do solo, das práticas agronômicas e dos fatores ambientais.

EFEITOS DA PRODUÇÃO DE BIOCHAR POR CATEGORIAS DE BIOCHAR, SOLO E AMBIENTE

Os aumentos de produtividade da cultura causados pelas adições de biochar (combinando os resultados de biochar e Biochar+Fertilizante) são mostrados em categorias definidas por tipo de biochar, tipo de cultura, propriedades do solo e clima, na Figura 6.3. Os aumentos de rendimento em relação aos controles não fertilizados são muito maiores na maioria das categorias do que os relativos aos controles fertilizados, como foi o caso dos rendimentos gerais já discutidos. As variáveis que exerceram maior influência sobre a produtividade das culturas estavam relacionadas às propriedades do biochar (incluindo a matéria-prima e a temperatura mais alta de tratamento – TTT), às propriedades iniciais do solo e à quantidade de fertilizante N adicionado nas aplicações de Biochar+Fertilizante. Nossos comentários para cada categoria estão listados à direita da Figura 6.3.

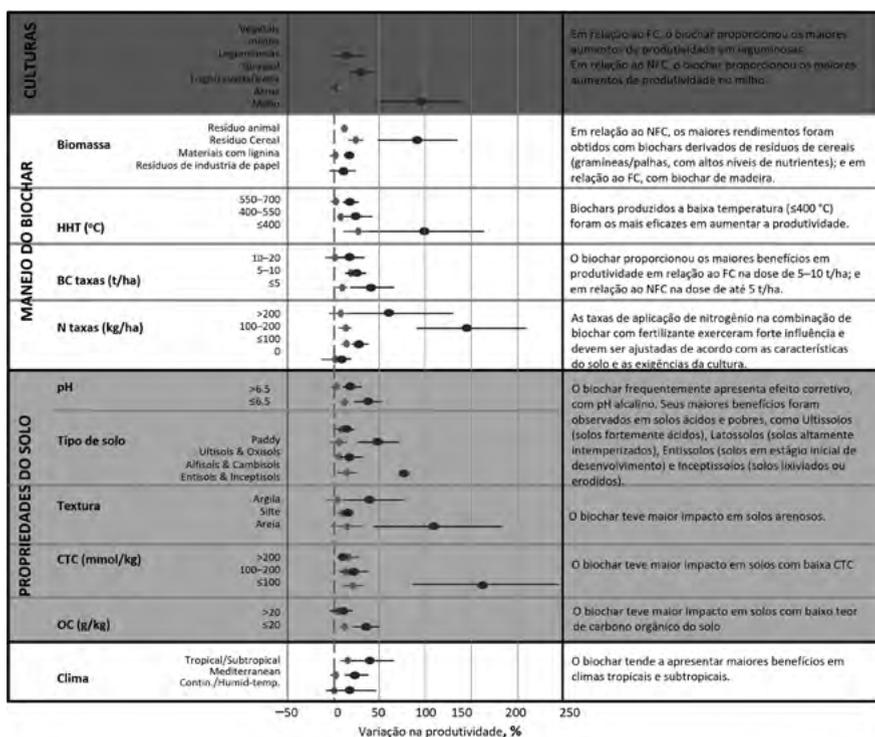


Figura 6.3 – Mudanças proporcionais na produtividade das culturas em relação aos controles causadas pela adição de biochar (BC) para culturas, biochars, solos e climas listados à esquerda. Os pontos em cinza escuro representam mudanças nos rendimentos em relação aos controles não fertilizados. Os pontos cinza claro representam as mudanças nos rendimentos em relação aos controles fertilizados. Cada ponto de dados é a média de muitas tentativas de vários estudos. As barras de erro representam intervalos de confiança de 95%. Os comentários dos presentes autores estão listados à direita. (Modificado de Ye et al.)¹

Pontos principais

- Os efeitos da aplicação de biochar em relação aos controles fertilizados apresentaram tendências semelhantes, mas efeitos muito menores do que aqueles relativos aos controles não fertilizados.
- Os biochars produzidos em baixas temperaturas a partir de resíduos de cereais, esterco ou cama de aves produzem maiores aumentos de rendimento. Esses biochars têm alto teor de nutrientes e compostos orgânicos disponíveis. Além de fornecer alimento para microrganismos benéficos, algumas das moléculas orgânicas podem ajudar as sementes a germinar e estimular a planta a absorver nutrientes.
- Solos ácidos, arenosos, argilosos, lixiviados, oxidados, com baixo teor orgânico ou baixa capacidade de troca catiônica (CTC) produziram maiores rendimentos de culturas quando o biochar foi adicionado a 5 t/ha ou menos, em comparação com os rendimentos de controles não fertilizados.
- O estudo de Ye et al. examinou apenas ensaios em que o biochar havia sido aplicado a mais de 2 t/ha. Outros estudos descobriram que menos de 200 kg/ha de biochar incorporado ao fertilizante ou com ele pode produzir aumentos de rendimento significativos.
- Os resultados apresentados nas Figuras 6.1 a 6.3 representam médias amplas em uma grande variedade de biochar, solo, cultura e clima, além da categoria que está sendo examinada. Resultados médios muito melhores poderiam ser obtidos com testes usando biochars projetados e otimizados para atender a restrições específicas de solo, planta e ambiente, conforme descrito no Capítulo 7.

EFEITOS DO BIOCHAR NAS PLANTAS

Além do aumento da produtividade, o biochar pode ter uma série de efeitos sobre as características das raízes e das folhas, a fotossíntese, a abundância de microrganismos promotores de crescimento que vivem na zona das raízes e no interior das plantas, a resistência a doenças e a qualidade dos alimentos. Os efeitos dependem do tipo de biochar que é aplicado e de sua taxa de aplicação. Para ser eficaz, o biochar deve ser aplicado na zona da raiz da planta.

O impacto do biochar nas características das raízes

O biochar pode ter um efeito significativo nas propriedades das raízes:⁵

- Os aumentos foram medidos na biomassa da raiz, no volume, na área de superfície, no comprimento, no número de pontas da raiz, no número de nódulos para leguminosas, na concentração de fósforo na raiz e na colonização da raiz por fungos, em comparação com um controle sem biochar.
- Houve um aumento maior na biomassa e no comprimento da raiz em culturas anuais (especialmente leguminosas) do que em plantas perenes.
- Os aumentos gerais da biomassa da raiz foram maiores em solos arenosos, seguidos por argila (especialmente em solos com pH superior a 7).
- Os biochars de pirólise rápida, com temperaturas de tratamento entre 450 °C e 600 °C, produziram o maior aumento no comprimento da raiz. Isso pode ser devido ao alto teor de compostos orgânicos que se condensam nas superfícies dos poros do biochar.

Aplicar biochar na zona de raiz das plantas

O biochar concentrado na zona da raiz tem um efeito muito maior sobre as plantas do que o biochar disperso no perfil do solo. As partículas de biochar nas raízes ou próximas a elas podem ter os seguintes benefícios para as plantas:

- Os pelos da raiz da planta entram na partícula de biochar e absorvem nutrientes e água do biochar.
- Os pelos da raiz estabilizam o biochar na superfície da raiz, reduzindo o transporte do biochar para fora da rizosfera.
- As moléculas orgânicas exsudadas pela planta podem ser adsorvidas nas superfícies do biochar e nos poros. Isso ajuda a reter o carbono orgânico próximo às raízes, onde ele fornece alimento para os microrganismos. Se, posteriormente, os poros forem bloqueados com argila ou se o carbono se complexar com a argila, o carbono poderá ser adicionado ao armazenamento de longo prazo do carbono sequestrado no solo.

- No cultivo de arroz, onde os solos são inundados, o biochar pode ser incorporado em uma camada de placa que se forma na raiz (Figura 6.4).⁶

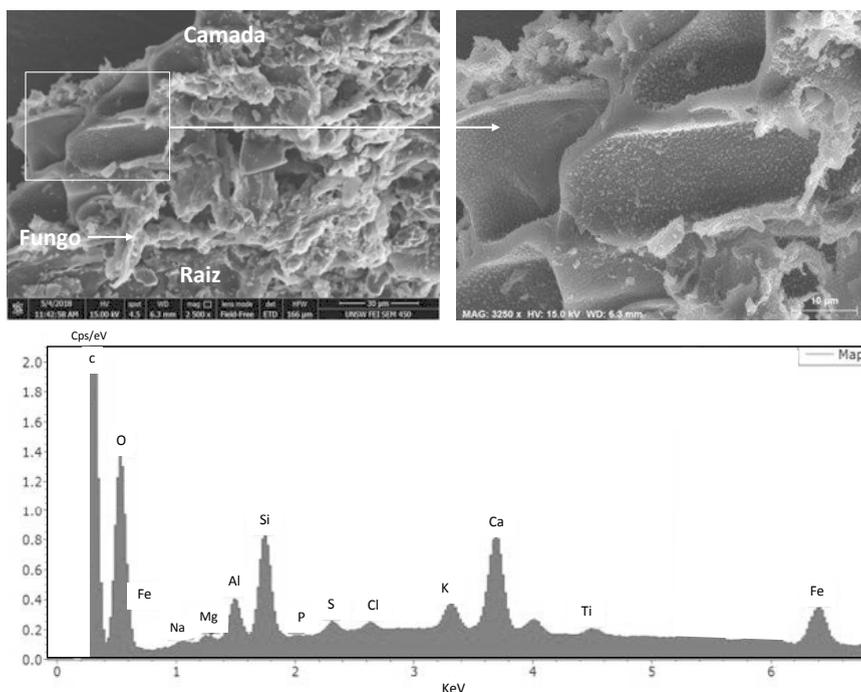


Figura 6.4 – Parte superior esquerda: Um pedaço de biochar de palha de trigo incorporado na camada de solo que se forma nas raízes do arroz. **Acima, à direita:** Uma imagem ampliada da partícula de biochar incorporada. Nanopartículas minerais finas revestem as superfícies dos poros do biochar. **Embaixo:** Análise de raios X da área ampliada mostrando altos teores de alguns nutrientes na superfície do biochar. Os nutrientes podem estar disponíveis para serem absorvidos pela planta.

- O biochar pode aumentar a abundância de microrganismos que promovem o crescimento, tanto fora quanto dentro da raiz, o que ajuda a tornar os nutrientes mais disponíveis para a planta (Figura 6.5).⁶
- O biochar na superfície da raiz pode aumentar a diferença de potencial elétrico entre a superfície da raiz e o interior da célula da raiz. Isso pode reduzir a quantidade de energia que uma planta precisa gastar para absorver nutrientes, promovendo uma absorção mais rápida dos nutrientes (consulte a Figura 6.5 e o Capítulo 4: Propriedades eletroquímicas e elétricas).

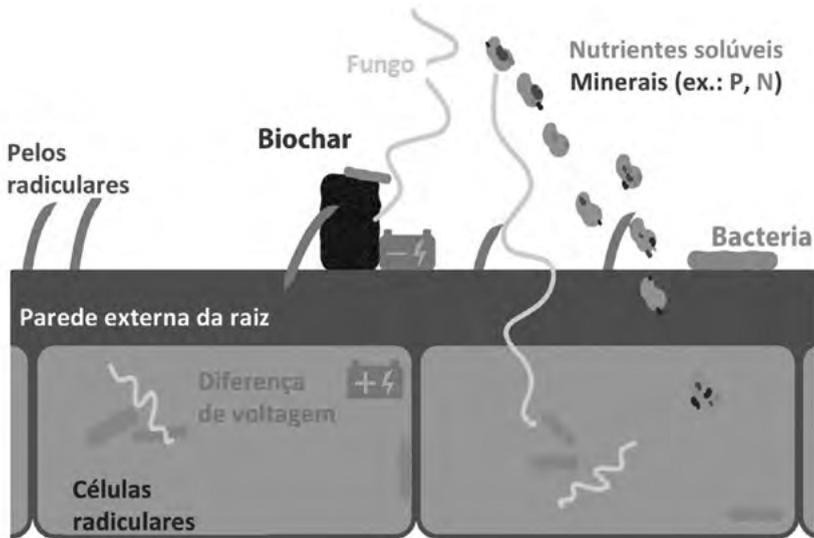


Figura 6.5 – Esquema das interações bacterianas e fúngicas na superfície de uma raiz próxima a uma partícula de biochar

- O biochar ao redor das raízes pode capturar metais pesados e outras toxinas e impedir sua absorção pela planta.

Ponto importante

O excesso de biochar na rizosfera pode reduzir a biomassa acima e abaixo do solo e a produtividade da cultura, além de reduzir a capacidade da planta de resistir a doenças e a estresses ambientais.

Um método para estimar a possível taxa de aplicação ideal de biochar será descrito em uma publicação futura. Recomendamos que todos os agricultores façam testes baseados em taxas em parcelas relativamente pequenas antes de adicionar biochar a toda a sua fazenda.

O biochar estimula as folhas e a fotossíntese

Uma meta-análise global publicada em 2020 constatou que a aplicação de biochar aumentou a taxa fotossintética, a taxa de transpiração e a eficiência do uso da água em cerca de 27% cada. A condutância estomática e a concentração de clorofila melhoraram em 20% e 16%, respectivamente. A biomassa total da planta melhorou em 25% (biomassa do broto 22%, biomassa da raiz 34%).⁷

A emenda de biochar aumentou amplamente a fotossíntese e a biomassa das plantas C3 (adaptadas ao estabelecimento em estações frias; por exemplo, trigo), mas teve efeito limitado nas plantas C4 (adaptadas a climas mais quentes; por exemplo, milho) (veja a Figura 6.6). Os autores do estudo recomendam que o biochar com pH mais alto (calagem) e menor teor de carbono seria uma boa opção para sistemas dominados por plantas C3. Os resultados permitem a elaboração de estratégias eficazes para a aplicação extensiva de biochar no gerenciamento da produção agrícola, inclusive para aumentar a biomassa para sequestro de carbono e mitigação do aquecimento global.

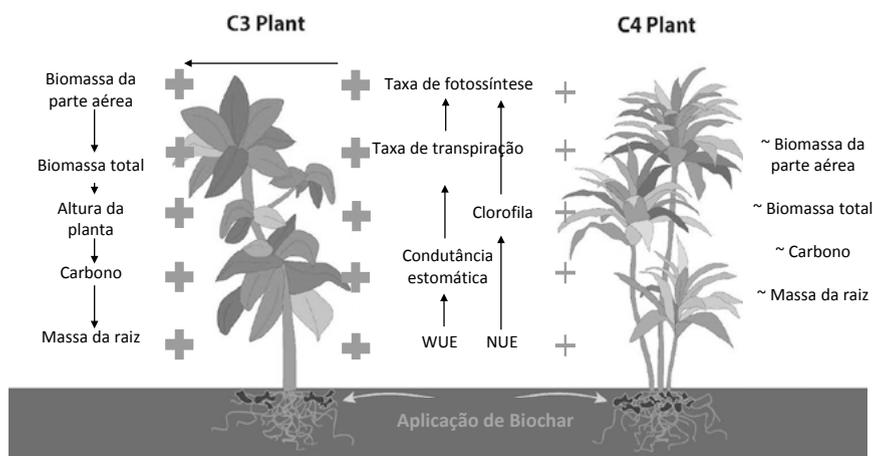


Figura 6.6 – Efeitos da emenda de biochar na taxa de fotossíntese da planta e, consequentemente, na biomassa e em outras propriedades, variando com plantas C3 e C4. O biochar melhorou a eficiência do uso da água (WUE) e a eficiência do uso do nitrogênio (NUE), o que melhorou a função da planta ao longo de uma cadeia de causalidade indicada pelas setas finas (centro). O destaque dos sinais de mais menores indica que as respostas positivas foram maiores para as plantas C3 do que para as C4. Isso, por sua vez, levou a aumentos na biomassa e no suprimento de carbono para as raízes das plantas C3 (setas de causalidade e sinais de mais maiores, no lado esquerdo), mas não teve efeitos significativos na biomassa das plantas C4 (lado direito, ~ representa efeito não significativo). (Modificado de He et al.)⁷

O biochar pode melhorar a resistência a doenças

Muitos estudos demonstraram que o biochar pode melhorar a resistência das plantas ao ataque de insetos, bactérias e fungos patogênicos. A capacidade de proteger uma planta contra o ataque é uma função das propriedades do biochar, da quantidade de biochar que foi aplicada, das mudanças nas propriedades do biochar à medida que ele envelhece e do tipo de patógeno. O aumento da resistência da planta a doenças pode ser devido a alguns ou a todos os seguintes fatores:

- Eh e pH do solo mais favoráveis, que aumentam o fornecimento e a disponibilidade de nutrientes, reduzem os microrganismos patogênicos e aumentam os microrganismos benéficos.
- A liberação de moléculas orgânicas com propriedades antimicrobianas pelo biochar.
- Dissolução do silício dos biochars na zona da raiz, que é então absorvido pela planta, tornando as folhas e os caules mais duros e resistentes.
- A capacidade do biochar de adsorver compostos específicos de agentes patogênicos, diminuindo assim a gravidade da doença.
- As propriedades antioxidantes do biochar, que reduzem as espécies reativas de oxigênio, aliviando assim o estresse causado por patógenos.
- Elétrons armazenados no biochar que ajudam a destruir os agentes patogênicos que habitam o biochar.

BIOCHAR E ÁCIDO PIROLENHOSO PODEM MELHORAR A QUALIDADE DOS ALIMENTOS

Além de aumentar a produção de alimentos e a resistência a doenças, o biochar e o ácido pirolenhoso podem influenciar positivamente o perfil nutricional e o prazo de validade das culturas. Até onde sabemos, não foi publicada nenhuma revisão abrangente ou meta-análise dos efeitos do biochar e do ácido pirolenhoso na qualidade dos alimentos. No entanto, estudos individuais exploraram os impactos dessas intervenções em vários parâmetros de qualidade de vegetais, árvores frutíferas e grãos.

Efeitos do biochar nos alimentos

A seguir, apresentamos um resumo de algumas das pesquisas sobre o efeito da emenda sólida de biochar na qualidade dos alimentos:

- Milho e trigo cultivados sob o manejo integrado de nutrientes otimizado por biochar não só aumentaram a produtividade, mas também produziram alimentos com mais proteína, carboidrato e mais nutritivos. Foram obtidos melhores resultados com 75 ou 100% do NPK recomendado juntamente com 5 t/ha de biochar de caule de algodoeiro, em relação aos tratamentos com 25% ou 50% de NPK+ Biochar, ou 100% de NPK sem biochar. Em relação ao controle (sem biochar, sem NPK), a absorção de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e Zn) aumentou. O aumento variou de 67% para N a 26% para Zn, tanto no milho quanto no trigo, e foi de 71% para P e K no trigo.⁸
- O teor de carboidratos e proteínas e os nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Zn) do milho aumentou quando o biochar da biomassa do algodoeiro, produzido a 400 °C, foi aplicado a ele.⁸
- O biochar de palha de arroz produzido por pirólise rápida a 500-550 °C, aplicado a 10 t/ha antes da semeadura de sementes de girassol, seguido de 30 e 55 dias de adição de silício, aumentou a qualidade e o rendimento do óleo de girassol cultivado sob estresse de déficit hídrico.⁹
- Diversos artigos relatam que os biochars aumentam os açúcares totais, os sólidos solúveis, a acidez titulável, a relação açúcar-ácido, a vitamina C e/ou o licopeno em frutos de tomate.¹⁰
- O fertilizante à base de biochar aplicado a uma taxa próxima a 2.500 kg/ha aumentou a eficiência do fertilizante, bem como o rendimento, o teor de vitamina C, o açúcar solúvel, o valor da produção e a renda líquida dos frutos da berinjela e do tomate.^{11,12}
- O biochar de madeira produzido a 450 °C e aplicado a 2% ou 3% aumentou a biomassa de brotos e raízes, além de melhorar a morfologia das raízes e a atividade enzimática do solo, aumentando assim o teor de clorofila, o açúcar total e os flavonoides no manjeriço doce em relação às plantas de controle.¹³
- Quando o biochar da folha e colmo de mandioca foi aplicado com fertilizante ao arroz, o teor de proteína, o teor de amilose e o rendimento do arroz integral foram maiores em 16%, 28% e 4,6%, respectivamente, tanto nas colheitas do início quanto nas do final da estação.¹⁴

- Um estudo sobre o efeito do biochar no crescimento da alface mostrou que os teores totais de clorofila e carotenoides melhoraram com o aumento dos níveis de biochar (Figura 6.7), sendo que o tratamento com 3% de biochar aumentou esses teores em 43% e 51%, respectivamente, em comparação com o controle.¹⁵ A aplicação acima de 3%, também produziu as maiores melhorias nos fatores de crescimento da folha e da raiz e nas enzimas do solo, enquanto a emenda de 2% e 3% de biochar produziu taxas de germinação iguais.

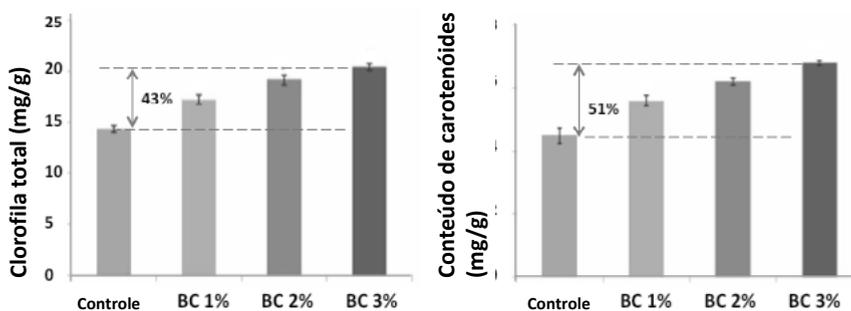


Figura 6.7 – Efeitos das emendas de biochar (BC) (1%, 2%, 3%) sobre o teor total de clorofila (esquerda) e de carotenoides (direita) da alface. (Adaptado de Jabborova et al.)¹⁵

- O biochar pode reduzir os níveis de metais pesados nas plantas, mas a extensão da redução depende do metal pesado, da planta e do tipo de biochar. Um artigo recente relatou que a maioria dos biochars reduziu o Pb, o Cd e o Zn nas plantas em 10 a 40%.¹⁶ Alguns biochars aumentaram ligeiramente a absorção de Cu pelas plantas, enquanto outros reduziram a absorção de Cu (cobre). O biochar de lodo de esgoto aumentou a absorção de metais pesados, mas isso dependeu das propriedades do solo e das plantas específicas que foram cultivadas. Os biochars de esterco resultaram nos níveis mais baixos de Pb, Cd e Cu nas plantas. A adsorção de metais pesados por biochars é descrita no Capítulo 4.

Efeitos das pulverizações foliares de biochar

Um estudo relatou que o líquido de biochar de palha de trigo e de milho aplicado em diluições de 50 ou 100 vezes aumentou significativamente o rendimento, o teor de vitamina C e o teor de proteína solúvel do repolho, ao mesmo tempo em que diminuiu o teor de nitrato. O spray foi aplicado dez vezes durante a estação de crescimento.¹⁷

A aplicação foliar de baixas doses de extratos aquosos de biochars ativados por organominerais produzidos a partir de madeira de pinheiro/argila/areia e palha de trigo/excremento de aves aumentou o crescimento da alface.¹⁸ As nanopartículas minerais e de biochar revestidas de carbono se difundiram pelos estômatos (Figura 6.8) e aumentaram o conteúdo de pigmentos fotossintéticos (carotenoides e antocianinas). Os pigmentos fotossintéticos podem aumentar o crescimento das plantas e também atuam como antioxidantes, fortalecendo a resistência das plantas contra fatores de estresse, como salinidade, seca e metais pesados. Esses benefícios foram obtidos por meio da aplicação foliar em taxas de aplicação de biochar muito mais baixas do que as normalmente relatadas para a aplicação de macrobiochar no solo.

Como o número de ensaios publicados com pulverizações foliares de biochar é pequeno, recomenda-se que os agricultores realizem ensaios iniciais baseados em taxas para determinar uma taxa de aplicação eficaz ou ideal.

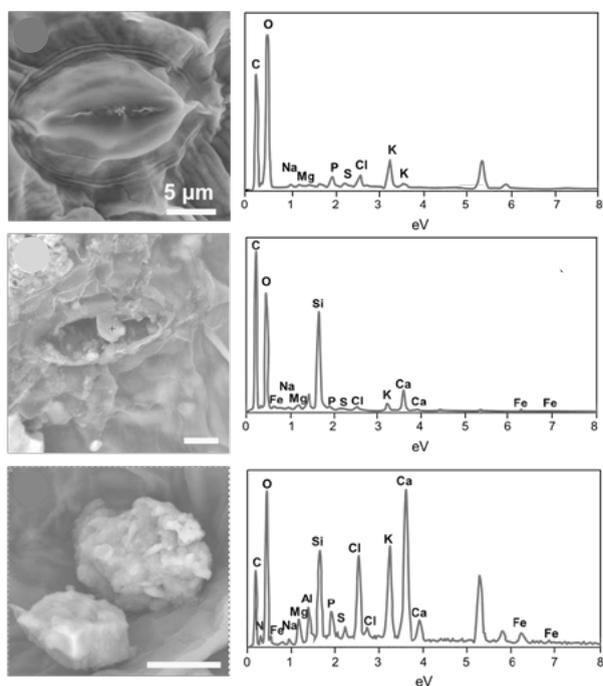


Figura 6.8 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura e análise elemental de biochar e minerais revestidos de carbono dentro e ao redor dos estômatos. **Parte superior:** Estômato. **Ao centro:** Folha tratada com biochar com estômato e complexos organo minerais. **Parte inferior:** Imagem de alta resolução de minerais orgânicos dentro do estômato.¹⁸

Efeitos do ácido pirolenhoso nas plantas

O ácido/extrato pirolenhoso refinado (WV), também conhecido como ácido pirolenhoso (AP), produzido a partir da condensação de voláteis nos estágios iniciais da pirólise de biomassa (180 °C a 250 °C), é rico em substâncias biologicamente ativas, como polifenóis, álcoois, ácidos e ésteres. Na Ásia, a maior parte do extrato pirolenhoso vem da pirólise de bambu, de algumas madeiras de lei ou da palha de plantações. Mais de 150 artigos revisados por pares foram publicados sobre os benefícios de diferentes tipos de extrato pirolenhoso quando aplicados como spray foliar ou como irrigação do solo.

Uma recente revisão da literatura¹⁹ concluiu que o extrato pirolenhoso oferecia perspectivas interessantes para aprimorar os serviços ecossistêmicos do solo. Esses serviços incluem o aprimoramento da ciclagem de nutrientes e da absorção pelas plantas, o aumento da produção de alimentos, o gerenciamento do armazenamento de carbono e das emissões de gases de efeito estufa e o aumento da diversidade da microbiota. Os mecanismos pelos quais o extrato pirolenhoso exerce esses efeitos ainda não foram totalmente elucidados (devido à sua complexa composição química, que varia de acordo com as condições de produção e a matéria-prima). Embora os compostos tóxicos possam estar presentes no extrato pirolenhoso não foi relatada nenhuma evidência de genotoxicidade associada a ele ou a produtos relacionados (como água de fumaça derivada de plantas e bio-óleos de pirólise). Além disso, ele é facilmente biodegradável no solo nos primeiros 30 dias após a aplicação.

Verificou-se que o extrato pirolenhoso produzido a partir de castanhas doces aplicado a mudas de alface como uma aplicação foliar a 0,25% e 0,5% aumentou a clorofila (50%), a biomassa (49%), o amido (dobrou), o teor de açúcar, o ácido cafeico, o teor de quercetina e o poder antioxidante.^{20,21} O mesmo extrato pirolenhoso aplicado a sementes de grão-de-bico levou a um aumento no diâmetro (11%), no peso (33%), no teor de amido (46%), proteína solúvel total (13%), polifenol total (16%) e potencial antioxidante (28%) do grão-de-bico. A maioria dos aminoácidos essenciais e elementos minerais também aumentou.²²

Em experimentos de campo que exploraram o efeito do biochar de bambu e do extrato pirolenhoso no rendimento e na qualidade da batata-doce, constatou-se que a aplicação de biochar aumentou o número de tubérculos, enquanto o extrato pirolenhoso aumentou o rendimento em peso. O biochar e o extrato pirolenhoso combinados melhoraram o teor de açúcar, a aparência e a comercialização da batata-doce.²³

Co-aplicação de biochar e extrato pirolenhoso

O extrato pirolenhoso é frequentemente aplicado com biochar, e vários estudos relataram os efeitos combinados. Pesquisadores italianos realizaram testes em vasos comparando a aplicação de 20% (p/p) de biochar derivado de madeira, fertirrigação semanal com 0,5% (v/v) de extrato pirolenhoso, ou ambos, em videiras jovens.²⁴ Eles relataram efeitos sinérgicos entre biochar e extrato pirolenhoso na fisiologia da planta com respostas positivas, especialmente em termos de crescimento da raiz. No entanto, os efeitos específicos sobre a biomassa do broto e da raiz, os teores de nutrientes e o conteúdo de aminoácidos foram relacionados de forma complexa ao fato de o biochar ou o extrato pirolenhoso terem sido aplicados separadamente ou em conjunto, indicando a necessidade de os agricultores realizarem testes para suas culturas e condições específicas. Deve-se observar que grandes quantidades de biochar, como as usadas nesses testes em vasos, podem ser econômicas quando aplicadas na zona da raiz para o estabelecimento de culturas de alto valor.

Outros pesquisadores na Itália realizaram testes sobre a coaplicação de biochar e extrato pirolenhoso em manjerição de estufa.²⁵ Eles compararam biochar a uma taxa de 2% p/p (BC), fertirrigação com extrato pirolenhoso a 1% de diluição (extrato pirolenhoso), ambos combinados (BC+AP) e nenhum (controle). Além do aumento esperado no carbono orgânico total (TOC) devido à adição de biochar, a presença de biochar (com ou sem AP) aumentou substancialmente o carbono orgânico dissolvido (DOC), em relação ao controle, tanto no solo em massa (50%) quanto na rizosfera (58%). O biochar (especialmente o biochar de cavaco de madeira de alta temperatura usado nesse experimento) pode capturar e estabilizar moléculas orgânicas do solo, do extrato pirolenhoso e da rizosfera.

O carbono microbiano do solo foi estimulado por todos os aditivos, conforme mostrado na Figura 6.9, sendo o tratamento combinado o mais eficaz, especialmente na rizosfera. O BC+AP proporcionou um aumento de 52% em relação ao controle nos solos em massa e um aumento de 62% (0,11g de C por kg de solo) na rizosfera.

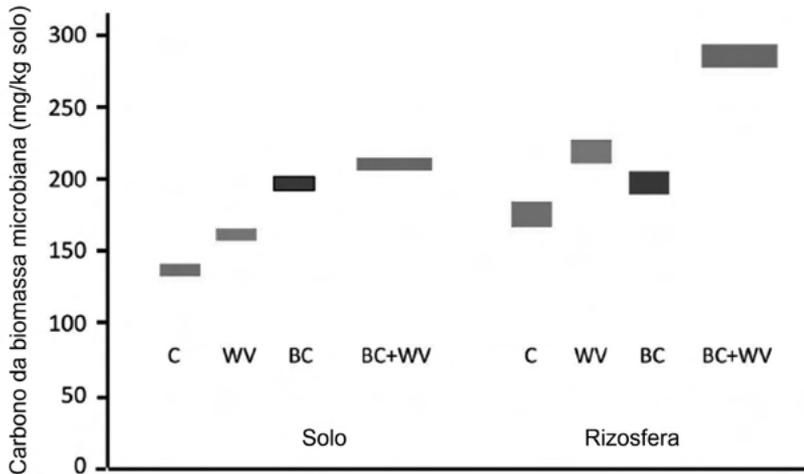


Figura 6.9 – Quantidade de carbono da biomassa microbiana no solo de massa e na rizosfera sob diferentes tratamentos. As larguras verticais das caixas representam intervalos de confiança de 95%. BC = biochar, WV = ácido pirolenhoso, BC+WV = fertilização com biochar e ácido pirolenhoso. (Adaptado de Becagli et al. 25)²⁵

A atividade enzimática (com exceção da β -glucosidase) foi estimulada pelo WV. A coaplicação BC+WV estimulou mais fortemente as atividades de fosfatase e urease, mas a presença isolada de biochar reduziu a atividade de outras enzimas – embora em menor grau quando combinado com o WV.

A eficácia das aplicações em aumentar o nitrogênio total e o fósforo disponível tendeu a seguir a ordem: BC+WV \geq BC \geq WV. A coaplicação foi particularmente eficaz para o fósforo, elevando o P disponível em 141% no solo de massa e 52% na rizosfera.

Nas medições de N e P no solo da rizosfera, BC+WV e WV apresentaram os maiores valores de NO_3^- , enquanto BC+WV e BC mostraram os maiores teores de íons fosfato, em comparação ao controle, nas semanas 3 e 4.

Conforme mostrado na Figura 6.10, tanto o BC+WV quanto o BC aumentaram a biomassa seca da planta em cerca de 40% e a absorção de N e P da planta em mais de 60% e 100%, respectivamente, em relação ao controle. A eficiência do uso de N e P foi aumentada em 200- 300%.

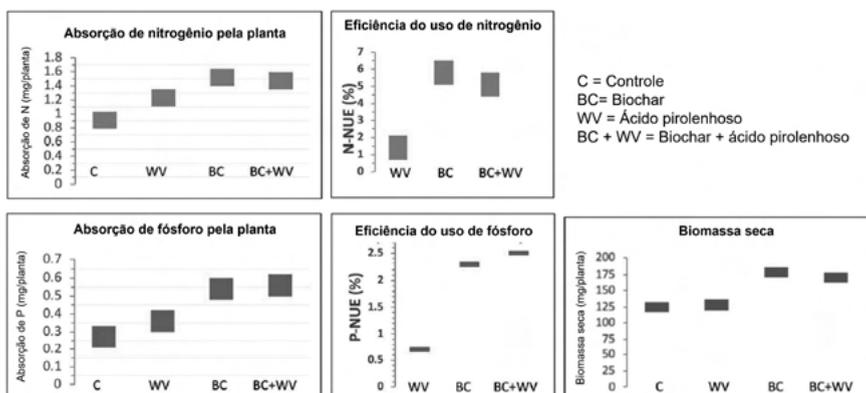


Figura 6.10 – Absorção de nitrogênio, absorção de fósforo e eficiência de uso de nutrientes (NUE) em plantas de manjeriço em resposta a tratamentos com biochar, fertirrigação com extrato pirolenhoso e ambos (controle não relatado para NUE). (Com base em dados de Becagli et al.)²⁵

Os autores concluíram que, embora em alguns casos a aplicação individual tenha sido melhor, a combinação de biochar com fertirrigação extrato pirolenhoso diluída foi eficaz, de modo geral, para aumentar o nitrogênio e o fósforo disponíveis, impulsionar a produção do manjeriço, promover a atividade dos microrganismos do solo, melhorar a qualidade biológica do solo e a biomassa microbiana e aumentar o carbono orgânico no solo e na rizosfera.

EFEITOS DO BIOCHAR NOS SOLOS

Os efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas dos solos dependem muito das matérias-primas, das temperaturas de pirólise e das taxas de aplicação.

O biochar modifica o pH e o Eh do solo

A adição de biochar pode alterar o pH e o Eh do solo. Se os solos não tiverem carbono e forem ácidos e oxidados, a adição de biochar pode aumentar

o pH e diminuir o Eh em uma zona favorável que permitirá a liberação de nutrientes específicos e o crescimento de microrganismos benéficos (Figura 6.11). Se for adicionado biochar em excesso, o Eh e o pH do solo poderão ultrapassar esse ponto ideal e causar efeitos negativos indesejados.^{26,27}

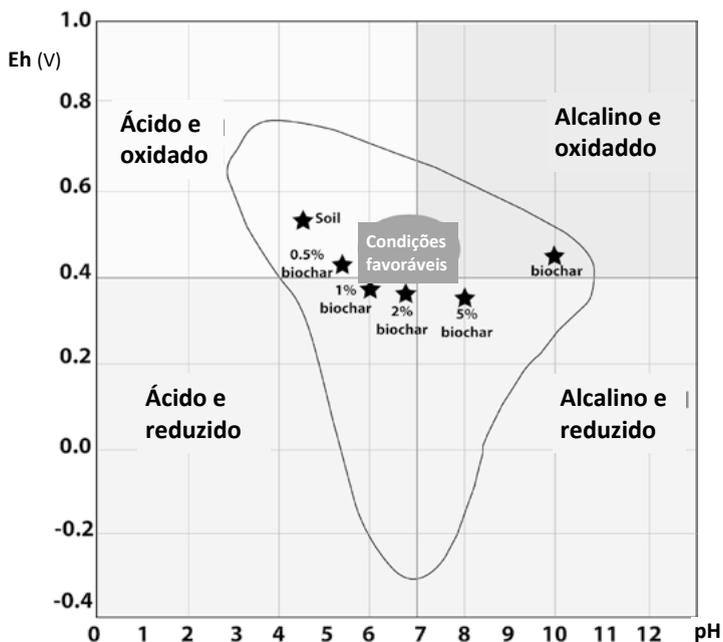


Figura 6.11 – A faixa completa de Eh e pH nos solos e a relação com as condições extremas do solo, mostrando também a faixa normal nos solos e as condições favoráveis limitadas para o crescimento das plantas. O biochar pode reduzir o Eh e aumentar o pH, levando o solo a condições mais favoráveis para o crescimento das plantas. O excesso de biochar pode resultar no aumento do pH acima da faixa favorável. (Modificado de Husson et al. e Joseph et al.)^{26,27}

O biochar melhora as propriedades hidrológicas do solo

Terminologia da água do solo:

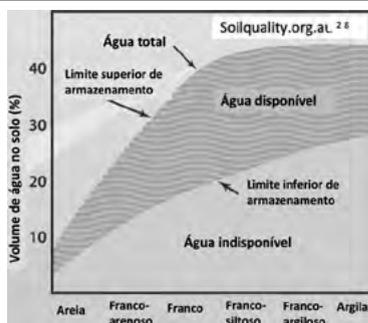
A **capacidade de retenção de água ou capacidade de campo (FC)** é a quantidade máxima de água que o solo pode reter, medida após a drenagem do excesso de água.

O **ponto de murcha (WP)** é a água restante depois que a planta não consegue mais extrair água do solo.

Capacidade de água disponível:

(AWC) = FC - WP

Os solos arenosos podem reter menos água, pois drenam bem. A argila, com seus poros finos, pode reter mais água.



Uma meta-análise realizada por Edeh et al. (2020) avaliou pela primeira vez os efeitos do biochar em várias propriedades hidráulicas do solo.²⁹ Os impactos nas propriedades hidráulicas dependeram muito da taxa de aplicação e do tipo e textura do solo.

Em todos os tipos de solos, matérias-primas, condições de pirólise e taxas de aplicação, o biochar melhorou todas as propriedades hidráulicas, conforme mostrado na Figura 6.12. Em taxas de aplicação superiores a 30 t/ha, as melhorias na capacidade de retenção de água disponível (AWC), na capacidade de campo (FC), no ponto de murcha permanente (PWP) e na condutividade saturada (K_{sat}) foram substancialmente maiores do que as mostradas na Figura 6.12. As melhorias foram ainda maiores quando o biochar e sua taxa de aplicação foram otimizados para o solo. Por exemplo, embora a densidade aparente não tenha sido muito reduzida (-0,8%) quando a média foi calculada em todas as condições, a aplicação de biochar na taxa ideal diminuiu substancialmente a densidade aparente dos solos argilosos. Os principais parâmetros que influenciaram a dinâmica solo-água foram as características físicas do biochar, inclusive o tamanho da partícula, a área de superfície específica e a porosidade (Figura 6.12), ressaltando a importância dos poros interpartículas do solo e do biochar, bem como dos poros intrapartículas dentro do biochar.

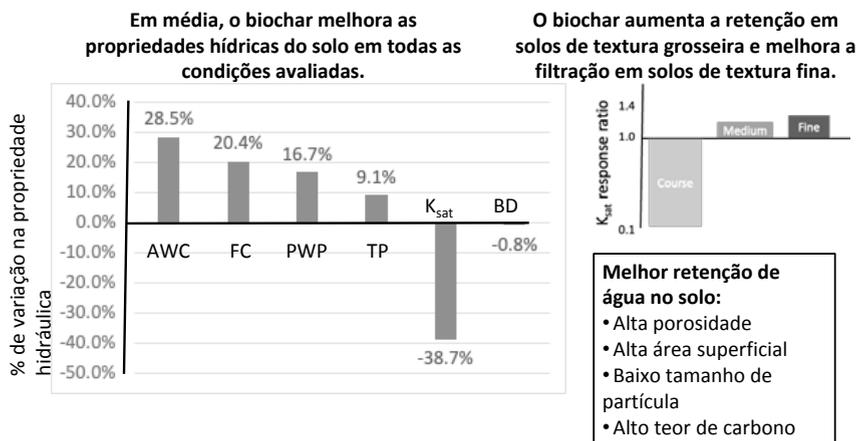


Figura 6.12 – Efeitos do biochar nas propriedades hidráulicas.²⁴ AWC = capacidade de retenção de água, FC = capacidade de campo, PWP = ponto de murcha permanente, TP = porosidade total, K_{sat} = condutividade saturada, BD = densidade aparente. (Adaptado de Edeh et al.)²⁹

Os efeitos do biochar sobre as propriedades da água no solo foram mais pronunciados em solos arenosos de textura grossa, nos quais o biochar aumentou a retenção de água no solo e diminuiu a condutividade hidráulica saturada. Para esses solos arenosos e grossos, o biochar com partículas pequenas (<2 mm), alta área de superfície específica e aplicado em taxas superiores a 30 t/ha até 70 t/ha foi considerado mais eficaz. Por outro lado, o biochar teve um impacto consideravelmente menor na maioria das propriedades da água em solos argilosos (exceto na densidade aparente e na porosidade do solo). No entanto, ele aumentou a condutividade hidráulica e diminuiu a densidade aparente, o que é benéfico para reduzir o escoamento em solos argilosos. As taxas de aplicação necessárias para melhorar as propriedades da água foram menores (<30 t/ha) em solos arenosos grossos do que em solos argilosos de textura fina. Conforme ilustrado na Figura 6.13, uma grande adição de biochar pode preencher os poros dos solos de textura grossa, retendo muito mais água. Os solos de textura fina, com poros muito menores, são menos sensíveis à emenda de biochar e exigem menos biochar para obter a resposta máxima.

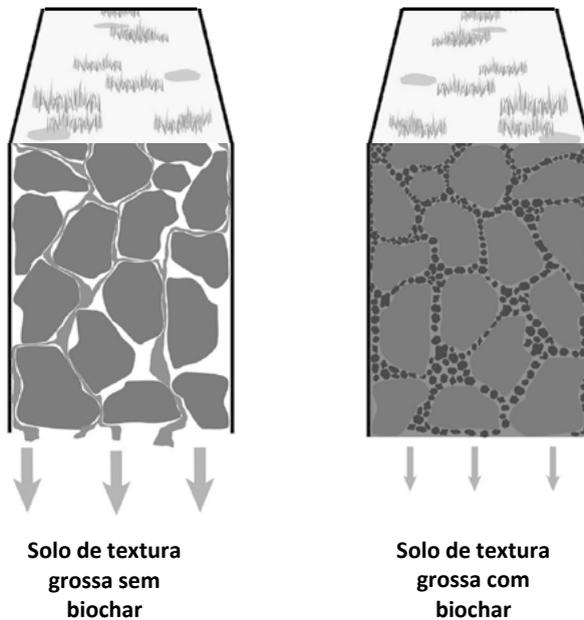


Figura 6.13 – Ilustração esquemática do efeito do biochar na condutividade hidráulica do solo de textura grossa. Uma grande adição de biochar fino pode preencher os poros de solos de textura grossa, retendo muito mais água. (Adaptado de Edeh et al.)²⁹

Os autores concluíram que os benefícios agrônômicos seriam relativamente limitados com as baixas taxas de aplicação de 0,5 a 2 toneladas por hectare, normalmente usadas na agricultura arável, mesmo se praticadas anualmente. No entanto, com a aplicação concentrada na zona das raízes e/ou com a horticultura intensiva, seria possível atingir taxas de aplicação localizadas mais altas. Isso poderia proporcionar maior disponibilidade de água para as raízes, especialmente durante os estágios iniciais vulneráveis do crescimento da planta, quando a seca e outros estresses representam o maior risco.

Wu et al. (2022) realizaram uma meta-análise mais recente, abrangendo 681 observações, que mostrou que a aplicação de biochar aumentou a capacidade de retenção de água disponível (AWC) em 27% e a eficiência do uso da água (WUE) em 4,7%, em média.³⁰ Também levou a um aumento de 36% no carbono orgânico do solo (SOC). A análise causal destacou que o SOC foi um fator crucial para a melhoria do AWC, tanto direta quanto indiretamente, afetando o ponto de murcha permanente (-1,0%) e o diâmetro médio ponderado do agregado (+11%). A porosidade média do solo

(SP) e o conteúdo de água (WC) aumentaram em 7% e 11%, respectivamente, com a emenda de biochar, melhorando assim a WUE. Os maiores benefícios em SP e WC foram obtidos para taxas de aplicação de 30-40 t/ha, usando matéria-prima de resíduos de culturas, em solos com teor de argila (10-20%) (Figura 6.14).

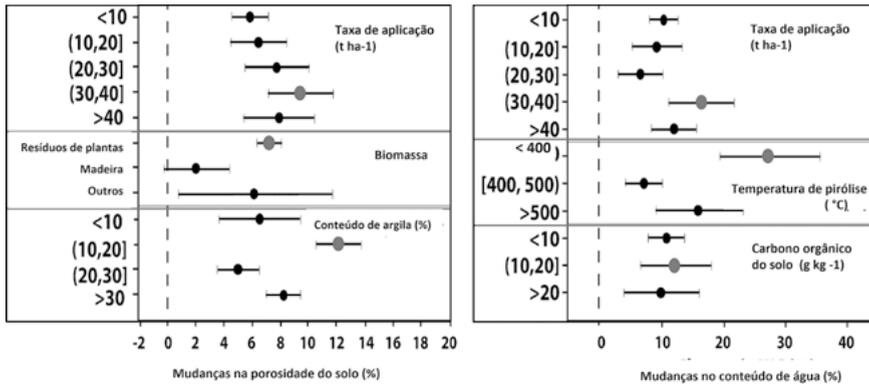


Figura 6.14 – Alterações na porosidade do solo (SP) (esquerda) e no teor de água do solo (WC) (direita), após a aplicação de biochar. As alterações são caracterizadas pelos valores dos seguintes atributos, listados no eixo Y: taxa de aplicação (t/ha), matéria-prima, teor de argila do solo (%), temperatura de pirólise e teor de SOC. As barras de erro representam um intervalo de confiança de 95%. Os maiores efeitos são mostrados em cinza claro. (Modificado de Wu et al.)³⁰

O biochar desenvolve a estabilidade dos agregados do solo

Uma meta-análise realizada em 2021, abrangendo 641 comparações emparelhadas de 119 artigos publicados, constatou que a aplicação de biochar melhorou significativamente a agregação do solo em $16,4 \pm 2,5\%$, independentemente do biochar, das condições experimentais e do solo.³¹ As respostas de agregação do solo à emenda de biochar, em relação a alguns atributos do solo e condições de campo, são mostradas na Figura 6.15.

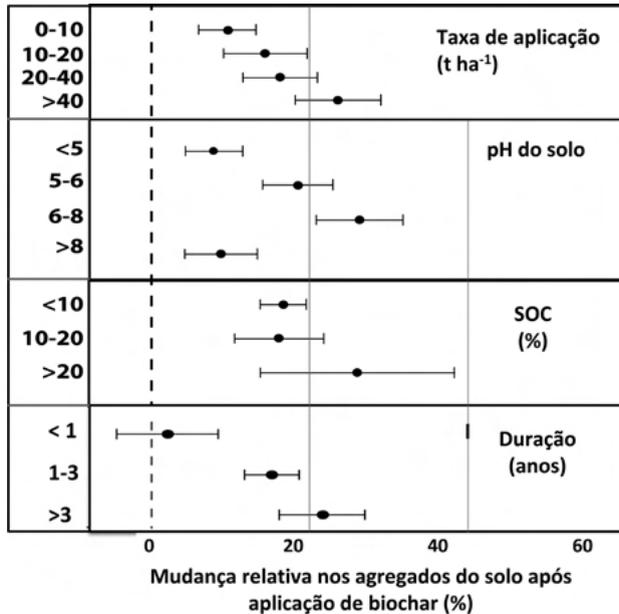


Figura 6.15 – Mudanças na agregação do solo em resposta à taxa de aplicação de biochar, ao pH do solo, à porcentagem de carbono orgânico do solo (SOC) e à duração do campo. As barras representam intervalos de confiança de 95% (Modificado de Islam et al.)³¹

A resposta:

- Aumentou linearmente com a taxa de aplicação de biochar para além de 40 t/ha;
- Foi máxima para o pH do solo na faixa de 6 a 8;
- Melhorou mais em solos com alto SOC (+26%) do que em solos com baixo SOC (+16%);
- Melhorou mais em solos de textura argilosa (+20%) do que em solos arenosos (+13%) (não mostrado na Figura 6.15);
- Se fortaleceu com o tempo, de um efeito insignificante em curto prazo (<1 ano) para mais de 20% em >3 anos.

Também houve indicações, embora não significativas, de que os maiores benefícios para a estabilidade dos agregados vieram dos biochars feitos de madeiras (em relação a palhas, esterco, resíduos de grãos e outros), em temperaturas de pirólise mais altas (>600 °C), com pH do biochar menor que oito. Os biochars de madeira, com estruturas porosas, alta CEC, áreas de superfície e níveis de Fe³⁺, podem adsorver minerais e matéria orgânica, que

servem como locais de ligação para organizar e agregar a estrutura do solo. Além disso, o biochar de madeira tem uma relação C:N relativamente mais alta, o que provavelmente oferece condições favoráveis para o crescimento de fungos, que, por sua vez, promovem a formação de macroagregados.

De modo geral, a meta-análise demonstrou que a adição de biochar aos solos melhorou a agregação do solo por meio da aplicação de biochars adequados, escolhidos de acordo com as propriedades do solo e as condições de campo.

Biochar pode aumentar o nitrogênio nos solos

Uma meta-análise de 2021³² examinou as potencialidades do biochar para afetar (positiva ou negativamente) o complexo ciclo do nitrogênio nos solos. Dependendo de suas propriedades e taxas de aplicação, o biochar pode desempenhar um papel no aumento ou na redução da disponibilidade de N e da eficiência de absorção pelas plantas. Os biochars de biomassa com baixo teor de N (por exemplo, madeira) aplicados em taxas de aplicação acima de aproximadamente 5 t/ha sem fertilizantes podem competir pelo nitrogênio no solo e reduzir a disponibilidade de N para as plantas. Outros biochars, especialmente aqueles produzidos a baixas temperaturas a partir de esterco (por exemplo, cama de aves) com altas taxas de aplicação, podem fornecer nitrogênio e aumentar o crescimento das plantas (consulte a Figura 4.7 no Capítulo 4). O biochar de alta taxa (30 t/ha) de cavacos de madeira de pinheiro adicionado ao fertilizante aumentou o N inorgânico do solo ($\text{NO}_3^- \text{N}$) em 12 e 24 meses após a aplicação inicial do biochar. Isso indica que o biochar de madeira de pinheiro absorveu o fertilizante e o liberou ao longo de dois anos.³³

Além disso, alguns biochars podem permitir indiretamente uma maior disponibilidade de N, reduzindo as perdas de N e estimulando o seu fornecimento. O biochar pode reduzir as perdas por volatilização e emissões, bem como por escoamento e lixiviação. Ele pode aumentar o suprimento de N por meio da fixação biológica simbiótica e não simbiótica de nitrogênio e pela mineralização e retenção de N. O biochar envelhecido (que tem uma fina camada superficial de matéria orgânica) pode adsorver o N dos fertilizantes, reduzindo a perda por lixiviação em 26%, em média. Pesquisas atuais indicam que o biochar produzido acima de 400 °C reduz as emissões de óxido nitroso do solo de terra firme, especialmente em altas taxas

de aplicação (>10 t/ha). A volatilização da amônia aumenta com altas taxas de aplicação de biochar (>40 t/ha) e com o pH do biochar >9. No entanto, o pré-tratamento da biomassa antes da pirólise ou o pós-tratamento do biochar para reduzir a relação C:N pode resultar em maior disponibilidade de N e eficiência de uso ao aplicar o biochar em altas taxas de aplicação.³⁴ O aprimoramento dos biochars para atender às restrições de N será discutido mais detalhadamente no Capítulo 7.

Alguns biochars aumentam a abundância de bactérias fixadoras de nitrogênio, bem como de outras bactérias e fungos que podem disponibilizar N para as plantas, seja por meio do aumento dos nódulos radiculares (fixação simbiótica de nitrogênio) ou por meio do aumento da abundância de microrganismos não nodularizantes, como o *Azospirillum* não simbiótico. Esses processos podem aumentar a fixação de nitrogênio em até 60% e em uma média de 35% em todos os biochars.³²

A eficiência do uso de nitrogênio (NUE) é definida como a relação entre a absorção de N pelas plantas e o total de N aplicado no fertilizante, e depende não apenas do potencial de suprimento de N do solo, mas também do transporte, da mobilização e do armazenamento subsequentes de N pelas plantas.³² A Figura 6.16 mostra a dependência da NUE da taxa de aplicação e da temperatura de pirólise do biochar. As alterações na NUE podem variar de +40% a -35%, dependendo da matéria-prima e da quantidade de biochar adicionada, com um efeito médio nulo em todos os testes de biochar, indicando a importância de selecionar ou aprimorar estrategicamente o biochar para ajudá-lo a atender às restrições de N.

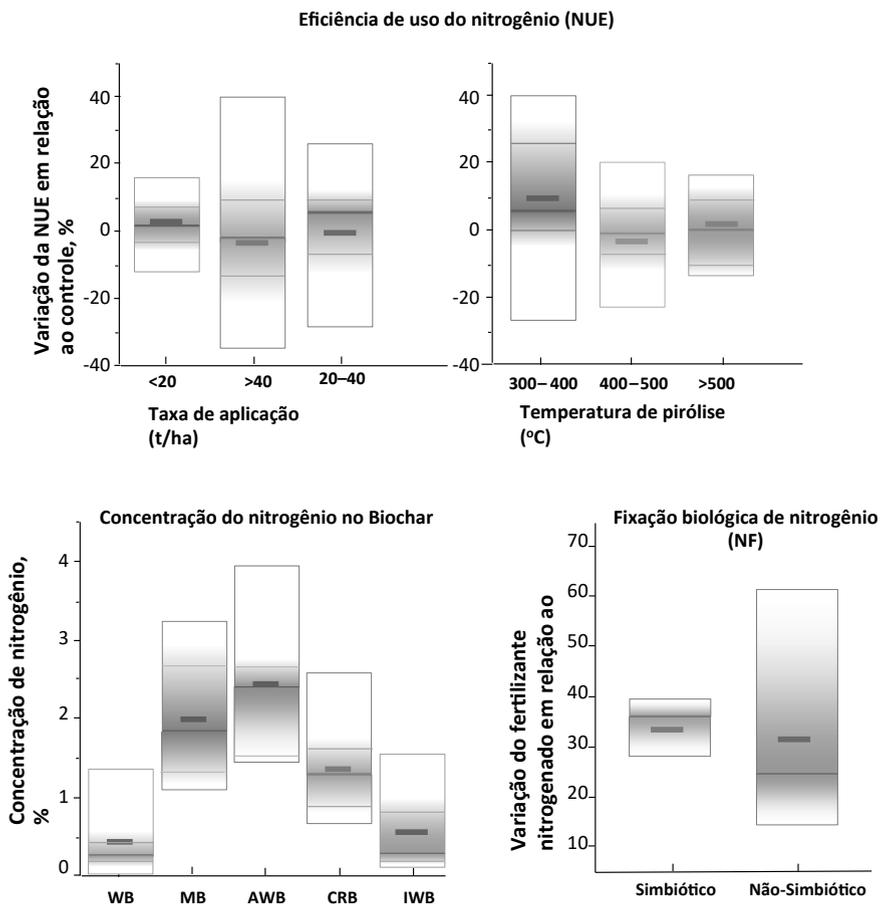


Figura 6.16 – A faixa de eficiência do uso de nitrogênio (NUE) encontrada em 22 estudos, expressa como porcentagem do controle, para três faixas de taxa de aplicação e três faixas de temperatura de pirólise. Para cada categoria, a caixa externa abrange toda a faixa de alterações relatadas, enquanto a caixa sombreada interna abrange os 50% internos dos valores. A linha sólida representa a mediana e a barra curta e grossa é a média geral. (Modificado de Ahmad et al.)³²

Ponto principal

Grandes aplicações de biochar podem aumentar a relação C:N, reduzindo a disponibilidade de nitrogênio e aumentando a perda de N por meio da volatilização da amônia.

Adicione uma fonte adicional de N para elevar a relação C:N para cerca de 30:1 e limite as taxas de aplicação para menos de 10 t/ha.

Biochar aumenta a disponibilidade de fósforo nos solos

Uma meta-análise constatou que, na média de todas as matérias-primas e condições de biochar, a adição de biochar aumentou a disponibilidade de P no solo agrícola por um fator de 3,4 a 5,9.³⁵ Tanto o biochar quanto o controle não tiveram adição de fertilizante de fósforo. Como pode ser visto na Figura 6.17, foram encontrados efeitos maiores quando os resultados foram analisados dentro das categorias. Os adubos e lodos de águas residuais, seguidos por resíduos biológicos e resíduos de culturas, proporcionaram os maiores aumentos na disponibilidade de fósforo. Os biochars de madeira (sem combinação com fertilizante) foram relativamente ineficazes. Os maiores aumentos (até dez vezes) ocorreram em taxas de aplicação acima de 40 t/ha. Os biochars produzidos em temperaturas inferiores a 450 °C e aplicados em solos ácidos (pH >7,5) foram mais eficazes. Os biochars produzidos em temperaturas acima de 450 °C ou aplicados em solos com pH >6,5 foram menos eficazes. Entretanto, as limitações do biochar puro produzido a partir da madeira, ou em temperaturas mais altas, ou aplicado em solos alcalinos podem ser superadas com o projeto do biochar, combinando-o com nutrientes ou ajustando seu pH (por exemplo, fermentando-o – consulte o Capítulo 8) para superar essas restrições.)

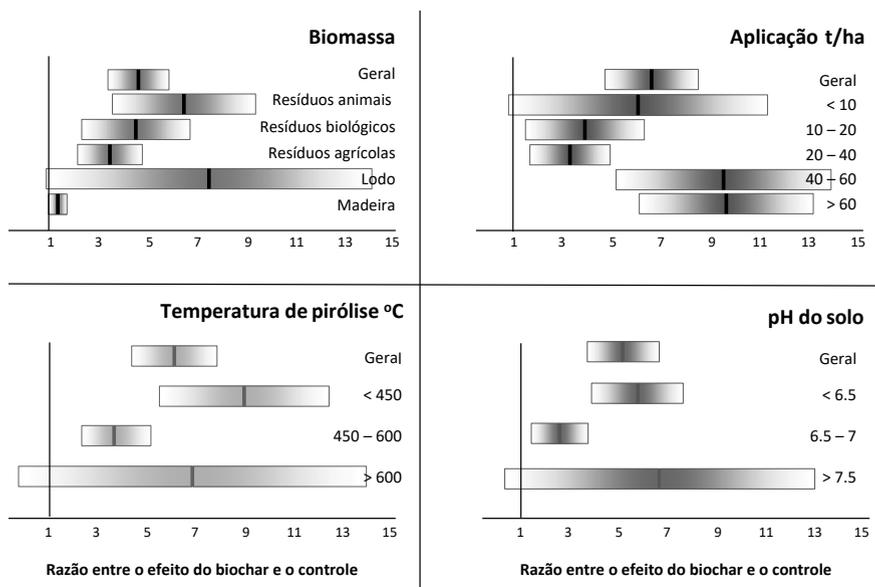


Figura 6.17 – O efeito dos aditivos de biochar na disponibilidade de fósforo em solos agrícolas, influenciado por matérias-primas, taxas de aplicação, temperaturas de pirólise e pH do solo. A média de cada categoria é indicada por uma linha escura em uma caixa sombreada, com a caixa cheia representando o intervalo de confiança de 95%. (Modificado de Glaser et al.)³⁵

Em solos com baixo teor de P, os fungos micorrízicos arbusculares (AMF) invadem os poros do biochar, especialmente os biochars com alto teor de P na superfície dos poros, e esse processo pode aumentar a absorção de P pelas plantas. Na presença de biochars com alto teor de cinzas minerais, a colonização das raízes por AMF pode aumentar em até 75%, em comparação com o aumento observado de 20% na presença de fertilizante mineral. Outros estudos demonstraram que aplicações muito pequenas de biochar (menos de 200 kg/ha) junto com fertilizantes ricos em fósforo também podem aumentar a disponibilidade de fósforo.

O biochar reduz a biodisponibilidade de metais pesados nos solos

O biochar no solo pode se ligar a metais pesados por meio de vários mecanismos, conforme explicado no Capítulo 4. À medida que o biochar envelhece (discutido no Capítulo 5), sua capacidade inicial de ligar metais pesados melhora devido à formação de aglomerados de organo minerais ativos em sua superfície.³⁶ Esses aglomerados são muito porosos e redox-ativos e contêm muitos grupos funcionais de carbono e oxigênio que têm alta afinidade para ligar metais pesados, resultando em uma maior capacidade de ligar metais pesados. À medida que as partículas de biochar continuam a envelhecer no solo, elas são envolvidas por agregados de solo, o que imobiliza ainda mais os metais pesados, mas também reduz consideravelmente a eficácia do biochar na ligação de metais pesados. Conseqüentemente, várias aplicações de biochar podem ser necessárias para a remediação prolongada de metais pesados. Diferentes metais pesados podem exigir diferentes biochars para obter a imobilização mais eficaz.

Os resultados de experimentos em campo e em vasos indicam que as emendas de biochar produzidas em temperaturas baixas (<400 °C) e altas (500 °C-600 °C), quando aplicadas a solos ácidos, podem apresentar maior eficácia na imobilização de determinados metais pesados por um período prolongado, em comparação com biochar produzido na faixa de temperatura de 400 °C a 500 °C. Os biochars projetados, especialmente os biochars de baixa temperatura enriquecidos com óxidos de ferro e outros minerais, podem aumentar significativamente a imobilização de metais pesados. Os biochars enriquecidos com Fe_2O_3 foram mais eficazes quando produzidos a 350 °C. Aplicado em uma dosagem de 1,0%, esse biochar imobilizou Cu, Cd e Pb em solos contaminados em até 62%, 46% e 43%, respectivamente. A precipitação e a complexação dos metais pesados os converteram em formas mais estáveis. O biochar enriquecido com ferro também influenciou indiretamente o metal pesado ao melhorar o pH e a CEC do solo, reduzindo a biodisponibilidade de metais pesados, ao mesmo tempo em que melhorou significativamente a saúde do solo ao promover a abundância e a estrutura da comunidade de microrganismos e alterar a fertilidade do solo.³⁷

Biochar captura compostos orgânicos tóxicos

Uma meta-análise recente dos efeitos dos biochars puros em comparação com os biochars projetados concluiu que:³⁸

- A maioria dos biochars adsorve poluentes orgânicos, incluindo pesticidas, herbicidas, ftalatos, substâncias per e polifluoroalquílicas (PFAS) e hidrocarbonetos poliaromáticos (PAH).
- A extensão e os mecanismos de redução da biodisponibilidade de poluentes orgânicos tóxicos são afetados por muitos fatores internos e externos. Os fatores internos do biochar, como o tipo de matéria-prima, a área superficial específica, os métodos de preparação, a temperatura de pirólise, a estrutura dos poros, os grupos funcionais e a composição dos nutrientes, afetarão suas capacidades de sorção e influenciarão a fixação de poluentes.
- Os biochars de alta temperatura podem ser mais eficazes na redução da biodisponibilidade, enquanto o biochar de baixa temperatura pode reduzir indiretamente o acúmulo de poluentes por meio do fornecimento de nutrientes para microrganismos que podem degradar os poluentes.
- Os biochars projetados, especialmente aqueles em que os óxidos metálicos são revestidos na biomassa antes da pirólise, geralmente capturam poluentes orgânicos tóxicos com mais eficiência do que os biochars não tratados.

O biochar prolifera a abundância e a diversidade de microrganismos do solo

O biochar pode aumentar a abundância de microrganismos benéficos e alterar a proporção entre bactérias e fungos. O biochar tem um efeito complexo sobre as comunidades microbianas, sendo as alterações uma função do tipo e da quantidade de biochar adicionado, das propriedades do solo e das culturas cultivadas.

Algumas observações gerais podem ser feitas a partir da Figura 6.18, que é derivada de uma meta-análise de 59 estudos:³⁹

- As matérias-primas herbáceas (resíduos verdes, talos de lentilha, palha de milho, palhas, capim) tiveram o maior impacto no aumento da diversidade bacteriana.

- Os biochars feitos de resíduos lignocelulósicos (incluindo cascas de arroz, cascas de nozes, cascas de café, espigas de milho, poda de vinhedos e serragem de pinheiros) tiveram o maior efeito sobre a diversidade de fungos.
- Para a diversidade bacteriana e fúngica, as taxas de aplicação de biochar abaixo de 40 t/ha foram mais eficazes, especialmente para a diversidade fúngica.
- Os biochars produzidos em temperaturas mais baixas (<500 °C) foram mais eficazes na promoção da diversidade microbiana (bacteriana e fúngica).
- O biochar aumentou de forma mais significativa a diversidade bacteriana somente em solos de textura grossa e média. Por outro lado, a diversidade de fungos foi significativamente aumentada em solos de textura fina.
- Na produção de arroz inundado ou em solos de áreas tropicais, o biochar pode aumentar as proporções de fungos/bactérias, provavelmente porque os fungos são os decompositores dominantes do aumento do carbono recalcitrante do biochar e da biomassa do arroz.

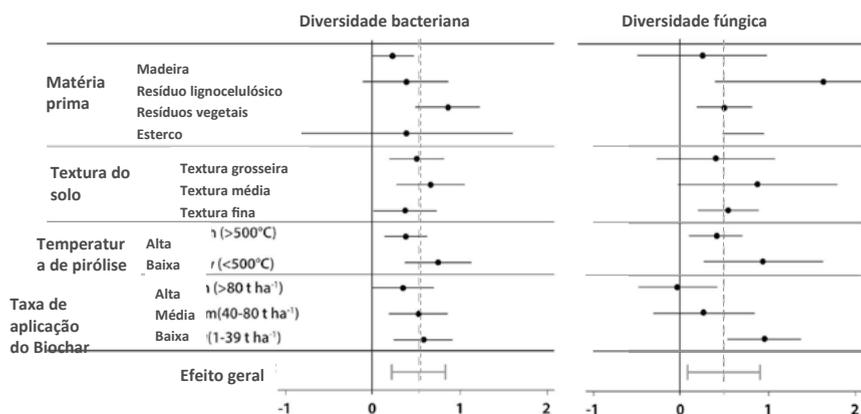


Figura 6.18 – Mudanças na diversidade bacteriana (esquerda) e fúngica (direita) devido à adição de biochar ao solo, para diferentes tipos de matéria-prima de biochar, texturas de solo, temperaturas de pirólise e taxas de aplicação. As barras representam intervalos de confiança de 95%. As barras na linha “efeito geral” e as linhas tracejadas mostram os efeitos gerais da média geral. (Modificado de Singh et al.)³⁹

De modo geral, a aplicação de biochar aumenta a diversidade e a abundância de fungos e bactérias, com resultados benéficos devido aos efeitos de muitos fatores que estão resumidos na Figura 6.19.⁴⁰

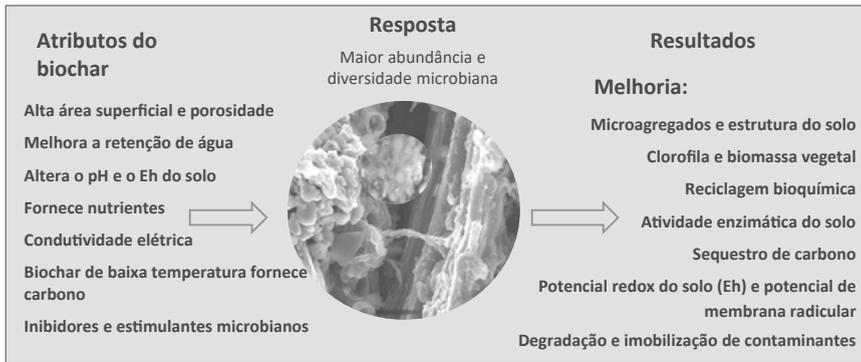


Figura 6.19 – Esquema mostrando a resposta microbiana e os resultados após a aplicação de biochar. **Centro:** Imagem de microscópio eletrônico de fungos e bactérias nas superfícies de biochar. Eh = potencial redox. (Modificado de Palansooriya et al.)⁴⁰

O biochar aumenta o carbono do solo e atenua as mudanças climáticas

O biochar desempenha um papel fundamental no aumento dos níveis de carbono do solo e na mitigação das mudanças climáticas por meio de vários mecanismos:

1. Persistência a longo prazo do C do biochar no solo

Em uma análise completa do ciclo de vida, os sistemas de biochar reduzem as emissões líquidas em 0,4 a 1,2 toneladas de CO₂ – equivalente por tonelada de matéria-prima de biomassa seca. Essa redução inclui o carbono estável do biochar armazenado no solo mais o CO₂ evitado e outras emissões resultantes do desvio de biomassa e do uso de energia do pirogás (gases produzidos durante o processo de decomposição térmica, pirólise).⁴¹

2. O biochar aumenta e protege o carbono orgânico adicional do solo

A correção do solo com biochar leva ao sequestro e à proteção do carbono orgânico do solo (SOC) adicional, além do carbono introduzido no biochar. Isso é feito por meio da promoção das comunidades microbianas do solo e da retenção e proteção da biomassa microbiana morta e dos rizodepósitos em microagregados. Um experimento de campo de longo prazo no Wollongbar Primary Industries Institute, no estado australiano da Nova Gales do Sul (NSW, sigla em inglês), começou com a aplicação de 10 t/ha (1% p/p) de biochar de *Eucalyptus saligna* produzido a 550 °C nos 100 mm superiores do solo Rhodic

Ferralsol sob pastagem manejada.⁴² Os resultados do monitoramento do conteúdo total de carbono nos 75 mm superiores do solo estão representados na Figura 6.20. O teor de carbono do biochar foi de 76%, o que implica a adição de 5,7 t/ha de carbono nos 75 mm superiores, alguns dos quais podem ter sido mineralizados ao longo dos anos. Depois de 9,5 anos, o estudo observou um aumento total de carbono no solo de 15 t/ha em relação ao nível original no solo do pasto, indicando que pelo menos 9,3 t/ha de SOC haviam se acumulado. Notavelmente, o aumento do SOC superou o conteúdo de carbono do próprio biochar.

3. O biochar pode aumentar o nível de saturação de SOC

A saturação do SOC refere-se a um ponto de equilíbrio em que a capacidade do solo de absorver, reter e estabilizar o carbono orgânico é igualada por fatores que decompõem o carbono sob as condições ambientais predominantes. Os resultados descritos acima e mostrados na Figura 6.20 indicam que os mecanismos que protegeram o SOC da decomposição aumentaram o limite natural da quantidade de carbono que poderia ser armazenada no solo. No estudo de Wollongbar, 8,2 anos após o início, outras 10 t/ha de biochar foram adicionadas aos 100 mm superiores do solo de algumas das parcelas previamente corrigidas. Novamente, o SOC se acumulou além da adição estável de carbono de biochar, resultando em 2,3 t/ha de SOC nos primeiros 1,3 anos. Esses resultados indicam o potencial de aumento contínuo dos níveis de saturação de SOC com aplicações sucessivas de biochar.

4. O biochar pode aumentar os níveis de carbono inorgânico do solo

O biochar pode formar carbonatos de cálcio e magnésio, principalmente em solos calcários de alto pH. Ao longo de uma década, observou-se que uma tonelada de biochar resultou em um acréscimo de 0,5 a 0,8 toneladas de carbono inorgânico no solo.⁴³

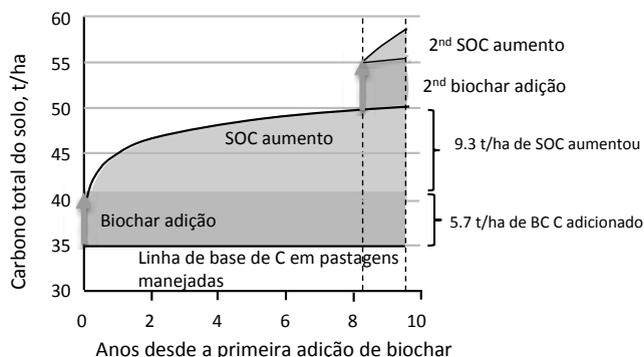


Figura 6.20 – Mudanças no carbono do solo na camada de 0-75 mm dos solos com biocarbão ao longo de 9,5 anos. O carbono inicial do solo no pasto era de 30 t/ha. Foram adicionadas 5,7 t/ha de carbono de biocarbão na camada superior no ano 0 e novamente no ano 8,2 (setas ascendentes). Após cada adição de biochar, houve um crescimento substancial no carbono orgânico do solo (Adaptado de Weng et al.)⁴²

Os efeitos potenciais das aplicações repetidas de biochar no carbono do solo, comparados com os do composto ou da serapilheira, estão ilustrados na Figura 6.21. Aqui, o carbono da biomassa é 57% decomposto em um ano e 90% decomposto em seis anos, enquanto o biochar perde apenas 10% de seu carbono. Após oito adições, o carbono da biomassa se acumulou em cerca de 10% de todas as adições de carbono da biomassa, enquanto o carbono do biochar se acumulou em 90% de todas as suas adições. Além disso, o biochar estimulou processos microbianos, do solo e das plantas que acumulam mais carbono da atmosfera (semelhantes aos descritos na Figura 6.19 e medidos na Figura 6.20). O aumento real do carbono total do solo com o biochar, o composto ou a serapilheira pode variar consideravelmente, dependendo das propriedades da matéria-prima, das condições do processo de pirólise e dos fatores ambientais e do solo.

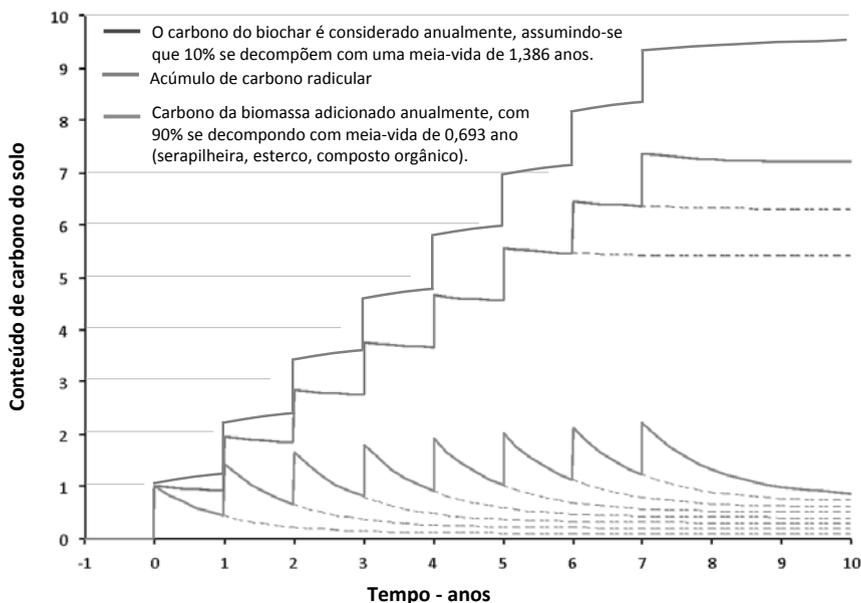


Figura 6.21 – Esquema das mudanças no carbono do solo em função do tempo, quando uma unidade de carbono de biochar ou carbono de biomassa é adicionada a cada ano durante oito anos. Cada incremento de biomassa ou biochar se acumula sobre o resíduo da emenda anterior. Nesse modelo, todo o carbono da biomassa (como na cama de frango, esterco ou composto) se decompõe com uma meia-vida de aproximadamente 0,7 ano, enquanto apenas 10% do carbono do biochar se decompõe com uma meia-vida de 1,4 ano. Além disso, o biochar estimulou processos microbianos, de solo e de plantas que acumulam mais carbono da atmosfera (ilustrado aqui em cerca de $\frac{1}{4}$ do incremento de biochar em carbono por ano). (Adaptado de Joseph et al.)⁴⁴

Pontos principais

A aplicação de biochar a cada ciclo de cultivo pode resultar em um acúmulo muito mais rápido de carbono no solo do que uma aplicação única. *Os solos de terra preta* podem ter até 15% de carbono total nos 500 mm superiores do solo (o que equivale a 750 toneladas/ha) e altos teores de carbono foram medidos a 2 m de profundidade.

O biochar pode reduzir a liberação de óxido nitroso e metano dos solos

Várias meta-análises foram publicadas sobre os efeitos do biochar nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) usando diferentes biochars. Uma meta-análise publicada em 2022, analisando o efeito do biochar sobre as emissões de gases de efeito estufa de solos em três ambientes diferentes (solos de terras altas, arrozais e áreas úmidas), constatou que, em todos os tipos de solo, o biochar suprimiu as emissões de óxido nitroso (N_2O) em 31% e de metano (CH_4) em 7% (em relação ao controle sem biochar).⁴⁵

O efeito do biochar variou muito com o ambiente do solo (Tabela 6.1): O N_2O foi mais suprimido em solos de terras altas, em -62%, enquanto o metano foi mais suprimido no composto. O CO_2 foi mais suprimido em arrozais e áreas úmidas, mas em solos de terras altas, o biochar provocou a liberação de CO_2 nos primeiros três a seis meses de aplicação. O potencial de gás de efeito estufa do N_2O é cerca de 310 vezes maior que o potencial do CO_2 , enquanto o do metano é 85 vezes maior em uma escala de 20 anos, portanto, o impacto do biochar na redução desses gases é importante.

Tabela 6.1 – Comparação dos efeitos de supressão do biochar em diferentes sistemas ambientais. (De Lyu et al.)⁴⁵

Ambiente do solo	CO_2	CH_4	N_2O
Solos de terras altas	+9%	-3%	-62%
Arrozais e áreas úmidas	-10%	-6%	-20%
Locais de compostagem	-2%	-15%	-10%

O pH do solo é um parâmetro importante para controlar as taxas de emissão de CH_4 do solo porque as atividades bioquímicas da maioria dos metanógenos são muito sensíveis a mudanças no pH do solo. Em áreas úmidas e arrozais, o biochar da palha, com seu pH mais alto, composição mineral, alto Eh e maior porosidade, suprimiu as emissões de CH_4 em 16%, enquanto o biochar da madeira aumentou significativamente as emissões de CH_4 em 34%. O esterco de aves suprimiu as emissões de metano na compostagem em mais de 20%. A palha e o biochar herbáceo foram os mais eficazes na supressão das emissões de N_2O . Em geral, as taxas de aplicação de menos de 10 t/ha de biochars produzidos com temperaturas de pirólise acima de 500 °C foram mais eficazes.

Testes recentes com biochars projetados estão mostrando reduções significativas nas emissões de CH_4 e N_2O , especialmente quando os biochars projetados são aplicados como fertilizantes compostos de biochar-mineral. Esse assunto será discutido no próximo capítulo.

Qual é o significado de uma metanálise?

A meta-análise envolve a análise sistemática e a síntese de dados de vários estudos para chegar a conclusões com um nível de evidência mais alto do que o possível em um estudo individual. Os tópicos investigados pela meta-análise na pesquisa do biochar incluem o impacto do biochar em vários parâmetros, como propriedades do solo ou produtividade das culturas, em diferentes contextos e condições experimentais. Em geral, o processo inclui a identificação de estudos relevantes, a extração de dados importantes (como tamanhos médios de efeito, tamanhos de amostra e variabilidade) e a aplicação de técnicas estatísticas para sintetizar esses dados.

Os resultados de uma meta-análise geralmente são apresentados em gráficos resumidos, conhecidos como gráficos florestais, que exibem o efeito médio combinado do tratamento com biochar sob várias condições em relação aos controles. As barras de erro ou intervalos de confiança em torno desses tamanhos de efeito fornecem um intervalo dentro do qual o tamanho real do efeito provavelmente cairá com um determinado nível de confiança, geralmente 95%, indicando que experimentos futuros sob as mesmas condições têm 95% de probabilidade de produzir uma média dentro desse intervalo.

Cada ponto de dados em um gráfico ou tabela de meta-análise representa a média geral de muitos tipos de biochar, taxas de aplicação, culturas, solos, metodologias experimentais (por exemplo, ensaios em vasos ou em campo) e condições climáticas. A meta-análise examina o impacto de cada uma dessas condições sobre o efeito de interesse, fornecendo informações sobre quando e onde o biochar é mais ou menos eficaz. Embora alguns efeitos do biochar em determinadas condições possam ser impressionantes, outros podem ser insignificantes ou até mesmo negativos. Compreender essas variações é fundamental, pois o planejamento e a aplicação do biochar nas condições ideais reveladas na meta-análise podem atingir ou exceder de forma confiável os melhores efeitos relatados.

Informações adicionais

Para obter um resumo mais detalhado dos efeitos dos biochars nos solos e na produtividade das culturas, o leitor pode fazer o download do artigo (Como o biochar funciona e quando não funciona” (em inglês): onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcbb.12885

Outros documentos informativos incluem:

Efeitos do biochar na produtividade das culturas com e sem fertilizantes: Uma meta- análise de estudos de campo usando controles separados (dos quais foram extraídos os dados das Figuras 10.1 a 10.3).¹

Referências

1. Ye L. et al. (2019). Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: Uma meta-análise de estudos de campo usando controles separados. Em Condron LM (ed.) *Soil Use and Management* 36:2-18 www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/SoilUseManage%2036,%202-18%202020%20Ye.pdf
2. Bai S.H. et al. (2022). Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of the Total Environment* 808:152073 doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152073
3. Vijay V. et al. (2021). Review of large-scale biochar field-trials for soil amendment and the observed influences on crop yield variations. *Frontiers in Energy Research* 9:710766 doi.org/10.3389/fenrg.2021.710766
4. Hu W. et al. (2024). As aplicações de biochar e fertilizante orgânico aumentam a abundância microbiana funcional do solo e a multifuncionalidade do agroecossistema. *Biochar* 6, doi.org/10.1007/s42773-023-00296-w
5. Xiang Y. et al. (2017). Effects of biochar application on root traits: a meta-analysis (Efeitos da aplicação de biochar nas características das raízes: uma meta-análise). *GCB Bioenergy* 9:1563-1572 doi.org/10.1111/gcbb.12449
6. Chen G. et al. (2021). Advanced characterization of biomineralization at plaque layer and inside rice roots amended with iron-and silica-enhanced biochar. *Relatórios científicos* 11:1-13 doi.org/10.1038/s41598-020-80377-z
7. He Y. (2020). A emenda de biochar aumenta a fotossíntese e a biomassa em plantas C3, mas não em C4: A global synthesis. *GCB Bioenergy* 12:605-617 onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12720
8. Sarwar N. (2023). Biochar Integrated Nutrient Application Improves Crop Productivity, Sustainability and Profitability of Maize-Wheat Cropping System. *Sustainability* 15:2232 doi.org/10.3390/su15032232

9. Seleiman M.F. et al. (2019). Integrative Effects of Rice Straw Biochar and Silicon on Oil and Seed Quality, Yield and Physiological Traits of *Helianthus annuus* L. Grown under Water Deficit Stress. *Agronomia* 9:10 doi.org/10.3390/agronomia9100637
10. Zulfiqar F. et al. (2022). Biochar: An emerging recipe for designing sustainable horticulture under climate change scenarios. *Frontiers in Plant Science* 13 doi.org/10.3389/fpls.2022.1018646
11. Zhang M. et al. (2022). Biochar-Based Fertilizer Enhances the Production Capacity and Economic Benefit of Open- Field Eggplant in the Karst Region of Southwest China (Fertilizante à base de biochar aumenta a capacidade de produção e o benefício econômico da berinjela em campo aberto na região cárstica do sudoeste da China). *Agriculture* 12:1388 www.mdpi.com/2077-0472/12/9/1388
12. Zhang M. et al. (2022). O fertilizante à base de biochar melhorou o rendimento, a qualidade e a utilização de fertilizantes do tomate em campo aberto em uma área montanhosa cárstica. *Plant, Soil and Environment* 68:163-172 DOI:10.17221/471/2021-PSE
13. Jabborova D. et al. (2021). Impacts of biochar on basil (*Ocimum basilicum*) growth, root morphological traits, plant biochemical and physiological properties and soil enzymatic activities. *Scientia Horticulturae* 290:110518 doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110518
14. Ali I. et al. (2020). Biochar addition coupled with nitrogen fertilization impacts on soil quality, crop productivity, and nitrogen uptake under double-cropping system. *Segurança Alimentar e Energética* 9:e208 doi.org/10.1002/fes3.208
15. Jabborova D. et al. (2021). Beneficial effects of biochar application on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, root morphological traits and physiological properties. *Annals of Phytomedicine: An International Journal* 10: 93-100 doi:10.21276/ap.2021.10.2.13
16. Chen D. et al. (2018). Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – A meta-analysis (Efeitos do biochar na disponibilidade e absorção de metais pesados pelas plantas - uma metanálise). *Journal of Environmental Management* 222:76-85 doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.004
17. Lou Y., Joseph S. et al. (2016). Extrato aquoso de biochar de palha usado para promover o crescimento de plantas: um teste inicial. *BioResources* 11:249-266 DOI: 10.15376/biores.11.1.249-266
18. Kumar A., Joseph S. et al. (2021). Fertilizing behavior of extract of organomineral-activated biochar: low-dose foliar application for promoting lettuce growth. *Tecnologias químicas e biológicas na agricultura* 8:1-15 doi.org/10.1186/s40538-021-00222-x

19. Candido. et al. (2023). Understanding the multifunctionality of pyrolygneous acid from waste biomass and the potential applications in agriculture, *Science of The Total Environment* 881:163519 doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163519
20. Fedeli R. et al. (2022). Bio-Based Solutions for Agriculture: Foliar Application of Wood Distillate Alone and in Combination with Other Plant-Derived Corroborants Results in Different Effects on Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Biology* 11:404-404 doi: 10.3390/biology11030404
21. Vannini A. et al. (2022) Foliar Application of Wood Distillate Alleviates Ozone-Induced Damage in Lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Toxics* 10:178 doi.org/10.3390/toxics10040178
22. Fedeli R. et al. (2022). A aplicação foliar de destilado de madeira aumenta a produtividade das plantas e os parâmetros nutricionais do grão-de-bico. *Annals of Applied Biology* 182:57-64 doi.org/10.1111/aab.12794
23. Samuel A. et al. (2012) Efeitos da aplicação de Biochar, Mokusakueki e Bokashi nos nutrientes do solo, rendimentos e qualidades da batata-doce. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science* 2:318-327 [www.researchgate.net/publication/359920640](http://www.researchgate.net/publication/359920640_Effects_of_Biochar_Mokusakueki_and_Bokashi_application_on_soil_nutrients_yields_and_qualities_of_sweet_potato) Effects of Biochar Mokusakueki and Bokashi application on soil nutrients yields and qualities of sweet potato
24. Celletti S. et al. (2023). Efeito único e combinado da correção do solo com biochar e destilado de madeira em plantas jovens de videira. No Livro de resumos da 18ª Conferência Internacional sobre Química e Meio Ambiente, pp. 316 www.dbt.univr.it/?ent=pubbdip&id=1096968&lang=en
25. Becagli M. et al. (2021) A co-aplicação de destilado de madeira e biochar melhora a qualidade do solo e o crescimento das plantas no manjeriço. *J of Plant Nutrition and Soil Science* 185:120-131 DOI: 10.1002/jpln.202100239
26. Husson O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil* 362:389-417 doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7
27. Joseph S. et al. (2015). The electrochemical properties of biochars and how they affect soil redox properties and processes. *Agronomia* 5:322-340 doi.org/10.3390/agronomy5030322
28. Qualidade do solo www.soilquality.org.au/factsheets/water-availability#:~:text=Key%20Points,can%20hold%20at%20field%20capacity
29. Edeh I.G. et al. (2020). A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties-New insights and future research challenges. *Science of The Total Environment* 714:136857 doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857
30. Wu W. et al. (2022). Impact of biochar amendment on soil hydrological properties and crop water use efficiency: Uma meta-análise global e um modelo de equação estrutural. *GCB Bioenergy* 14:657-668 doi.org/10.1111/gcbb.12933

31. Islam M.U. et al. (2021). A aplicação de biochar melhora a agregação do solo? Uma meta-análise. *Soil and Tillage Research* 209:104926 doi.org/10.1016/j.still.2020.104926
32. Ahmad Z. et al. (2021). Biochar modula a dinâmica do nitrogênio mineral no solo e nos ecossistemas terrestres: A critical review. *Chemosphere* 278:130378 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130378
33. Asadyar L. et al. (2021). Soil-plant nitrogen isotope composition and nitrogen cycling after biochar applications. *Environmental Science and Pollution Research* 28:6684-6690 DOI: [10.1007/s11356-020-11016-3](https://doi.org/10.1007/s11356-020-11016-3)
34. Rasse D.P. et al. (2022). Enhancing plant N uptake with biochar-based fertilizers: limitation of sorption and prospects. *Plant and Soil* 475:213-236 doi.org/10.1007/s11104-022-05365-w
35. Glaser B. e Lehr V.I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: Uma meta-análise. *Scientific Reports* 9:9338 [doi: 10.1038/s41598-019-45693-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z)
36. Yuan C. et al. (2021). A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importância das propriedades do solo e do biochar. *Ciência do Ambiente Total* 756:144058 doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144058
37. Li Y. et al. (2023). Effects of α -Fe₂O₃ modified chicken manure biochar on the availability of multiple heavy metals and soil biochemical properties. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11:109922 doi.org/10.1016/j.jece.2023.109922
38. Lin Q. et al. (2022). Effects of biochar-based materials on the bioavailability of soil organic pollutants and their biological impacts. *Science of the Total Environment* 826:153956 doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153956
39. Singh H. et al. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar* 4:8 doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1
40. Palansooriya K. et al. (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar* 1:3–22 doi.org/10.1007/s42773-019-00009-2
41. Cowie A. et al. (2015). *Biochar for Environmental Management*, pp. 795-826 (Routledge, Londres)
42. Weng Z. et al. (2022). Microspectroscopic visualization of how biochar lifts the soil organic carbon ceiling. *Nature Communications* 13:5177 doi.org/10.1038/s41467-022-32819-7
43. Wang Y., Joseph S. et al. (2023). Inducing inorganic carbon accrual in subsoil through biochar application on calcareous topsoil. *Environmental Science and Technology* 57:1837-1847 doi.org/10.1021/acs.est.2c06419

44. Joseph S. et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: Uma revisão dos mecanismos que controlam as respostas do solo e das plantas ao biocarvão. *GCB Bioenergy* 13:1731-1764 onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12885
45. Lyu H. et al. (2022). O biochar afeta as emissões de gases de efeito estufa em vários ambientes: A critical review. *Land Degradation & Development* 33:3327-3342 doi.org/10.1002/ldr.4405

CAPÍTULO 7

Escolha e aprimoramento de biochar para atender às restrições do solo

Pontos principais

- É importante listar as restrições do solo e entender como o biochar pode atendê-las, de modo que o biochar adequado possa ser escolhido.
- A capacidade do biochar de atender às restrições do solo e aumentar a eficiência da absorção de nutrientes pode ser aprimorada por qualquer um dos itens a seguir, ou por uma combinação deles:
 - Misturando diferentes matérias-primas e pirolisando em uma faixa de temperaturas;
 - Pré-tratamento da biomassa com minerais (incluindo aqueles ricos em P e K);
 - Pós-tratamento com produtos químicos, minerais ou matéria orgânica rica em nutrientes (especialmente N).
- Os minerais adicionados à biomassa são revestidos com carbono durante a pirólise. Esse revestimento de carbono fornece alimento para os microrganismos que tornarão os minerais disponíveis para as plantas e aumentaram as capacidades de troca de cátions e ânions (CTC e CTA).
- O pós-tratamento do biochar ainda quente quando ele sai do forno permite que os nutrientes se difundam com mais eficácia nos poros do biochar. Os nutrientes dos poros maiores serão liberados rapidamente, enquanto os dos poros pequenos serão liberados lentamente.
- Os métodos mais baratos e mais simples de aprimorar o biochar (e, em alguns casos, de aplicá-lo) são:
 - Alimentar os animais com biochar e aumentar a população de besouros rola-bosta que enterraram o esterco resultante que contém biochar;
 - Adicionar o biochar à biomassa e, em seguida, fazer a compostagem da mistura de forma aeróbica, anaeróbica ou ambas;
 - Adicionar o biochar à água rica em nutrientes (por exemplo, lagoas ou fossas que contêm esterco em fazendas de gado leiteiro).

- Testes de campo recentes mostraram que, para determinadas aplicações (por exemplo, aplicação em pastagens ou sob árvores), um fertilizante de biochar líquido produzido a partir de biomassa pré-tratada, seguido de pós-tratamento com nutrientes e ácido pirolenhoso, pode resultar em um aumento maior na produtividade das plantas do que a aplicação de um fertilizante de biochar sólido.
- Filtrar esse fertilizante líquido de biochar e diluí-lo de modo que a proporção de biochar para água seja de aproximadamente 1 para 100 e, em seguida, aplicar o líquido como spray foliar a 10 kg/ha pode aumentar a produtividade de algumas culturas de forma econômica.
- A repetição de aplicações de biochar enriquecido com nutrientes na rizosfera com baixas taxas de aplicação pode ser ideal para melhorar a viabilidade econômica dos aditivos de biochar.



INTRODUÇÃO

Diante das restrições do solo, você pode optar por biochar não tratado, selecionando aquele com propriedades adequadas a cada limitação. Outra opção é modificar o biochar para ampliar sua eficácia no tratamento de uma ou mais restrições. Neste capítulo, apresentamos as restrições comuns e fornecemos algumas diretrizes gerais para ajudá-lo a escolher os tipos adequados de biochar. Em seguida, apresentamos detalhes sobre quais biochars podem atender a restrições específicas e como eles podem ser modificados ou incorporados a outros fertilizantes ou aditivos para atender a uma determinada restrição, garantindo o retorno do seu investimento.

Os métodos para melhorar o biochar incluem o tratamento da biomassa antes da pirólise (pré-tratamento) ou o tratamento do biochar após a pirólise (pós-tratamento), por meio de processos físicos, químicos ou biológicos. Pós-tratamentos simples podem ser realizados na fazenda para melhorar as propriedades do biochar. Pré e pós-tratamentos mais complexos podem ser realizados em uma instalação de produção de biochar, que pode ou não estar localizada na fazenda.

RESTRIÇÕES DO SOLO

A seleção ou formulação de biochar, ou de aditivos à base de biochar, deve considerar as condições do solo e os objetivos financeiros e ambientais do tratamento. É necessário desenvolver uma estratégia para a correção do solo, utilizando uma combinação adequada de biochar, biochar modificado ou biochar-fertilizante. A Figura 7.1 descreve as condições que podem desafiar a produtividade de um agricultor nas categorias química, física, biológica, ambiental e financeira. Liste todas as que se aplicam à sua situação para orientar a escolha do(s) biochar(s) apropriado(s) e das estratégias de aprimoramento.

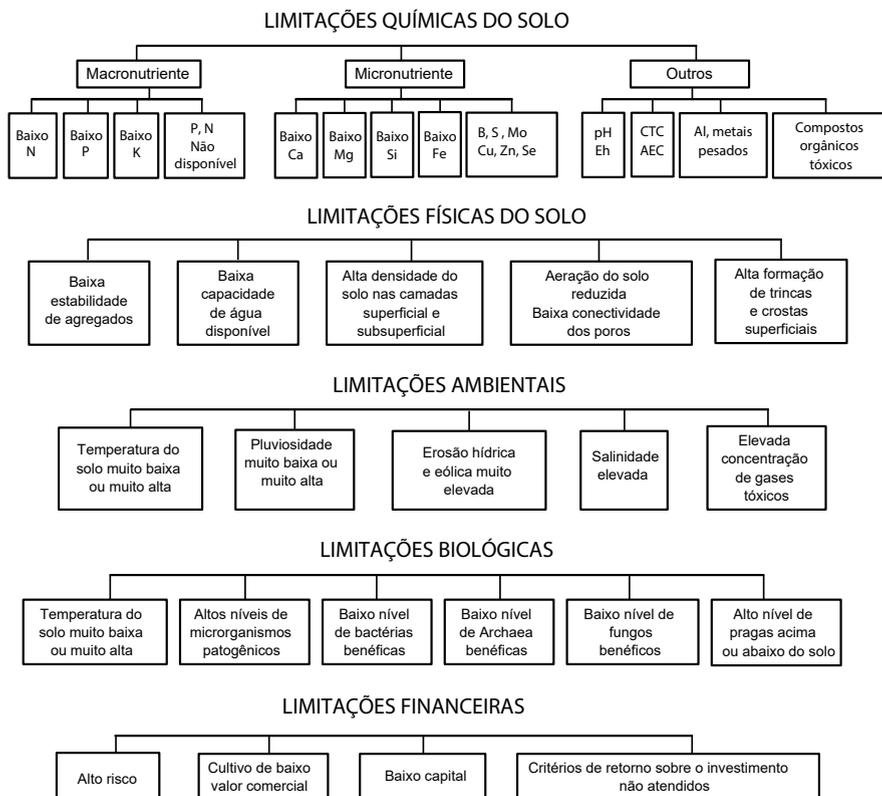


Figura 7.1 – Possíveis restrições à produtividade agrícola. Liste todos os que se aplicam à sua situação para orientar a escolha do(s) biochar(s) apropriado(s) e das estratégias de aprimoramento.

Observações:

- Plantas diferentes exigem quantidades diferentes de macro e micronutrientes e, portanto, os biochars precisam ser formulados adequadamente para atender a essas exigências;
- Os solos são heterogêneos e suas propriedades variam entre diferentes locais. Portanto, a aplicação de apenas um corretivo pode não proporcionar os maiores benefícios agrônômicos ou para o solo, nem o maior retorno financeiro sobre o investimento;
- As taxas de aplicação para maximizar o rendimento da cultura, a resistência a doenças, a resiliência ao estresse ambiental e o retorno financeiro líquido podem ser diferentes;

- O benefício máximo é alcançado quando o biochar é concentrado onde as raízes crescerão (a rizosfera);
- Aplicações repetidas de biochar na rizosfera em baixas taxas, poderiam otimizar a viabilidade econômica da utilização de biochar. O espectro mais completo de benefícios oferecidos por este, inclusive aqueles que exigem altas taxas de aplicação, como melhorias na textura do solo, retenção de água e sequestro de carbono, será acumulado com o tempo.

ESCOLHA DE BIOCHAR NÃO TRATADO PARA O CULTIVO DE PLANTAS

Os biochars podem ser usados sem pré-tratamento da biomassa ou com pós-tratamento do biochar. No entanto, eles devem ser escolhidos estrategicamente para atender às necessidades do usuário. Muitas vezes, os biochars de várias matérias-primas podem ser combinados para ajudar a maximizar o rendimento e minimizar o uso de fertilizantes. Nesta seção, analisaremos as principais conclusões dos capítulos anteriores e, em seguida, forneceremos diretrizes gerais relacionadas à escolha de biochars não tratados.

Principais conclusões sobre biochar não tratado

Nos Capítulos 4 e 6, aprendemos algumas características relevantes dos biochars não tratados:

- Os biochars geralmente proporcionam maior resposta benéfica às plantas quando aplicados em solos arenosos do que quando aplicados em outros solos;
- O biochar de baixa temperatura produzido a partir de adubos e resíduos de culturas produz o maior aumento na produtividade das culturas e nos microrganismos benéficos para a maioria das plantas e solos;
- As propriedades físicas de muitos solos, especialmente a capacidade de retenção de água, geralmente são melhoradas por biochars de temperatura mais alta aplicados em altas taxas de aplicação (>10 toneladas/ha);
- A moagem ou a trituração do biochar em pequenas partículas de biochar (menos de 50 microns) que podem migrar pelo solo e se fixar nas raízes pode ter um impacto maior na capacidade de retenção de água no solo, na eficiência de absorção de nutrientes pelas plantas e na resistência a doenças do que os pedaços maiores (>1 mm);

- A adsorção e a ligação de compostos orgânicos e inorgânicos tóxicos e de metais tendem a ser maiores com o uso de biochars produzidos abaixo de 400 °C ou acima de 600 °C, especialmente em solos arenosos;
- Os biochars, especialmente os biochars derivados de biomassa lenhosa, geralmente têm uma baixa capacidade de troca catiônica (CTC) (Figura 7.2). Para aumentar a CTC do solo, escolha biochars produzidos em baixa temperatura a partir de adubos ou outras matérias-primas com alto teor de minerais (Capítulo 4).

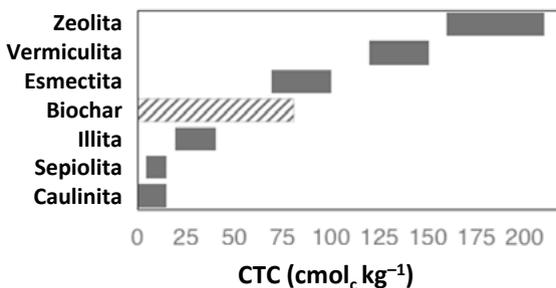


Figura 7.2 – Faixa da capacidade de troca catiônica (cmol_c/kg) de vários minerais e biochar.^{1,2} (Modificado de Zwart.)³

Diretrizes gerais para a escolha de biochars não tratados

Escolha um biochar feito de resíduos da mesma planta ou de uma planta semelhante àquela que você pretende cultivar. Por exemplo, se estiver cultivando milho, use biochar de colmo e sabugo de milho. Isso devolverá ao solo a maior parte dos macro e micronutrientes que foram usados no crescimento da planta. Se não for possível obter isso, use biochar produzido a partir de palha, grama, cascas de nozes, esterco ou bambu, em vez de biochar produzido a partir de biomassa lenhosa.

A mistura de diferentes matérias-primas com composições complementares de minerais e nutrientes pode aumentar a eficácia. Por exemplo, Bian et al.⁴ descobriram que a mistura de biochar produzido a partir de uma combinação de casca de arroz, rica em sílica, e resíduos de alimentos com alto teor de nitrogênio e fósforo, aumentou a produtividade quando incorporada ao fertilizante químico granulado NPK. Os rendimentos apresentaram melhorias tanto em taxas de aplicação altas quanto muito baixas (1% p/p do

solo e aproximadamente 100 kg/ha, respectivamente). A inclusão de casca de arroz forneceu sílica adicional, ajudando as plantas a resistir ao estresse ambiental e às pressões de pragas.

Se não houver disponibilidade de biochar de resíduos da colheita, opte pelo biochar derivado de matérias-primas mistas, como uma combinação de madeira e esterco, pirolisado em uma temperatura baixa. Quando o esterco é misturado com a biomassa lenhosa e pirolisado, os minerais finos do esterco, incluindo cloreto de potássio, carbonatos e sulfatos de magnésio e cálcio, fosfato de cálcio, óxido de ferro, argila e dióxido de silício, são depositados na superfície do biochar (veja a Figura 7.3). A condução da pirólise em uma temperatura baixa garante que a maioria desses minerais seja facilmente acessível aos microrganismos e às plantas. A capacidade de troca catiônica (CTC) desses biochars de matérias-primas mistas supera a do biochar produzido somente com madeira.⁵

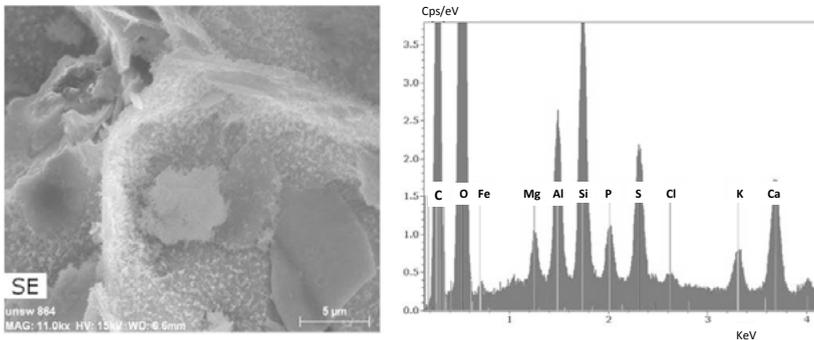


Figura 7.3 – Imagem de microscópio eletrônico de um biochar de matéria-prima mista pirolisado de madeira e esterco a 450 °C-600 °C em um forno simples (TLUD). O biochar lenhoso é revestido de partículas muito finas de minerais e nutrientes. O espectro mostra altos teores de Mg, Ca, P e S. Níveis muito altos de Al e Si no espectro são provenientes da argila que estava na palha coletada dos campos. Não havia nitrogênio, possivelmente devido à alta temperatura de produção.

Se o único biochar disponível for produzido a partir de madeira, que tem baixo teor de nutrientes, misture-o com nutrientes e minerais específicos. Como orientação geral, a proporção mínima de biochar para nutrientes e minerais é de 1:4. Consulte o Capítulo 8 para ver um estudo de caso sobre o rendimento e o retorno com diferentes proporções de NPK para biochar de cama de aviário e várias taxas de aplicação.



Escolha de biochar não tratado para restrições específicas

Algumas diretrizes para ajudar na escolha de biochar não tratado para atender a restrições ou objetivos específicos são apresentadas na tabela abaixo.

Para maximizar a quantidade de carbono e macro e micronutrientes que são devolvidos ao solo	Pirolise o resíduo da cultura em uma temperatura baixa (ou seja, 400 °C-450 °C).
Maximizar a renda dos créditos de carbono	Use biochars produzidos em temperaturas superiores a 500 °C. Eles têm um teor mais alto de carbono e uma vida útil significativamente mais longa do que os biochars produzidos em temperaturas mais baixas.
Para melhorar a capacidade de retenção de água ou aumentar a eficiência do uso da água	Adicione biochar finamente moído produzido em uma temperatura mais alta (500 °C-600 °C).
Reduzir os níveis de metais tóxicos ou a biodisponibilidade de produtos orgânicos	Adicione biochar finamente moído produzido a 500 °C- 700 °C, ou biochar produzido a uma temperatura baixa (cerca de 400 °C) que tenha altos teores de grupos funcionais de oxigênio e ferro (consulte os capítulos 4 e 6).
Para atender às restrições físicas e químicas do solo ao mesmo tempo, ou para atender a uma gama maior de restrições com uma única matéria-prima	Combine biochars de baixa e alta temperatura. A proporção específica pode depender da gravidade relativa das necessidades individuais, inclusive financeiras.
Para aumentar o pH do solo ácido	Use um biochar com pH maior que 7.

Para solo básico	Use um biochar com pH entre 6 e 6,5, que pode ser produzido a partir de pirólise em temperatura mais baixa (350 °C-400 °C) ou pelo tratamento do biochar com um ácido (preferencialmente fosfórico ou acético) ou ácido pirolenhoso.
------------------	--

Atendendo aos requisitos de nutrientes do solo com biochars não tratados

Os biochars produzidos a partir de matérias-primas com alto teor de nutrientes, especialmente se produzidos em faixas de temperatura baixa ou média, podem ter N, P, K ou S suficientes para ter valor de fertilizante em sua forma não tratada. Os biochars produzidos a partir de esterco e outros resíduos animais (por exemplo, barriga e carcaças), resíduos de alimentos e bio sólidos têm altos teores de N, sendo que a pena de galinha tem o maior teor de N, de até 20%.⁶ A maioria dos biochars de palha e grama tem um alto teor de K se produzidos entre 400 °C e 500 °C, mas têm concentrações relativamente baixas de N e P. As faixas de teor de nutrientes desses biochars estão listadas na tabela abaixo.

Matéria-prima	Temp. °C	N %	K %	P %	S %
Estrume, resíduos de animais (pedaços, carcaças), resíduos alimentares, bio sólidos	400-500	3.5-4.5	0.5-2	2-5	0.3-1
Pena de galinha	300-600	Até 20	na		0.6%
Palha e grama	400-500	1-2	3-5	<1	0.1

Os biochars com alto teor de nutrientes também podem fornecer cálcio e ter uma série de outras propriedades benéficas. Alguns biochars com alto teor de nutrientes (por exemplo, biochar produzido a partir de resíduos alimentares) podem ter grandes quantidades de sal (NaCl). Outros (por exemplo, biochar produzido a partir de bio sólidos) podem ter uma alta concentração de metais pesados. É importante fazer uma análise química detalhada, de preferência incluindo medidas dos níveis total e disponível, antes de usar esses biochars sozinhos em altas taxas de aplicação (especialmente para taxas superiores a 1 tonelada/ha).

Grande parte do N e do P nesses biochars pode ser liberada lentamente ao longo de 30 a 90 dias, embora isso dependa do pH do solo e do biochar, da frequência dos eventos de chuva e do tamanho das partículas do biochar. A dissolução e, portanto, a biodisponibilidade, é maior em solos ácidos e para pequenas partículas de biochar, especialmente aquelas com menos de 1 mm de diâmetro.

Normalmente, para produzir o mesmo rendimento que o fertilizante químico aplicado a 100-500 kg/ha, esses biochars com alto teor de macronutrientes precisam ser aplicados a taxas de 0,5 a 5 toneladas por hectare e concentrados na rizosfera da planta.

MÉTODOS PARA APRIMORAMENTO DE BIOCHARS

É possível fazer uso criativo de resíduos e recursos ricos em minerais, como cinzas, argilas, basalto, zeólita e terra diatomácea, resíduos de conchas de ostras e ouriços (CaCO_3), algas marinhas e madeira altamente composta. Essa abordagem é especialmente relevante para culturas de baixo valor, em que a aplicação de um biochar de origem econômica pode ser rentável.

Os três principais métodos de aprimoramento de biochars são:

- Pré-tratamento da biomassa antes da pirólise com produtos químicos, minerais ou nutrientes;
- Envelhecimento dos biochars, passando-os por um processo provisório antes de aplicá-los aos solos;
- Pós-tratamento dos biochars por meio da combinação com aditivos (produtos químicos, minerais e nutrientes).

Pode ser usada uma combinação dos três métodos. A Figura 7.4 ilustra o fluxo de materiais e processos que podem ocorrer em uma instalação de pirólise ou em uma fazenda para produzir biochar aprimorado. O processo de envelhecimento pode ser considerado uma ativação do biochar. Os fabricantes comerciais de biochar devem considerar a incorporação desses princípios para produzir biochars aprimorados.

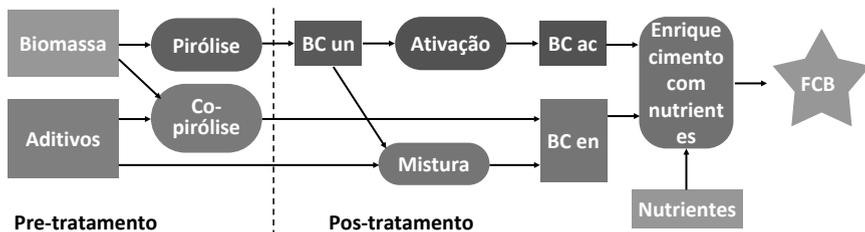


Figura 7.4 – Representação simplificada dos processos de produção do fertilizante composto de biochar (FCB), em que BCun, BCac e BCen são biochars não tratados, ativados e aprimorados, respectivamente. Os tipos de materiais estão em retângulos e os processos em elipses. (Modificado de Rasse et al.)⁷

Os métodos a seguir foram desenvolvidos e testados para garantir que as aplicações de menos de 1 a 2 toneladas/ha possam gerar um retorno sobre o investimento por meio de (a) aumento dos macronutrientes (N, P, K, Ca, S e Mg) e micronutrientes na rizosfera e (b) aumento da eficiência da absorção dos nutrientes. Os métodos precisam ser adaptados e refinados para cada sistema agrícola específico.

Pré-tratamento da biomassa

Os fabricantes comerciais de biochar e os agricultores que têm seu próprio forno de biochar podem fazer o pré-tratamento da biomassa antes da pirólise. A mistura da biomassa com minerais antes da pirólise pode aumentar o teor de carbono e o rendimento do biochar, ajudar a reter mais nutrientes na biomassa e fazer com que os minerais adicionados sejam ligados e complexados de forma benéfica com o carbono. Os minerais são revestidos com compostos de carbono durante a pirólise e formam uma fonte de energia e nutrientes para os microrganismos. Alguns microrganismos gostam de viver em ambientes com minerais ricos em oxigênio e partículas de carvão ricas em carbono. Esses microrganismos podem ajudar a disponibilizar nutrientes orgânicos e inorgânicos.

O pré-tratamento da biomassa pode envolver várias combinações de:

- Adição de argila (caulinita e bentonita ou montmorilonita), diatomita, areias verdes, magnetita, cal, gesso, dolomita, zeólitas, hematita, magnetita ou óxido de manganês;
- Adição de nutrientes como fosfato de rocha, cinzas de caldeiras e fogueiras a lenha, ossos, cloreto de potássio ou superfosfato;
- Adição de produtos químicos, incluindo ácido fosfórico, hidróxido de potássio, cloretos de Mg, Fe ou Zn e óxidos de Cu, Ti ou Zn.

Pré-tratamento de biomassa com argilas e minerais

Wang et al.⁸ e Dieguez-Alonso et al.⁹ pesquisaram pré-tratamentos minerais e químicos de biomassa e relataram que:

- O pré-tratamento da biomassa com minerais (especialmente argila) aumentou o rendimento e a porcentagem de carbono estável (Figura 7.5). Normalmente, a mistura de minerais e biomassa deve ser de 20 a 30% de minerais em uma base de massa seca;
- A argila (especialmente o caulim) é um catalisador ácido. Sua incorporação à biomassa aumentou o conteúdo de grupos funcionais de C e O no biochar resultante, o que aumentou sua CTC, CTA e compostos orgânicos solúveis em água.¹⁰ Alguns desses compostos auxiliam na germinação de sementes, ajudam as plantas a resistir a doenças e auxiliam na absorção de nutrientes;
- A mistura de 50% de argila com 50% de esterco (seco p/p) e, em seguida, a pirólise a 450 °C-500 °C foi considerada uma mistura ideal para melhorar o pasto no Tibete;¹¹
- A imersão do bambu em uma pasta de argila caulinitica e sulfato de ferro (FeSO_4) e, em seguida, a pirólise a menos de 500 °C, resultou em biochars de bambu com maior volume de poros e teor de carbono estável. Esse pré-tratamento com argila e ferro aumentou a abundância de microrganismos específicos na superfície do biochar. Esses microrganismos fixam o carbono e tornam o enxofre e o ferro mais disponíveis para as plantas;¹²
- A pulverização de 1% de um sal de potássio sobre a biomassa seca e a pirólise a 450 °C aumentaram o rendimento do biochar e seu conteúdo de carbono estável.¹³ A adição de bentonita com sal de potássio e a peletização favoreceram a transformação do potássio solúvel em água em potássio trocável e silicatos de potássio. Isso promoveu muito a característica de liberação lenta de potássio do biochar, tornando-o potencialmente um suplemento de potássio econômico.

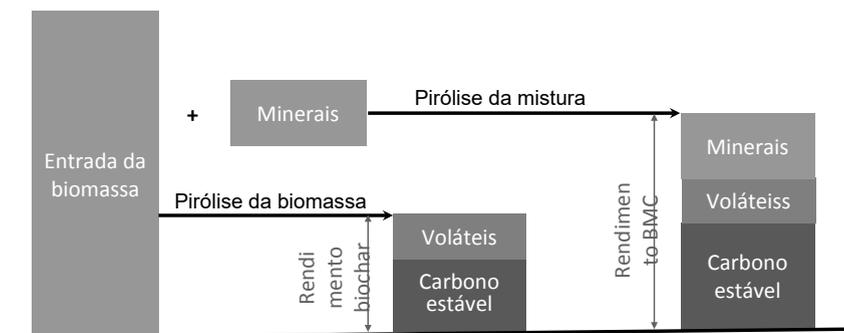


Figura 7.5 – Efeito da mistura de minerais com biomassa na produção de carbono estável após a pirólise. Os minerais aumentam o rendimento do biochar e da fração de carbono estável do biochar. Os minerais se “complexam” com o biochar para formar um rendimento maior de biochar-mineral-complexo (BMC).¹⁴

Um composto de biochar feito pela pirólise de uma mistura 1:1 de bambu e argila a 400 °C adsorveu íons de amônio e fosfato e os liberou lentamente, tornando o composto ideal para ser misturado com um fertilizante químico ou um fertilizante líquido orgânico.¹⁵ A retenção de íons de amônio foi atribuída à alta CTC da argila, enquanto a retenção de fosfato resultou da ligação iônica com cátions no biochar (por exemplo, Ca^{2+} ou Mg^{2+}). A adição de argila facilitou a pirólise do pó de bambu em biochar a temperaturas em torno de 400 °C, já que a argila atuou como um catalisador ácido sólido.

Pré-tratamento da biomassa com produtos químicos

A imersão da biomassa em soluções de sulfato de ferro e cloreto de ferro (com ou sem a adição de K) antes da pirólise resulta em ligações de fosfatos e nitratos ao biochar.

A imersão da palha de arroz em uma solução concentrada de carbonato de magnésio seguida de pirólise entre 400 °C e 500 °C produziram um composto de biochar que melhorou a retenção de fosfato (devido à quimissorção) e também a capacidade de retenção de água.¹⁶

A biomassa pré-tratada com superfosfato, ossos moídos ou ácido fosfórico aumentou o rendimento do biochar.¹⁷ A retenção de mais carbono no biochar reduziu a taxa de liberação de P e estabilizou os metais pesados (Figura 7.6).¹⁷ Normalmente, a proporção de fosfato-mineral em relação à biomassa era de 20-30%, com uma temperatura de pirólise de 450 °C-500 °C.

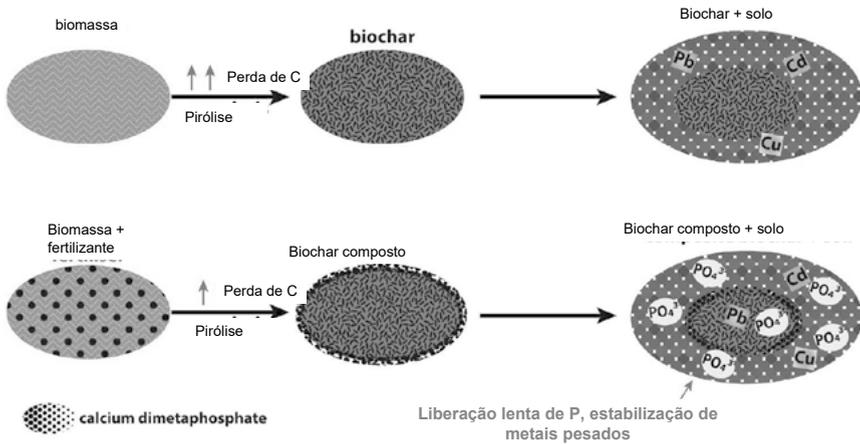


Figura 7.6 – Esquema da adição de um mineral ou produto químico com alto teor de P à biomassa e copirólise para melhorar a retenção de carbono do biochar, retardar a liberação de nutrientes e estabilizar metais pesados nos solos.¹⁷

O Departamento de Indústrias Primárias de NSW realizou testes em vasos de um biochar produzido pela adição de 30% de gesso à palha de trigo e pirólise a 450 °C, com e sem a adição de um agente umectante (Aquisil produzido pela CHT Australia Pty Ltd). O biochar modificado com gesso aumentou a produção de grãos e a clorofila das folhas (Figura 7.7). Também melhorou a estrutura e reduziu a alcalinidade do solo.

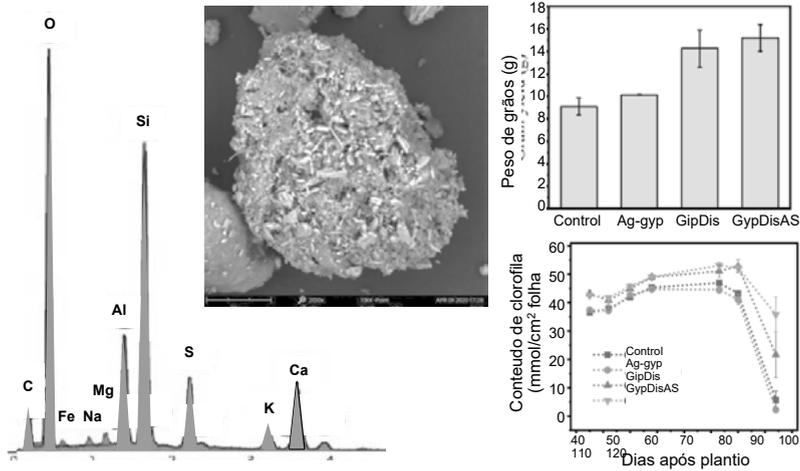


Figura 7.7 – À esquerda: Imagem de microscópio eletrônico de varredura e análise elemental de uma partícula de biochar-gesso. **Acima, à direita:** a produção de trigo por vaso para o Controle= sem emenda, Ag-gypsum = Gesso agrícola a 500 kg/ha, GypDis = biochar revestido com gesso líquido e GypDisAS = biochar de gesso líquido com dispersante Aquasil. **No canto inferior direito:** teor de clorofila nas folhas resultante dos quatro tratamentos. (Informações fornecidas pelo Dr. E Tavakkoli.)

Biochars envelhecidos

A aplicação de biochars envelhecidos geralmente leva a rendimentos mais altos, maior resistência das plantas a doenças e estresse e maior saúde do solo. Os biochars podem ser envelhecidos por meio das seguintes práticas:

- Permitir que o biochar interaja com os minerais do solo, a matéria orgânica e os microrganismos, de preferência em uma temperatura mais quente;
- Co-compostagem do biochar com biomassa e minerais;
- Administrar o biochar como suplemento na alimentação de animais.

Envelhecimento no solo ou em tambores

Um método simples para envelhecer o biochar é misturá-lo com um solo argiloso ácido com alto teor de ferro e alto teor de carbono orgânico, deixando-o repousar por pelo menos um mês a uma temperatura de pelo menos 25 °C (60 °C é o ideal). O envelhecimento do biochar e do solo resulta na formação de complexos organo minerais, que aumentam a CTC e ajudam a construir o carbono do solo.¹⁸

Outro método simples para envelhecer o biochar e aumentar sua capacidade de reter nitrogênio é colocá-lo em um tambor de aço sem pintura e adicionar água com pH em torno de 5,5. Novamente, o processo de envelhecimento se acelera em temperaturas mais altas.

O biochar pode ser envelhecido, passando por outras aplicações benéficas, como a filtragem de água ou a captura do escoamento de nutrientes antes de adicionar o biochar envelhecido aos solos.

Alimentação com biochar para animais

Um dos métodos mais econômicos para envelhecer, biochar e melhorar suas propriedades é alimentar os animais com biochar, com um pouco de melaço. Os animais podem se auto alimentar com um recipiente de biochar somente (ou com 1% de melaço) ou com uma mistura de biochar, colocado em galpões ou nos campos. Consulte o Capítulo 9 para ver um estudo de caso detalhado sobre o uso de biochar como aditivo para a alimentação do gado.

Quando o biochar é ingerido com a ração, alguns dos nutrientes da ração mastigada entram nos poros do biochar. O biochar enriquecido com nutrientes reage com o ácido estomacal e com as enzimas, o que aumenta a CTC e a CTA do biochar, aumentando sua capacidade de adsorver e reter nutrientes. O animal excreta excrementos mais secos e ricos em nutrientes que contêm o biochar aprimorado. Os besouros rola-bosta e minhocas preferem esse esterco mais seco e o transportam rapidamente para o perfil do solo.

O conhecimento sobre a melhor formulação de biochar para animais é limitado. Atualmente, a maioria dos biochars para alimentação animal é produzida a partir da madeira. No entanto, o biochar produzido a partir de grama, palha, sementes ou outros resíduos de origem vegetal tem um perfil mineral e de nutrientes mais próximo do que os animais terrestres consomem e pode ser usado para alimentação animal.

A mistura de argila, zeólitas e diatomita (que são minerais fornecidos aos animais para lidar com a toxicidade das plantas) com um biochar de madeira macia ou dura em uma proporção de minerais:madeira que varia de 30:70 a 50:50, antes da pirólise, pode aumentar a eficácia de um biochar à base de madeira para a saúde, o peso ou o aumento da produção de leite dos animais.

Essa prática já vem sendo utilizada na Austrália; no Brasil ainda são necessários mais estudos e avaliações sobre a aplicabilidade dessa prática.

Aqui estão alguns exemplos de fazendeiros de todo o mundo que usaram biochar com animais:

- Os produtores de leite e de carne bovina observaram bons ganhos de peso com a alimentação de desmamados e bezerros com biochar;
- Os proprietários de cavalos notaram melhor saúde nos cavalos mais velhos e, em alguns casos, melhor desempenho nas corridas dos cavalos mais jovens, depois que eles foram alimentados com biochar;
- Um fazendeiro que testou a alimentação de 36 vacas desmamadas com rações regulares e 36 vacas com composto de madeira-biochar-argila descobriu que o peso dos animais alimentados com o composto de biochar melhorou 36% em um período seco e 16% em um período úmido, em relação ao peso daqueles que receberam rações regulares;
- Um produtor descobriu que os ruminantes preferiam o biochar lenhoso acidificado com ácido clorídrico (6 partes de ácido: 94 partes de biochar). Quando o biochar é acidificado, ele tem uma concentração maior de sais em sua superfície, o que pode aumentar sua palatabilidade para o animal. Além disso, a CTC e CTA do biochar aumentam, o que pode aumentar a retenção de nutrientes no sistema digestivo do animal. Como resultado do processo de envelhecimento no intestino do animal, o biochar no esterco tem uma capacidade maior de reter nutrientes;
- A rápida melhoria das pastagens foi obtida com o fornecimento de ração enriquecida com biochar para os animais no campo e besouros rola-bosta para levar o biochar para o solo (consulte o Capítulo 9 para ver um estudo de caso: Rentabilidade da alimentação de animais com biochar). Se o biochar for fornecido aos animais em galpões ou celeiros, a mistura resultante de estrume e biochar poderá ser aplicada nos campos ou processada posteriormente para armazenamento ou venda*.

* Esses estudos foram realizados na Austrália, onde o uso de biochar na alimentação animal já é praticado sob regulamentação local. No Brasil, a adoção dessa prática requer pesquisas adicionais e estrita observância às normas dos órgãos reguladores competentes.

Biochar usado para criação de peixes e para tratamento de água

Peixes e camarões cultivados em lagos ou tanques podem ser alimentados com biochar produzido a partir de bambu, madeira, algas marinhas ou algas, e os resíduos podem ser secos e aplicados como fertilizante orgânico ou pirolisados para produzir um fertilizante com alto teor de nutrientes. Normalmente, o biochar é utilizado como 1-2% da ingestão total de ração. O biochar também pode ser usado em filtros ou pendurado em sacos nas lagoas ou tanques para adsorver nutrientes (Figura 7.8). O biochar rico em nutrientes pode então ser aplicado como fertilizante.



Figura 7.8 – À esquerda: Sacos cheios de biochar em um lago carregado de nutrientes. **À direita:** Os sacos cheios de biochar adsorveram os nutrientes da água do tanque, resultando em um tanque de água limpa.¹⁹

Biochar usado em camas e galpões de animais

Quando o biochar é usado como cama para animais, os odores podem ser reduzidos. Os nutrientes do esterco e da urina se difundem nos poros do biochar. Outros minerais (especialmente zeólita) podem ser adicionados para reduzir o teor de umidade e os odores. O biochar e o esterco, ricos em nutrientes, podem ser vendidos ou processados posteriormente, por exemplo, por torrefação ou pirólise, para formar um complexo biochar-organomineral (BOMC).

O biochar em filtros específicos colocados em galpões de animais pode ser usado para remover odores. A eficácia de um sistema de remoção de odores em escala piloto que utilizou biochar comercial para remover o sulfeto de hidrogênio e 15 compostos orgânicos voláteis (VOCs) foi avaliada colocando-se o sistema em uma baía de gestação de suínos e tratando

continuamente o ar interno por 21 dias. Todos os compostos no efluente do filtro de biochar, exceto o ácido acético (cuja contribuição para o odor seria mínima devido ao seu limiar de odor muito alto), estavam abaixo dos limites de detecção. Os autores sugeriram que, depois de ser usado para reduzir o sulfeto de hidrogênio e os VOCs, o biochar comercial usado poderia ser reciclado para melhorar a saúde do solo.²⁰

Normalmente, a água usada para remover ou lavar o esterco do chão do galpão é armazenada em poços ou lagoas. Com a introdução de biochar nesses tanques, os nutrientes solúveis podem ser absorvidos e, posteriormente, reciclados como um corretivo do solo. Um método conveniente é suspender o biochar na lagoa em sacos de filtragem de trama aberta (as meias de náilon provaram ser duráveis e econômicas, e pode-se considerar o uso de envoltórios de silagem reaproveitados). Como alternativa, os nutrientes podem ser extraídos passando-se a água por filtros de biochar (Figura 7.9) e, em seguida, distribuindo em cascata o biochar carregado de nutrientes para outros usos.

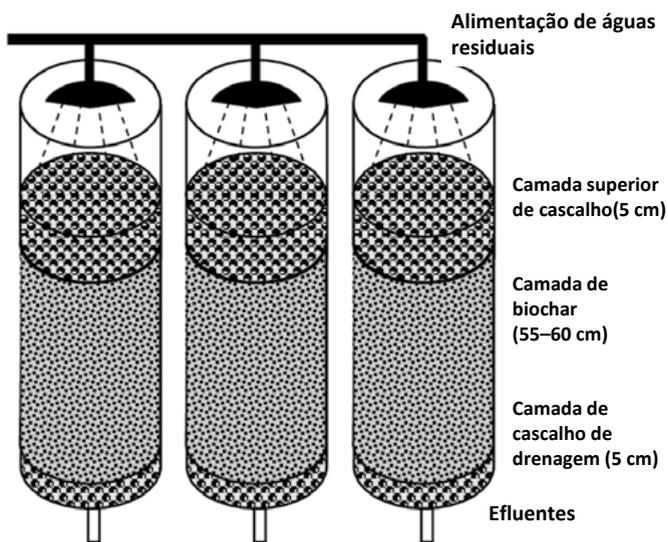


Figura 7.9 – Filtro de água à base de biochar.²¹

Pós-tratamento do biochar

Fertilizante composto de biochar

O biochar pode ser misturado com minerais e fertilizantes orgânicos ou inorgânicos com alto teor de NPK para produzir um fertilizante composto de biochar sólido (BCF).

- Para adsorver gás de amônia e cátions de amônio, use um biochar de baixa temperatura misturado 50:50 com um mineral de alta CTC, como a zeólita;²²
- Para aumentar a capacidade do biochar de capturar gás amônia, ative-o mergulhando o biochar em ácido fosfórico a 30% por 12 horas e, em seguida, aqueça-o em um forno a 450 °C por 60 minutos;
- Para adsorver nitratos, use um biochar de alta temperatura que tenha sido acidificado;
- Para reduzir as emissões, aumentar a qualidade do composto e produzir um fertilizante de biochar- composto, adicione ácido pirolenhoso e zeólita com biochar enriquecido com FeSO_4 à mistura de biomassa e biochar antes da compostagem.^{23,24}

Produção de fertilizantes compostos de biochar em uma instalação de pirólise

A resposta mais significativa das plantas é tipicamente observada quando nutrientes são adicionados durante o processo de resfriamento do biochar ou ao biochar previamente envelhecido. Os nutrientes típicos podem incluir:

- Fertilizantes químicos, como superfosfato de ureia, cloreto de potássio (KCl), fosfato de mono e diamônio, sulfato ou nitrato de amônio ou uréia;
- Fertilizantes orgânicos, incluindo aqueles feitos de farinha de penas ou penas de galinha, algas ou outras algas marinhas, esterco ou biossólidos secos e esterilizados ou compostados, sangue e ossos triturados, urina, ervas daninhas, resíduos de frutas e vegetais e solo rico em nutrientes e minerais;

- Uma combinação dos itens acima é importante em solos muito esgotados. A adição de uma pequena quantidade de fertilizante químico com fertilizantes orgânicos, além de minerais e biochar, pode aumentar a abundância de microrganismos que promovem o crescimento. Com o tempo, à medida que os microrganismos que fixam o N e disponibilizam o P proliferam, o uso de fertilizantes químicos pode não ser necessário.

É improvável que a mistura de fertilizantes químicos com biochar e minerais para produzir um fertilizante composto de biochar (BCF) e a aplicação da mistura na rizosfera prejudique a saúde do solo ou as plantas jovens. Os produtos químicos se difundem nos poros do biochar, onde reagem e se ligam aos minerais e ao biochar, de modo que, quando são aplicados ao solo, não causam grandes alterações prejudiciais no pH ou no Eh do solo, nem reduzem a abundância de microrganismos promotores de crescimento. À medida que o biochar envelhece, as camadas organominerais que se formam na superfície do biochar recobrem os produtos químicos, resultando em uma liberação lenta de N, P e K. As pesquisas indicam que esses BCF podem, ao longo dos anos, sequestrar carbono no solo e aumentar a abundância de microrganismos benéficos.²⁷

A melhor maneira de combinar fertilizantes orgânicos com biochar para obter a melhor resposta das plantas pode ser resfriar o biochar no final da pirólise (seja na fazenda ou em uma instalação comercial) com esterco ou lodo biológico e minerais. Adicione argila (ou solo com alto teor de argila), fosfato de rocha, basalto e terra de diatomáceas para aumentar o crescimento das plantas e dos microrganismos benéficos (Capítulo 4). Todos os orgânicos voláteis liberados na produção de biochar podem ser condensados para dar origem a um ácido pirolenhoso que pode ser adicionado à mistura. Isso esteriliza o esterco (ou lodo) e reduz a taxa de decomposição no solo.²⁵ As Figuras 7.10 e 7.11 ilustram a variedade de nutrientes que estão na superfície do biochar resultante.

Um vídeo útil para assistir foi produzido pela Warm Heart Foundation, que mistura microrganismos eficazes, produzidos por eles mesmos, em sua mistura de fertilizantes.²⁶

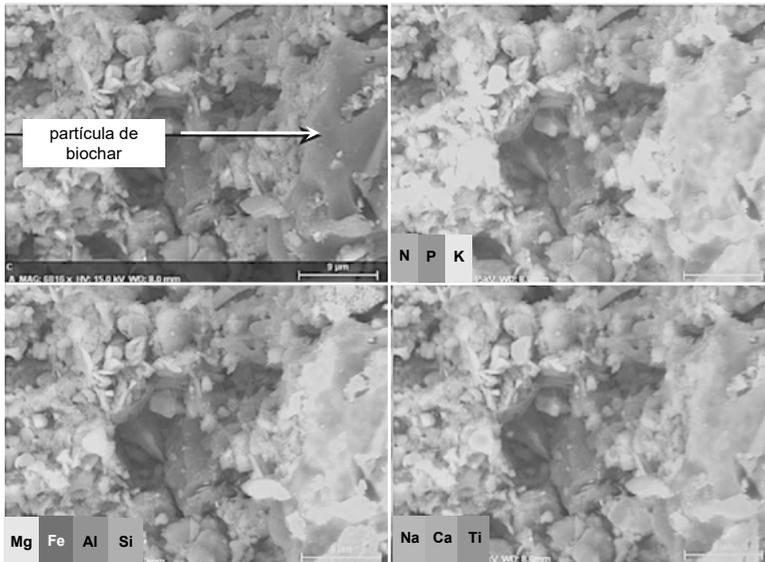


Figura 7.10 – Imagem de microscópio eletrônico de varredura e mapa de nutrientes da superfície de um biochar de madeira que foi temperado com uma mistura de minerais e esterco. **Acima à esquerda:** uma partícula de biochar próxima à margem direita com partículas minerais à sua esquerda e sobre ela na imagem. **Acima à direita:** minerais de potássio (amarelo) e fósforo (vermelho) formados ao redor, sobre e dentro da partícula de biocarvão com alto teor de carbono; compostos de nitrogênio (azul-petróleo) do esterco ligados ao carbono e ao mineral de potássio. As imagens inferiores mostram as distribuições de outros minerais. **À esquerda:** Mg (amarelo), Fe (roxo), Al (rosa) e Si (azul- petróleo). **À direita:** Na (azul-petróleo), Ca (verde) e Ti (vermelho).

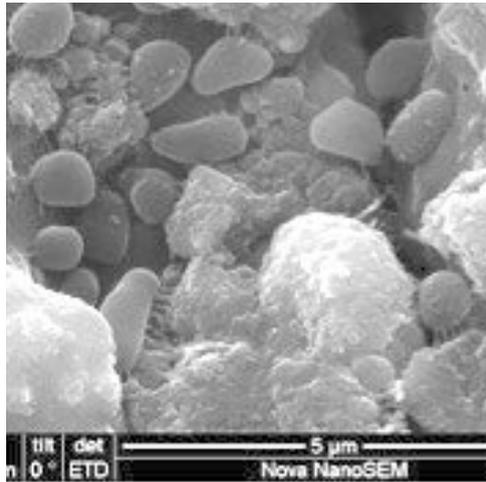


Figura 7.11 – Imagem de microscópio eletrônico de varredura dos microrganismos que crescem no biochar pós-tratado mostrado na Figura 7.10.

Produção de fertilizantes compostos de biochar na fazenda

Talvez não seja possível obter um produto comercial que atenda às restrições de nutrientes do seu solo, portanto, aqui estão algumas regras gerais para personalizar um BCF adequado, misturando fertilizantes sólidos com biochar, em sua fazenda:

- A escolha ideal e a quantidade de minerais a serem incorporados ao biochar variam de acordo com o tipo de solo. Para a maioria das aplicações, considere a adição de argilas caulinita e bentonita, pó de basalto, sulfato de ferro, terra diatomácea e fosfato de rocha. Algumas receitas para lidar com restrições específicas do solo são apresentadas na tabela.

Um fertilizante de uso geral que utiliza biochar lenhoso	Use uma mistura de biochar e minerais nas proporções de: 10 de biochar, 1,5 de caulinita, 1,5 de bentonita, 2 de pó de basalto, 1,5 de terra diatomácea, 1,0% de fosfato de rocha.
Solos argilosos	Reduza a quantidade de argila para 10 biochar:0,5 argila, usando bentonita e caulinita, e adicione gesso para ajudar a quebrar a argila.
Solo arenoso	Adicione mais argila (10 biochar:2-5 argila).
Solos muito pobres na maioria dos micronutrientes	Mergulhe o biochar em uma solução de minerais marinhos ou misture com outros materiais orgânicos ricos em micronutrientes, como lodos de fazendas de animais ou peixes, ou biossólidos limpos e esterilizados ou equivalentes.
Faltam apenas alguns micronutrientes no solo	Adicione os micronutrientes específicos aos outros minerais, de preferência na forma líquida. Determine a quantidade a ser adicionada com base em uma análise do solo e na taxa de aplicação de biochar.

- Outros minerais, como placa de silicato de cálcio residual (CaSiO_2), magnetita ou hematita, zeólitas, cal agrícola e gesso também podem ser adicionados para fornecer micro e macronutrientes específicos e aumentar a abundância de microrganismos promotores de crescimento.
- Ao adicionar fertilizantes com alto teor de amônio, a zeólita ajuda a reduzir a volatilização e a dissolução.
- Eleve o pH do biochar mais minerais para cerca de 6-6,5 usando um ácido inorgânico (como o ácido fosfórico) ou um ácido orgânico (ácido cítrico ou ácido pirolenhoso). Isso reduz a chance de volatilização da amônia.
- Acrescente ao biochar líquidos orgânicos concentrados com alta CTC e CTA (por exemplo, humatos; ecogrowth.com.au/products/eco-humate), especialmente se o biochar tiver sido produzido em altas temperaturas (o que esgota seus níveis de nutrientes) ou se for

aplicado em solos com pouca matéria orgânica prontamente disponível. A matéria orgânica forma uma película ao redor do biochar e pode aumentar a CTC e CTA e a abundância de microrganismos.

- Misture o fertilizante e os minerais moídos com biochar, com ou sem líquido orgânico concentrado e infundido. A melhor proporção de mistura depende das restrições do solo e das necessidades das plantas. Como regra geral, tanto para o BCF orgânico quanto para o inorgânico, use de 15 a 25% de biochar, de 5 a 8% de minerais e o restante (67 a 80%) de fertilizante.
- Utilize calor de baixa intensidade na mistura de biochar, minerais e fertilizantes para fortalecer a ligação entre os três componentes no aditivo final e aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas.
 - Para um fertilizante orgânico, o melhor método é aquecer a mistura a pelo menos 60 °C. Uma maneira de fazer isso é colocar tambores ou sacos contendo os minerais e o fertilizante no meio de uma pilha de compostagem.
 - Para um fertilizante químico, um método simples é deixar a mistura em um recipiente de malha aberta a 25-35 °C por um mês. A Figura 7.12 é uma imagem de microscópio eletrônico de varredura de um biochar de palha de trigo misturado com argila e fosfato diamônico de ureia e deixado em um saco por um mês.
- Quando todos os ingredientes estiverem misturados, pulverize-os com uma solução de sulfato de ferro. A quantidade de FeSO_4 necessária depende do tipo de solo e das necessidades das plantas. Para solos arenosos com baixo teor de Fe, use a proporção 20:1 BC: FeSO_4 . Alguns solos podem exigir adições na faixa de 40:80 BC: FeSO_4 . Para solos com alto teor de Fe, não há necessidade de adição complementar.

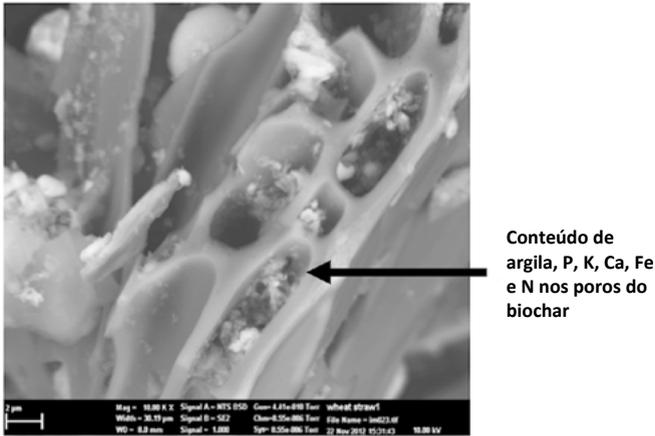


Figura 7.12 – Imagem de microscópio eletrônico de um biochar com poros preenchidos com fertilizante químico NPK

Pontos principais

A maioria dos biochars de esterco, biossólidos e palha produzidos em baixas temperaturas (<450 °C) geralmente não precisa de adição de compostos orgânicos.

Após a mistura, é importante secar todos os líquidos orgânicos e minerais que você aplicar ao biochar, para que eles tenham uma ligação mais forte com o biochar.

Você precisa usar sua experiência para produzir essas formulações. Isso começa com a compreensão das restrições do solo, usando ingredientes que funcionaram em sua fazenda e fazendo alguns pequenos testes com diferentes formulações.

Produção de composto de biochar-ureia

Para produzir um composto de biochar-ureia, comece aquecendo a ureia até que ela se torne um líquido. Misture o líquido obtido com o biochar produzido em alta temperatura e tratado com ácido para atingir um pH de 6,5. Em seguida, misture a argila bentonita aquecida (80 °C) ao biochar umedecido. A argila reveste o biochar, e o espaço intersticial entre as camadas de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) na argila, que são expandidas pelo calor, pode ser preenchido com nitrogênio residual (Figura 7.13).

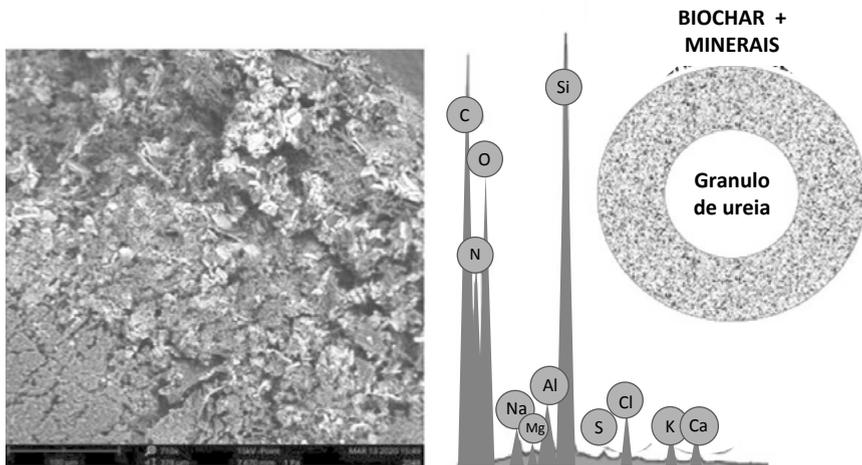


Figura 7.13 – Ureia encapsulada com biochar mais mineral. **À esquerda:** Imagem de microscópio eletrônico de varredura da superfície do biochar-mineral. **Centro:** A análise elementar mostra o alto teor de nitrogênio que foi infundido na superfície. **À direita:** Representação esquemática.

Um método alternativo é adquirir uma peletizadora de baixa pressão de baixo custo e peletizar todos os componentes juntos, gerando calor dentro da matriz de peletização. Outra opção é usar um granulador de baixo custo para combinar os ingredientes em grânulos e, em seguida, secar os grânulos (Figura 7.14). Os fertilizantes químicos existentes, com pH em torno de 7, e um agente ligante (como lignina, argila ou amido) podem ser combinados com o biochar em um granulador.



Figura 7.14 – Revestimento de grânulos de ureia. **À esquerda:** Adição de uma mistura de argila úmida e pó de biochar aos grânulos de ureia em um aglomerador de placas. **Ao centro:** A argila e o biochar estão revestindo os grânulos de ureia. **À direita:** Secagem dos grânulos com um secador de cabelo

Produção de complexos biochar-organo minerais (BOMC)

Um terceiro método é fazer um fertilizante orgânico de liberação lenta conhecido como complexo biochar- organomineral. Esses fertilizantes são usados para aumentar o crescimento de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Os BOMCs foram originalmente projetados após uma análise detalhada das pequenas partículas magnéticas de carbono com alto teor de fósforo extraídas da Terra Preta.

Para fazer esse produto, trate o biochar com ácido fosfórico concentrado a 6%. Faça uma mistura que contenha 33% de biochar, 33% de esterco ou cama de aves e 33% de minerais, incluindo uma mistura de argila, fosfato de rocha, pó de basalto, gesso de cal, diatomita e um mineral de ferro (de preferência magnetita ou ilmenita). A proporção exata depende das restrições do solo em sua fazenda. Aqueça esse produto a uma temperatura de 220 °C (por exemplo, usando o calor residual do seu forno). Adicione 0,5% a 1% (p/p) de ácido pirolenhoso à mistura. Este produto apresenta alta concentração de NPK disponível e uma elevada concentração de compostos orgânicos, que impulsionam a abundância de microrganismos e auxiliam as plantas na resistência a doenças e outras adversidades ambientais.

Produção de fertilizantes líquidos de biochar e sprays foliares

Há muitas maneiras de produzir fertilizantes líquidos de biochar-organomineral e sprays foliares. Um método é ilustrado na Figura 7.15. Nesse caso, a biomassa é misturada com minerais e pirolisada a 450 °C. O biochar resultante é misturado com água e aquecido em um tambor ou em um emulsificador. A mistura passa por uma bomba que decompõe o biochar e produz um líquido com alto teor de moléculas orgânicas, minerais revestidos de carbono e biochar com tamanho de partícula inferior a 100 microns. O pH é ajustado para 6,5 com um ácido ou uma base. Outros nutrientes que não são voláteis também podem ser adicionados ao tanque para garantir que os poros do biochar sejam carregados com nutrientes específicos.

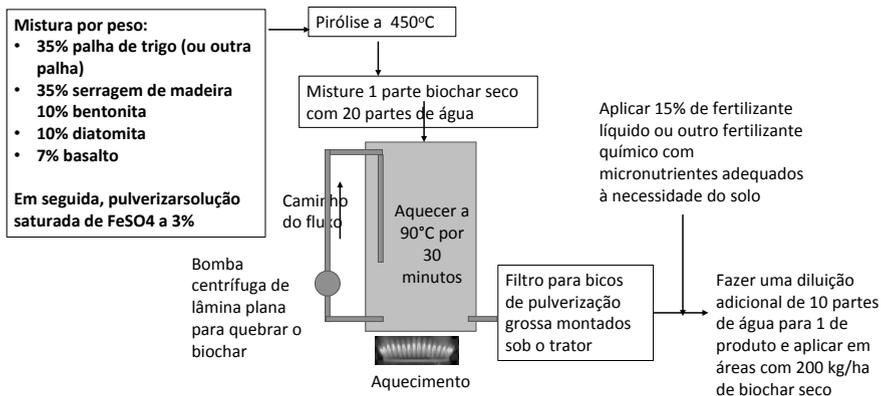


Figura 7.15 – Um método para fazer um fertilizante líquido de biochar.

CONCLUSÃO

Neste capítulo, descrevemos várias técnicas que podem ser usadas para aprimorar as propriedades do biochar para atender a restrições específicas do solo. Uma publicação manual posterior fornecerá mais detalhes sobre como fabricar e aplicar biochars aprimorados específicos.

Referências

1. Koon J.H. e Kaufman W.J. (1975). Ammonia Removal from Municipal Wastewaters by Ion Exchange (Remoção de amônia de águas residuais municipais por troca iônica). *Journal Water Pollution Control Federation* 47:448-465 www.jstor.org/stable/25038654
2. Christidis G.E. (2013). Assessment of Industrial Clays (Avaliação de argilas industriais). *Developments in Clay Science* 5:425-449 doi.org/10.1016/B978-0-08-098259-5.00017-2
3. Zwart K. (2020). Effects of Biochar Produced from Waste on Soil Quality (Efeitos do biocarvão produzido a partir de resíduos na qualidade do solo). Em Meers E, Velthof G, Michels E e Rietra R (eds) *Biorefinery of Inorganics: Recovering Mineral Nutrients from Biomass and Organic Waste* John Wiley and Sons Ltd, pp. 283-299. doi.org/10.1002/9781118921487.ch5-7
4. Bian R., Joseph S. et al. (2022). Copyrolysis of food waste and rice husk to biochar to create a sustainable resource for soil amendment: Um estudo de caso em escala piloto em Jinhua, China. *Journal of Cleaner Production* 347:131269-131269 doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131269

5. Novak J.M. et al. (2014). Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. *Journal of Soils and Sediments* 14:330-343 doi.org/10.1007/s11368-013-0680-8
6. Almutairi A.A. et al. (2023). Variations in composition and stability of biochars derived from different feedstock types at varying pyrolysis temperature. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 22:25-34 doi.org/10.1016/j.jssas.2022.05.005
7. Rasse D.P., Joseph S. et al. (2022). Enhancing plant N uptake with biochar based fertilizers: limitation of sorption and prospects. *Plant Soil* 475:213-236 doi.org/10.1007/s11104-022-05365-w
8. Wang L. et al. (2021). Biochar composites: Tendências emergentes, sucessos de campo e implicações de sustentabilidade. *Soil Use and Management* 38:14-38 DOI: 10.1111/sum.12731
9. Dieguez-Alonso A. et al. (2019). Projetando propriedades de biochar por meio mistura de matéria-prima de biomassa com metais: Impacto no comportamento de adsorção de oxiníons. *Chemosphere* 214:743–753 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.09
10. Reynolds A., Joseph S. et al. (2018). Effect of clay and iron sulphate on volatile and water-extractable organic compounds in bamboo biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 133:22-29 doi.org/10.1016/j.jaap.2018.05.007
11. Rafiq Z.M., Joseph S. et al. (2017) Pyrolysis of Attapulgite Clay Blended with Yak Dung Enhances Pasture Growth and Soil Health; Characterization and Initial field trials. *Science of the Total Environment* 607-608:184-194 doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.186
12. Ye J., Joseph S.D. et al. (2017). Processos quimiolitotróficos nas comunidades bacterianas na superfície de biochars enriquecidos com minerais. *The ISME Journal* 11:1087-1101 doi.org/10.1038/ismej.2016.187
13. Mašek O. et al. (2019). A dopagem de potássio aumenta o potencial de sequestro de carbono do biochar em 45%, facilitando a dissociação do sequestro de carbono da melhoria do solo. *Scientific Reports* 9:5514 doi.org/10.1038/s41598-019-41953-0
14. Buss W. et al. (2022). O biochar enriquecido com minerais proporciona maior recuperação de nutrientes e remoção de dióxido de carbono. *Communications Earth and Environment* 3:67 doi.org/10.1038/s43247-022-00394-w
15. Chen L. et al. (2017). Compósitos de montmorilonita-biochar ecologicamente corretos: Produção fácil e adsorção-liberação ajustável de amônio e fosfato. *Journal of Cleaner Production* 156:648-659 doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.050
16. Qin X. et al. (2020). Preparation and Characterization of MgO-Modified Rice Straw Biochars (Preparação e caracterização de biochars de palha de arroz modificados com MgO). *Molecules* 25:5730 doi.org/10.3390/molecules25235730

17. Zhao L. et al. (2016). Copyrolysis of Biomass with Phosphate Fertilizers To Improve Biochar Carbon Retention, Slow Nutrient Release, and Stabilize Heavy Metals in Soil. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 4:1630–1636 doi.org/10.1021/acsschemeng.5b01570
18. Yang Y. et al. (2022). A estabilidade do biocarvão e o impacto na mineralização do carbono orgânico do solo dependem do processamento do biocarvão, do envelhecimento e do teor de argila do solo. *Soil Biology and Biochemistry* 169:108657 doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108657
19. Princeton Hydro (2021). How to Reduce Nutrients and Improve Water Quality with Biochar <https://princetonhydro.com/how-to-reduce-habs-improve-water-quality-with-biochar/>
20. Ro KS. et al. (2021). Pilot-Scale H₂S and Swine Odor Removal System Using Commercially Available Biochar (Sistema de remoção de odor de suínos e H₂S em escala piloto usando biochar disponível no mercado). *Agronomia* 11:1611 doi.org/10.3390/agronomy11081611
21. Dalahmeh S.S. (2016). Capacity of biochar filters for wastewater treatment in onsite systems - relatório técnico. *Relatório SLU 90* pub.epsilon.slu.se/14611/7/Dalahmeh_s_171005.pdf
22. Ro K.S. et al. (2015). Removing Gaseous NH₃ Using Biochar as an Adsorbent. *Agriculture* 5:991-1002 doi.org/10.3390/agriculture5040991
23. Banik C. et al. (2023). The role of biochar and zeolite in enhancing nitrogen and phosphorus recovery: Uma tecnologia sustentável de gerenciamento de esterco. *Chemical Engineering Journal* 456:141003 doi.org/10.1016/j.cej.2022.141003
24. Wang Q. et al. (2018). Combinação de biochar, zeólita e vinagre de madeira para compostagem de esterco suíno: O efeito sobre a emissão de gases de efeito estufa e a conservação de nitrogênio. *Waste Management* 74:221-230 doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.01
25. Ye J., Joseph S.D. et al. (2016). Uma combinação de complexos biochar-mineiros e composto melhora os processos bacterianos do solo, a qualidade do solo e as propriedades das plantas. *Front. Microbiol.* 7:372–372 doi.org/10.3389/fmicb.2016.00372
26. Warm Heart Foundation www.youtube.com/watch?v=fA7K9P08i7k
27. Joseph S. et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: Uma revisão dos mecanismos que controlam as respostas do solo e das plantas ao biocarvão. *GCB Bioenergia* 13:1731-1764 doi.org/10.1111/gcbb.12885

CAPÍTULO 8

Aplicações de biochar

Pontos principais

- Siga as diretrizes para a aplicação de biochar:
 - Misture biochar e fertilizante.
 - Siga as práticas padrão para as taxas de conteúdo de nutrientes.
 - Aplicar biochar na zona radicular das mudas.
 - Aplique o biochar a cada ciclo de cultivo.
 - Evitar a dispersão aérea e a perda de biochar por erosão.
- Para cada combinação biochar-planta-solo, há taxas de aplicação específicas que resultam no aumento de produtividade, resistência das plantas a doenças, saúde do solo e lucratividade. As taxas de aplicação para otimizar esses diferentes resultados podem não ser as mesmas.
- Realize testes de diferentes taxas de aplicação em sua própria área de cultivo para determinar a taxa de aplicação mais eficaz para lidar com as restrições da planta e do solo dentro das restrições de custo.
- Ao fazer o pós-tratamento e a aplicação de biochar fino, use equipamentos de proteção de segurança conforme recomendado pelas normas de segurança.
- A combinação de taxas moderadas de biochar com fertilizante de fosfato de diamônio (DAP) pode reduzir os custos de fertilizantes e melhorar a lucratividade.
- O fertilizante à base de biochar, aplicado como uma camada na zona da raiz, aprimora as práticas agrícolas, estimula o crescimento das plantas e melhora a fertilidade do solo em solos ácidos e deficientes em fósforo.
- Algumas práticas de aplicar o biochar incluem:
 - Aplique como camadas e faixas da zona radicular sob ou ao lado das futuras mudas.
 - Injete misturas de composto-biochar e esterco-biochar como sólidos, pastas ou líquidos no subsolo.
 - Aplique biochar em faixas ou sulcos profundos ao lado dos cultivos.
 - Aplique biochar líquido ou extrato pirolenhoso diretamente nas folhas das plantas como um spray foliar. Devem ser realizados testes para determinar a taxa ideal de diluição e aplicação.
 - Faça peletização de sementes com biochar com pH ajustado.
 - Use biochar como substrato em telhados e paredes verdes de edifícios.

INTRODUÇÃO

Os biochars podem ser aplicados de várias maneiras em diferentes culturas e solos. Para cada combinação de tipo de solo, planta e clima, há uma taxa de aplicação, um tipo de biochar, um tipo de fertilizante e uma relação biochar/fertilizante ideais para maximizar o rendimento e a lucratividade. Este capítulo fornece algumas diretrizes que o ajudarão a obter os melhores benefícios do ponto de vista financeiro, da planta e do solo ao aplicar aditivos à base de biochar para melhorias na agricultura ou na horticultura. Os métodos básicos são delineados e ilustrados em sete estudos de caso: produção de cacau, trigo de plantio direto, vinhedos, aplicação líquida em pastagens, sementes revestidas com biochar telhados verdes e pequenos jardins urbanos.

As informações se baseiam nas experiências dos autores, na literatura publicada e em conversas com agricultores que usam biochar há muitos anos.

DIRETRIZES PARA APLICAÇÃO DE BIOCHAR NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA

Com base no material apresentado nos capítulos anteriores, aprendemos que a eficácia do biochar pode ser bastante aprimorada se ele for combinado com fertilizantes como fonte de nutrientes – nos referimos a essa mistura como fertilizante composto de biochar ou BCF. O biochar também pode ser temperado com uma mistura de minerais e matéria orgânica, como esterco, para formar complexos biochar-organo minerais (BOMC) aprimorados. Os capítulos anteriores nos permitem delinear algumas diretrizes importantes para a aplicação desses aditivos à base de biochar.

Misture biochar e fertilizante

É melhor misturar o fertilizante (seja mineral, NPK ou orgânico) e o biochar e deixar a mistura descansar por pelo menos uma semana antes da aplicação. Isso facilita o processo de adsorção de nutrientes na superfície do biochar e nos poros, resultando em uma melhor ligação. Ao adicionar matéria orgânica ao biochar, deixe a mistura reagir por três a quatro semanas. Isso dá tempo para que os microrganismos promotores de crescimento aumentem em abundância e cubram o biochar com compostos orgânicos, que têm uma alta capacidade de troca de cátions e de ânions. Isso, por sua vez, reduz a competição entre o biochar e as plantas por nutrientes, reduz a

lixiviação de nutrientes para longe da zona da raiz das plantas e aumenta o fornecimento e a duração dos nutrientes e da água liberados no tempo para as plantas, garantindo que elas tenham nutrientes e água disponíveis durante todo o seu desenvolvimento.

Seguir os padrões de conteúdo de nutrientes

Um fertilizante composto de biochar feito com biochar + minerais + fertilizante químico deve ser aplicado ao solo em taxas de aplicação semelhantes às práticas usuais do agricultor ao usar um fertilizante químico puro. É importante seguir as diretrizes fornecidas pelo fabricante do BCF para obter a taxa e local de aplicação do produto. Se não houver diretrizes, devem ser realizados testes para determinar a taxa de aplicação e a proporção de biochar em relação aos nutrientes que proporcionem o maior retorno sobre o investimento (consulte o Capítulo 11). A quantidade ideal de um biochar específico a ser colocado na rizosfera depende das propriedades do solo, do tipo de planta e do fato de o biochar ter sido incorporado com nutrientes. Se a quantidade de nutrientes for muito pequena, o biochar poderá competir com as plantas por nutrientes, afetando o crescimento das plantas.

O método detalhado para estimar a possível taxa ideal será desenvolvido em nossa próxima publicação. Recomendamos que todos os agricultores façam testes variando as taxas de aplicação em pequenas parcelas antes de adicionar biochar em toda a plantação.

Evitar a dispersão aérea e a perda de biochar por erosão

A aplicação de biochar fino e seco ou de misturas de biochar na superfície do solo causa dispersão aérea e pode causar a perda dos seus benefícios que serão levados pela erosão do vento e da água. Se estiver aplicando biochar seco, aplique-o sempre incorporado ao solo. A poeira pode ser controlada umedecendo-se o biochar fino ou as misturas de biochar e fertilizante e aplicando-os úmidos ou como uma pasta na superfície, seguidos do preparo do solo. Outro método é granular ou peletizar um BMO ou um BCF e aplicá-lo nessa forma. Ao fazer o pós-tratamento e a aplicação do biochar, use sempre equipamentos de proteção de segurança, conforme recomendado pelas normas locais.

Aplique biochar na futura zona de raiz da planta

Quando formulados adequadamente, os biochars podem ser aplicados junto com a maioria dos tipos de sementes sem efeitos adversos na germinação e no crescimento inicial. A experiência e a pesquisa indicam que a aplicação de pequenas quantidades de biochar (<500 kg/ha) com nutrientes quando a cultura está sendo semeada maximizará o rendimento e a lucratividade. Para serem mais eficazes, o biochar e o fertilizante precisam ser colocados ao redor da semente, na futura zona radicular, de modo que, após a germinação, as raízes jovens encontrem o biochar e os nutrientes, conforme ilustrado na Figura 8.1. A distância para colocar o biochar da semente depende da taxa de liberação dos nutrientes (especialmente o nitrogênio), das propriedades do solo e de como as raízes se proliferam a partir da semente em germinação. Uma distância nominal sugerida é de 10 a 50 cm. Se estiverem sendo usados grânulos ou pellets de BCF, coloque-os de acordo com a recomendação do fabricante do fertilizante químico ou orgânico. Se estiver usando um biochar puro, espalhe-o em um sulco de 2 a 5 cm de largura e, no caso de plantas com raízes rasas, coloque a semente 2 a 5 cm acima da camada de biochar. À medida que a planta cresce, as raízes, as bactérias e os fungos acessam os nutrientes que foram absorvidos pelo biochar puro ou pelo BCF (Figura 8.2).

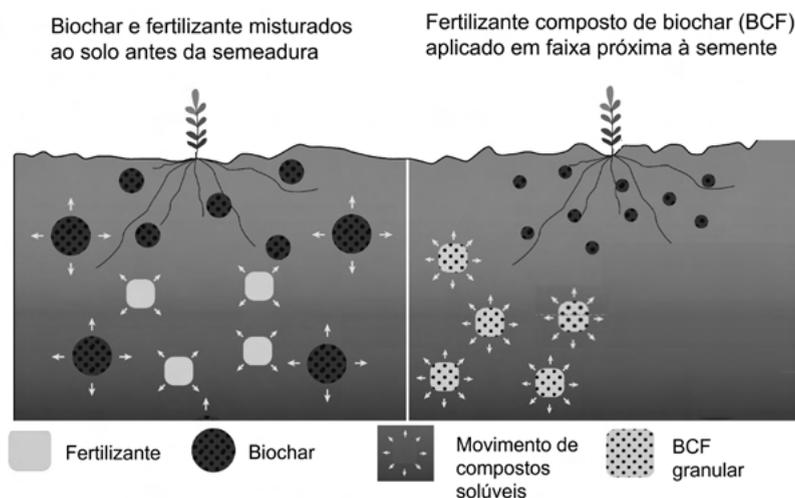


Figura 8.1 – Dissolução inicial do biochar e interações com as mudas, para dois modos de aplicação do biochar. **À esquerda:** Biochar e fertilizante aplicados juntos e misturados no solo antes da semeadura. **À direita:** Fertilizante composto de biochar (BCF), que compreende biochar misturado com fertilizante, minerais e um aglutinante, granulado e aplicado ao solo como uma faixa próxima à semente. (Adaptado de Joseph.)¹

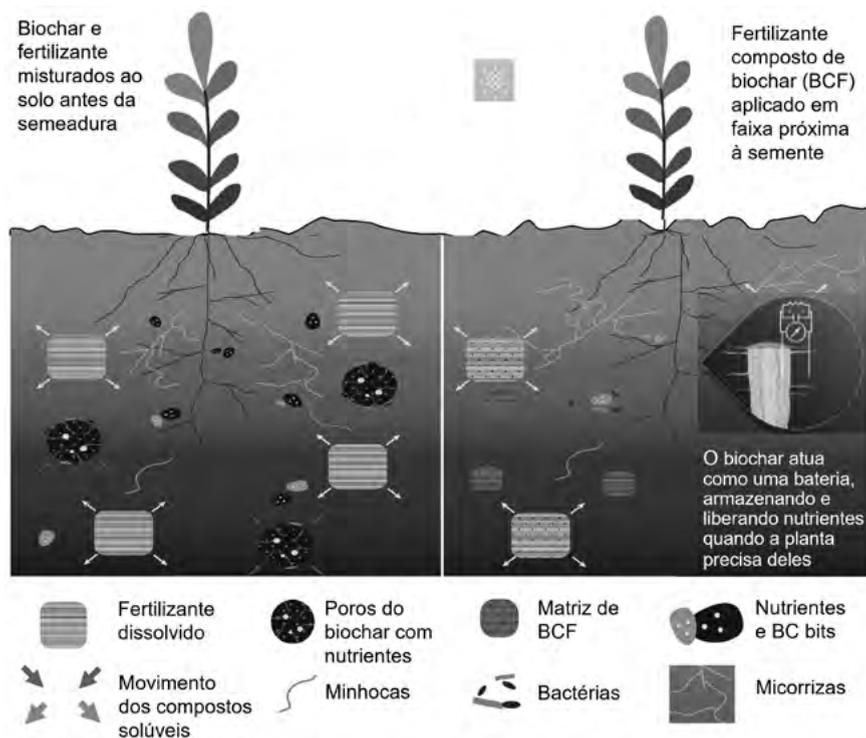


Figura 8.2 – Um estágio posterior de interação do biochar com o solo, a biota do solo e as plantas em crescimento, para dois modos de aplicação do biochar. **À esquerda:** Superfícies reativas se desenvolvem no biochar. **À direita:** O fertilizante é lixiviado do fertilizante composto de biochar (BCF), deixando uma matriz de carbono durável com superfícies ativadas. BC = biochar (Adaptado de Joseph).¹

Aplicação de biochar a cada ciclo de cultivo

Embora os benefícios específicos para o solo, a planta e o meio ambiente possam ser apoiados por grandes aplicações únicas de biochar, a experiência de campo indica que, em geral, é mais econômico aplicar pequenas emendas de biochar a cada ciclo de cultivo (consulte os estudos de caso). Isso pode proporcionar a combinação ideal de aumento de rendimento, resistência a doenças, saúde do solo e benefícios de redução de carbono, e pode ser integrado à prática de fertilização existente do agricultor. As taxas de aplicação de biochar e fertilizantes podem ser reduzidas após o segundo, terceiro ou quarto ciclo de cultivo, à medida que o biochar se acumula e envelhece, tornando os nutrientes mais disponíveis e aumentando a abundância de

microrganismos que promovem o crescimento.² Dessa forma, os benefícios de longo prazo decorrentes das altas taxas de aplicação, como a melhoria das propriedades físicas e químicas do solo e os níveis de sequestro de carbono, são acumulados ao longo do tempo à medida que o biochar se acumula no solo, enquanto o agricultor recebe um retorno anual sobre o investimento em biochar. Tanto os benefícios de curto prazo quanto os benefícios acumulados de longo prazo são ampliados pelo processo de envelhecimento que ocorre à medida que o biochar interage com o solo.

Otimize as taxas de aplicação para obter benefícios e lucratividade para a planta

A resposta das plantas, as mudanças nas propriedades do solo e a lucratividade associada a determinados biochars dependem da quantidade de biochar aplicada. A Figura 8.3 ilustra como, em muitos casos, a resposta aumenta com o aumento da dose de biochar somente até certo ponto e depois se limita ou se inverte (levando a curvas em forma de U invertido). Taxas de aplicação suficientemente grandes podem até resultar em respostas negativas. A resposta aos efeitos de mitigação de doenças e de promoção do crescimento do biochar pode ser otimizada com diferentes taxas de aplicação de biochar. A Figura 8.3 mostra uma curva de resposta a doenças com seu máximo em uma taxa de aplicação mais baixa do que o máximo de resposta ao crescimento, seguindo a interação do biochar A com a planta, o solo e outros fatores. O caso B mostra o crescimento máximo ocorrendo primeiro e a resposta máxima à doença deslocada para uma taxa de aplicação mais alta.

A rentabilidade máxima pode ocorrer em uma taxa de aplicação diferente de qualquer uma dessas, devido a uma variedade de fatores. Ela pode ser menor do que a ideal para rendimento e resistência a doenças, devido ao custo do biochar (Biochar A), ou pode estar entre elas (Biochar B). Pode até mesmo ocorrer em uma taxa de aplicação mais alta (Biochar C).

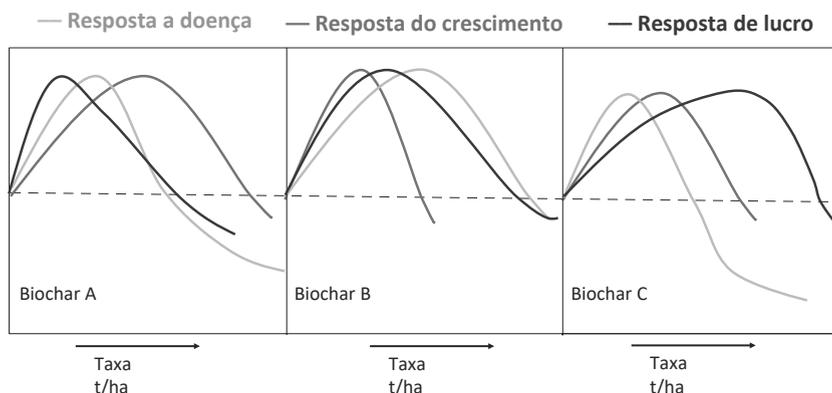


Figura 8.3 – Ilustração conceitual das mudanças no rendimento, na resistência a doenças e na lucratividade após a adição de diferentes biochars. Os máximos do crescimento, da resposta a doenças e da lucratividade podem ocorrer em diferentes taxas de aplicação. (Modificado de Jaiswal et al.)³

Ponto principal

O rendimento máximo, a resistência a doenças e a lucratividade podem ocorrer com diferentes taxas de aplicação de biochar. Como normalmente há restrições orçamentárias, devem ser realizados testes para determinar as taxas ideais para atingir o objetivo desejado.

MÉTODOS DE APLICAÇÃO

A aplicação de biochar no solo, isoladamente ou em conjunto com aditivos como composto, adubos ou resíduos de culturas, oferece benefícios de longo prazo sem necessariamente exigir reaplicação frequente. No entanto, é provável que a maneira mais eficaz e sustentável de usar o biochar seja integrando seu uso às práticas sazonais de correção agrícola. Portanto, é essencial garantir que a aplicação do biochar seja econômica e não contribua para a toxicidade do solo ou para impactos ambientais negativos. O texto a seguir foi extraído do livro *The Biochar Revolution*⁴ e da publicação do IBI *Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems*.⁵

Sistemas de produção convencional

Em sistemas convencionais de cultivo de campo, o biochar pode ser gerenciado e incorporado às operações de rotina do campo usando maquinário agrícola padrão. Essa abordagem ajuda a minimizar os custos. Por exemplo, como calcário é frequentemente aplicado como um sólido fino, que deve ser bem incorporado ao solo, o biochar pode ser aplicado e incorporado junto com o calcário. Da mesma forma, o biochar pode ser aplicado com aditivos orgânicos, como o esterco.

Aplicação em cobertura

A cobertura refere-se à aplicação de biochar diretamente na superfície do solo e é um método de aplicação normalmente empregado para culturas estabelecidas. Esse método apresenta um risco maior de perdas por erosão eólica e hídrica. Para resolver esses problemas, várias medidas podem ser tomadas: garantir que o biochar esteja adequadamente umedecido e não seja excessivamente fino; considerar misturá-lo com outros aditivos orgânicos ou minerais; granular ou peletizar o biochar; aplicá-lo em terrenos planos cobertos por vegetação densa; ou utilizar técnicas de cobertura morta em combinação com a aplicação do biochar.

Mistura uniforme à camada superficial do solo

Esse processo geralmente ocorre após a preparação inicial do solo e antes do plantio da cultura. O biochar sólido, umedecido para evitar poeira, é inicialmente espalhado uniformemente pela área de aplicação usando um espalhador (um espalhador de esterco pode ser mais adequado do que um espalhador de calcário para o biochar umedecido). O biochar também pode ser aplicado como uma pasta, por exemplo, misturado com esterco líquido. Posteriormente, o biochar é incorporado ao solo por meio de enxada manual, enxada rotativa, disco ou cinzelamento. A escolha do método mais adequado depende das condições do solo e dos recursos agrícolas disponíveis. A aplicação uniforme é particularmente adequada para o estabelecimento de gramados, campos de golfe, campos esportivos e paisagismo geral após a construção.

Aplicação em covas de plantio

A aplicação em covas de plantio individuais utiliza o biochar de forma eficiente e minimiza as perdas por erosão. Essa técnica é útil ao estabelecer pomares ou plantações de árvores.

Sulcagem

Na agricultura mecanizada, a aplicação de sementes e fertilizantes em sulcos é uma prática comum. Isso envolve a aplicação de um aditivo em uma faixa estreita usando um equipamento que corta o solo com pouca perturbação na superfície do solo. O biochar pode ser aplicado em sulcos de várias profundidades, manualmente ou com maquinário. A aplicação em faixas profundas garante uma cobertura completa do biochar com o solo, minimizando as possíveis perdas após a aplicação. A aplicação de faixas permite que o biochar seja colocado dentro do solo próximo a culturas ou árvores já estabelecidas. Além disso, a aplicação de faixas é eficaz para novos plantios, nos quais as sementes ou mudas são plantadas ao lado ou acima de uma faixa de biochar, garantindo que as raízes em crescimento encontrem o biochar.

Mistura de biochar com outros aditivos sólidos ou líquidos

A mistura de biochar com outros corretivos do solo, como adubo, composto, gesso ou cal, antes da aplicação no solo, pode aumentar a eficiência ao reduzir o número de operações de campo necessárias. Como foi demonstrado o biochar absorve nutrientes e os protege contra a lixiviação, a mistura com biochar pode aumentar a eficiência da aplicação de adubo ou de outros corretivos. O biochar pode ser misturado com adubos líquidos e aplicado como uma pasta, aliviando os problemas de poeira e obtendo uma aplicação eficaz de misturas bem combinadas. Os biochars finos são adequados para esse tipo de aplicação usando o equipamento de aplicação existente. O biochar misturado com adubos em tanques de retenção pode reduzir as perdas de nitrogênio gasoso. Pulverizadores eletrostáticos têm sido usados para aplicar inoculantes.

Sistemas inovadores de aplicação

O desenvolvimento do plantio direto e de outros métodos sustentáveis e regenerativos de agricultura está impulsionando a inovação em métodos e equipamentos de correção para reduzir o escoamento, a perda de nutrientes, o odor (do uso de corretivos orgânicos, como esterco de aves) e o custo.

Injeção de subsolo e sulcagem

A aplicação de faixas no subsolo pode envolver a criação de um sulco, a adição de biochar e composto e, em seguida, a cobertura com solo. A injeção de um biochar líquido ou de uma pasta de biochar-composto-esterco no subsolo resulta em menos perturbação e foi pesquisada pela Universidade de Latrobe (Peter Sale, comunicação pessoal). O equipamento para semeadura a disco ou plantio direto pode ser usado para abrir o solo e criar leitos de sementes e cavidades para injetar uma pasta de biochar (Figura 8.4). Os possíveis efeitos colaterais negativos da abertura do solo, como a perda de água do solo, a dessecação do leito da semente e das mudas e a queima dos brotos e raízes das mudas por causa dos fertilizantes concentrados, podem ser bastante atenuados pela injeção de biochar líquido na cavidade. A abertura combinada do disco e do dente alado é fechada após o corte e a injeção, minimizando, assim, os efeitos colaterais.⁶ Várias empresas desenvolveram sistemas para aplicar misturas de composto-biochar e esterco-biochar no subsolo na forma de sólidos, pastas ou líquidos (Figura 8.4).

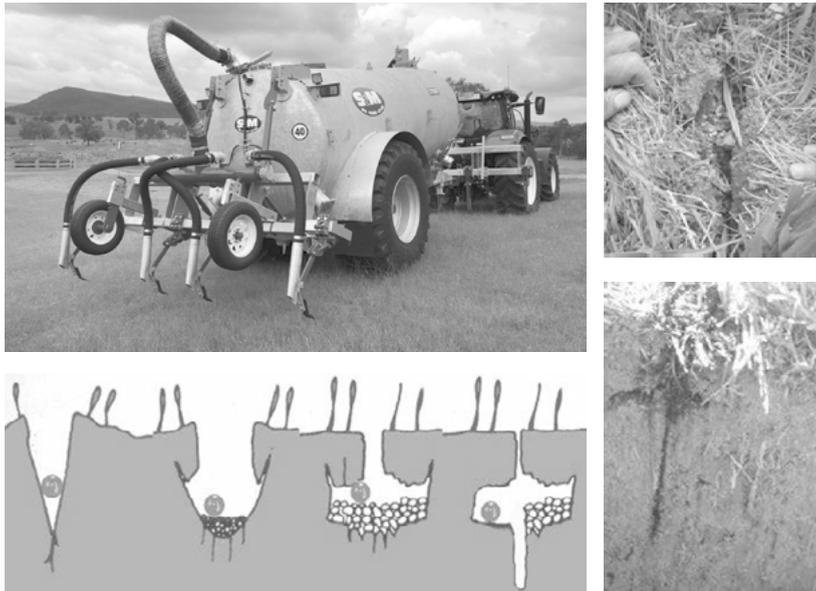


Figura 8.4 – Parte superior esquerda: equipamento de injeção em subsolo. **Parte inferior esquerda:** diferentes formatos de cavidades de semente e de suspensão no solo, produzidas por (da esquerda para a direita): semeadora de disco duplo, semeadora de enxada, semeadora tipo Baker Boot e implemento combinado de haste alada e disco. **À direita:** visão superior e em perfil do solo, mostrando a suspensão de biochar ocupando tanto as prateleiras horizontais do leito de semeadura quanto o corte vertical do disco. (Graves⁶)

Aplicações líquidas de biochar e extrato pirolenhoso

Os fertilizantes líquidos à base de biochar podem ser aplicados nos campos antes ou depois da semeadura, ou injetados no solo próximo às plantações, com o mínimo de perturbação do pasto ou da plantação. Após o estabelecimento de uma cultura ou pastagem, o fertilizante líquido de biochar ou o extrato pirolenhoso de baixa temperatura podem ser aplicados em superfície, foliar, ou ambos.

O extrato pirolenhoso também pode ser aplicado no solo ou por pulverização foliar, sendo que a escolha depende da praga ou da restrição que está sendo visada. As empresas vendem aplicações líquidas e sprays foliares que contêm biochar como um dos ingredientes. Os fertilizantes líquidos são aplicados a 200-500 kg/ha e os sprays foliares de extrato aquoso de biochar e extrato pirolenhoso a 10-20 kg/ha em taxas de diluição de 50-200 vezes. As aplicações desses produtos estão ilustradas na Figura 8.5.



Figura 8.5 – À esquerda: Aplicação de biochar líquido usando um aplicador específico.⁸ **À direita:** Aplicação de biochar líquido filtrado e produtos de extrato pirolenhoso. Pulverização foliar a baixas taxas de aplicação (<50 kg/ha). **À esquerda:** Um produto de biochar-alginato da Carence. **À direita:** Extrato pirolenhoso da Green Man Char.

Aplicações específicas de biochar na agricultura de precisão

Conforme já discutido, o biochar é mais bem direcionado para a zona radicular das plantas, por exemplo, por meio de faixas ou adição a covas de plantio. Quando há dados de alta resolução sobre as características do solo e máquinas agrícolas equipadas com sistemas de posicionamento geográfico, é possível direcionar o biochar preferencialmente para áreas de campo onde a fertilidade é baixa. Isso pode aumentar a eficácia do custo-benefício da aplicação do biochar em uma iniciativa regenerativa; o biochar geralmente proporciona os maiores benefícios em solos pobres.

Emprego de animais para aplicar o biochar

Os animais podem ajudar a mover o biochar para o perfil do solo da pastagem existente sem perturbar a superfície. Com cuidado em relação aos problemas de erosão do vento e do solo, o biochar tem sido aplicado com sucesso em pastagens perenes e espaços com vegetação entre árvores frutíferas em pomares sem perdas significativas de biochar. Posteriormente, observou-se que as minhocas incorporaram o biochar ao solo. Um dos métodos mais inovadores tem sido alimentar o gado com biochar, juntamente com a incorporação feita pelo besouro rola-bosta em pastos. Os animais ativam o biochar e os besouros rola-bosta o incorporam profundamente ao perfil do solo. Isso é discutido em detalhes nos Capítulos 9 e 10. O biochar também pode ser fornecido às galinhas e a outros animais criados livres para espalhar o biochar e o esterco.

Plantio de árvores e remediação de árvores estabelecidas

O biochar deve ser aplicado nas áreas do solo das quais as raízes da árvore absorverão os nutrientes à medida que elas crescem. Em última análise, essa área é a linha de gotejamento da árvore adulta. Inicialmente, o biochar pode ser aplicado na cova de plantio ou em faixas ao redor ou abaixo das raízes da árvore. No entanto, isso pode desestimular o avanço das raízes em um solo inóspito. Para corrigir esse problema e tornar o plantio da árvore mais seguro, o biochar pode ser instalado em trincheiras que partem da árvore, em trincheiras circulares ou em várias covas ao redor da árvore e, em seguida, coberto com solo. Ferramentas de escavação com ar ou água têm sido usadas para fazer o mesmo na remediação de árvores urbanas.

Paisagismo, jardinagem, gramados e aplicações urbanas

Durante o paisagismo, a construção e o estabelecimento do gramado, biochar pode ser aplicado em camadas funcionais sob a zona da raiz ou a zona de construção, para retenção de umidade, drenagem, resistência à compactação, profundidade do solo, captura de nutrientes e toxinas e redução de fertilizantes. O biochar foi aplicado em orifícios de aeração de gramados, atingindo taxas de aplicação de até 5,4 t/ha. Essas qualidades do biochar, juntamente com sua baixa densidade, fazem dele um substrato ideal para telhados e paredes verdes. A adição de 10% de biochar à cobertura morta aplicada hidraulicamente com sementes e fertilizantes na forma de hidro-semeadura, tem sido usada para estabelecer gramados e estabilizar margens de estradas. Essa adição melhora o estabelecimento e o crescimento de gramináceas em solos pobres.

Gerenciamento de bacias hidrográficas e recuperação de áreas degradadas

O biochar pode ajudar a estabelecer a vegetação em solos degradados e, ao mesmo tempo, adsorver uma variedade de metais pesados e outras toxinas. Nesses casos, o biochar pode ser aplicado em trincheiras e minas de exploração de carvão mineral ou em faixas próximas a cursos d'água para combinar remediação, captura de nutrientes e toxinas, promoção microbiana. O biochar também tem sido aplicado para aumentar a retenção de umidade sob culturas de cobertura em vinhedos e em culturas de campo.

ESTUDOS DE CASO

Esta seção contém seis estudos de caso que ilustram algumas das diretrizes e métodos descritos nas seções anteriores. O Capítulo 10 apresenta outros estudos de caso conduzidos no Brasil que descrevem diversas aplicações de biochar na agricultura.

Estudo de caso 1: Aplicação na zona da raiz de fertilizantes à base de biochar

Meyer et al.⁹ investigaram os efeitos de diferentes métodos de aplicação de fertilizantes à base de biochar (BBFs) nas zonas de raízes de plantas jovens de cacau cultivadas em um oxisol. Os oxisois são solos altamente intemperizados, ácidos e deficientes em fósforo.

Os pesquisadores compararam quatro alterações: biochar isolado (BC), fertilizante mineral (NPK), fertilizante à base de biochar e fertilizante fermentado à base de biochar. Os fertilizantes à base de biochar foram produzidos pela combinação de biochar com um fertilizante foliar e água deionizada. O fertilizante fermentado à base de biochar foi criado pela redução do pH do biochar por meio da fermentação láctica. Foram testados três métodos de aplicação na zona radicular: aplicação na camada superior do solo, aplicação na zona radicular em camadas e aplicação na zona radicular em pontos críticos (Figura 8.6).

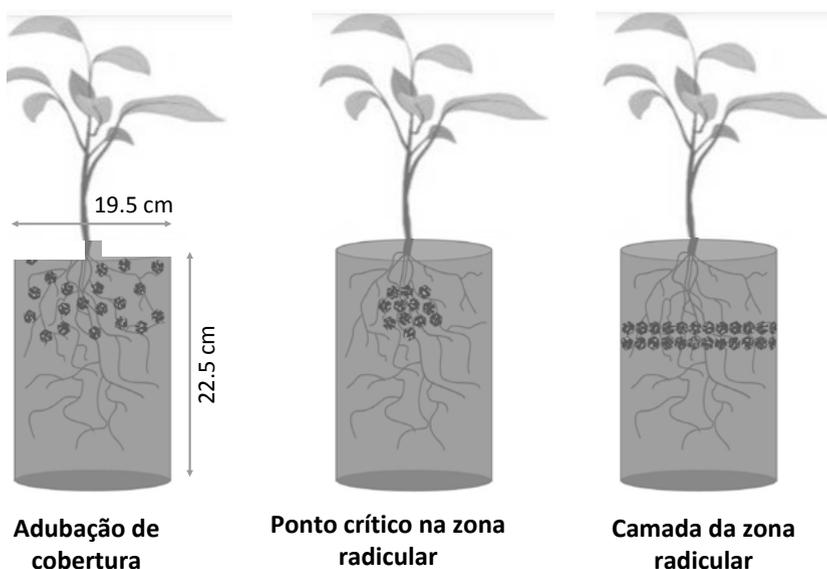


Figura 8.6 – Três métodos de aplicação de biochar. Em cada caso, o aditivo foi colocado antes do plantio da muda, e as raízes da planta cresceram dentro e através do aditivo (Modificado de Meyer et al.)⁹

A aplicação de fertilizante à base de biochar na camada da zona radicular foi o método mais eficaz para melhorar o crescimento das plantas de cacau. Os resultados da biomassa aérea (Figura 8.7), da área foliar total e do teor de clorofila mostraram as mesmas tendências, com aumentos de 56%, 222% e 140%, respectivamente, em comparação com a prática comum do agricultor de aplicação na superfície do solo. Além disso, os níveis de fósforo nas plantas aumentaram em 53% e a relação N:P no tecido foliar melhorou, indicando melhor disponibilidade de fósforo.

Em contrapartida, o biochar sozinho (sem fertilizante) não produziu melhorias significativas no crescimento das plantas. No entanto, quando usado como parte de um fertilizante à base de biochar, mesmo em pequenas doses (16 g/planta ou 0,3% p/p de concentração do solo na zona da raiz), o biochar demonstrou ser benéfico em melhorar as limitações de fósforo e aprimorar a nutrição das plantas.

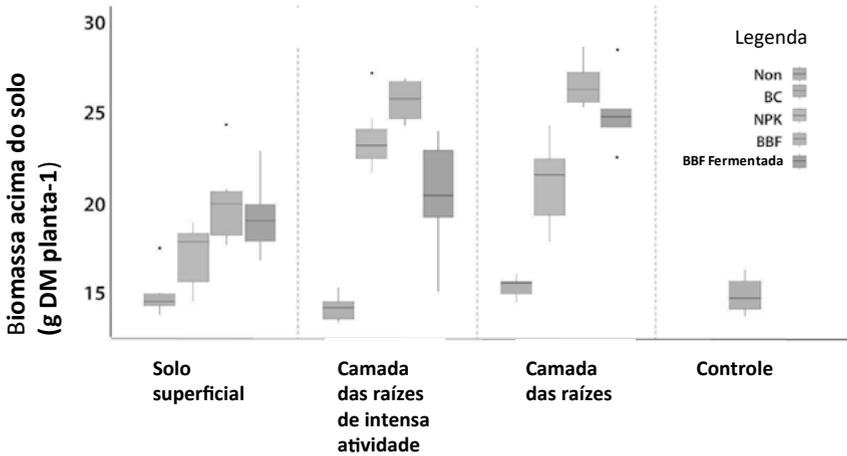


Figura 8.7 – Biomassa aérea de ensaios em vasos de quatro corretivos aplicados por três diferentes métodos mudas de cacau em solos pobres do tipo Oxisol. BBF = fertilizantes à base de biochar; BC = biochar; DM = matéria seca (Modificado de Meyer et al.)⁹

Estudo de caso 2: Biochar com NPK em plantio direto de trigo

As taxas de aplicação de biochar e outros aditivos podem afetar o rendimento da safra e o retorno para o agricultor. A South Australia No-Till Farmers Association (SANTFA) realizou testes em que injetou diferentes proporções de biochar de cama de frango e fosfato de diamônio (DAP) abaixo da semente de trigo (Figura 8.8, Figura 8.9)¹⁰. A aplicação de 100 kg/ha de fosfato diamônico (DAP) com 35 kg/ha ou 100 kg/ha de biochar de cama de aviário (T6, T7) proporcionou os maiores rendimentos de trigo; no entanto, o maior aumento nos lucros para o agricultor ocorreu quando uma taxa de aplicação de apenas 50 kg/ha de DAP foi combinada com 35 kg/ha de biochar (T3), com preço de US\$ 500/tonelada. Notavelmente, o trigo que recebeu 50 kg/h de DAP sozinho (T2), ou 35 ou 100 kg/ha de biochar sozinho (T8, T9), não apresentou aumentos significativos em relação aos outros tratamentos (T1).

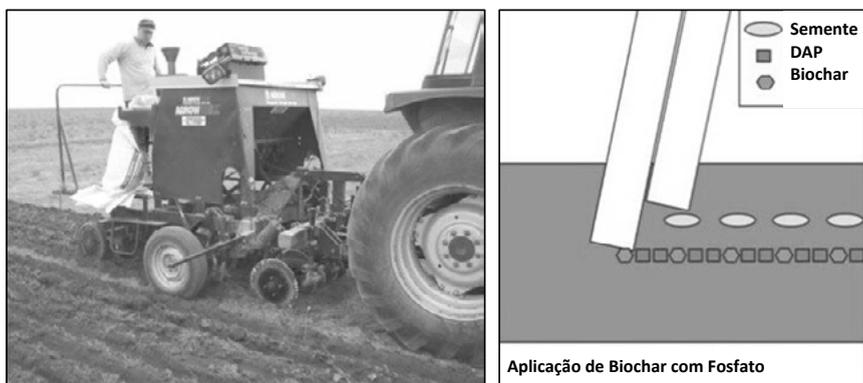


Figura 8.8 – Método de semeadura de biochar e fosfato de diamônio sob sementes em plantio direto de trigo. DAP = fosfato diamônico (Cortesia de Greg Butler, SANTFA).¹⁰

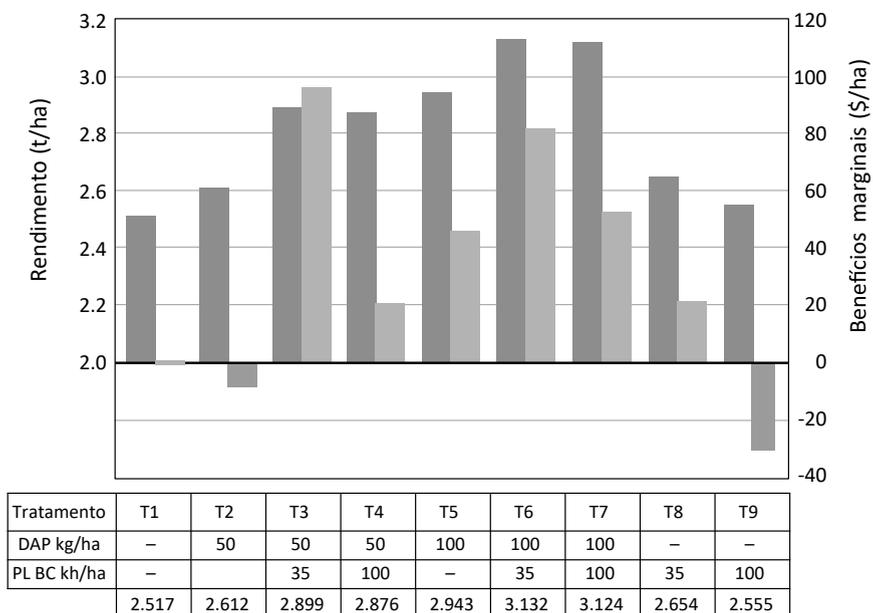


Figura 8.9 – Rendimentos (em cinza escuro ascendentes) e benefícios marginais (em cinza claro ascendentes ou descendentes) da semeadura com biochar e fosfato diamônico sob as sementes em plantio direto de trigo, para combinações de DAP/BC. BC = biochar; DAP = fosfato diamônico; PL BC = biochar de cama de aviário. (Adaptado de dados cortesia de Greg Butler, SANTFA).¹⁰

Resultados semelhantes foram relatados para a aplicação de biochar em faixas com DAP usando o equipamento de plantio por perfuração (Figura 8.10) e taxas mais altas de aplicação de biochar.¹¹ O biochar foi aplicado em uma concentração de 7,5 t/ha em faixas profundas e estreitas ao longo das linhas. Considerando o espaçamento entre as linhas, isso equivale a um uso de 1,5 tonelada por hectare. É interessante notar que a combinação de 1,5 t/ha de biochar de palha de trigo com o uso de baixo DAP de 25 kg/ha foi possivelmente a combinação mais favorável, proporcionando melhor rendimento (e, portanto, lucro) do que o biochar de palha de trigo em níveis mais altos de DAP, melhor rendimento do que o biochar de cama de frango em baixo DAP e rendimentos quase iguais aos do biochar de cama de frango em níveis mais altos de DAP.

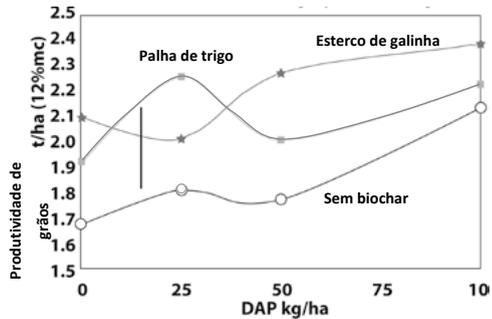


Figura 8.10 – Rendimento de grãos após a aplicação de biochar de palha de trigo ou biochar de esterco de galinha a 1,5 tonelada por hectare com diferentes taxas de aplicação de fosfato diamônico (DAP).¹¹

Estudo de caso 3: Biochar com composto em vinhedos

Em resposta às secas da Califórnia, um teste de vários anos foi realizado entre 2016 e 2021 na Califórnia para determinar como diferentes tratamentos de biochar de madeira, composto e uma combinação dos dois poderiam melhorar a eficiência da água e a produção e qualidade da safra em um vinhedo recém-plantado.^{12,13} O teste foi realizado em Oasis Vineyard, King City, Califórnia, em um solo arenoso com 0,7% de matéria orgânica.

O biochar (fornecido pela Pacific Biochar a US\$ 240/t entregue) foi produzido a partir de resíduos florestais de madeira macia, pirolisados a 750 °C. Em uma base seca, ele tinha matéria orgânica de 74,5% e teor de cinzas de 25,5%. O composto foi descrito como uma mistura de resíduos

de cogumelo, biomassa verde e bagaço de uva com 42,5% de matéria orgânica e 57,5% de cinzas (base seca). A mistura de composto e biochar foi misturada em uma leira de compostagem e deixada para compostagem adicional por um mês para permitir que os nutrientes e a biologia se desenvolvessem no biochar.

O teste replicado incluiu os quatro tratamentos diferentes mostrados na Tabela 8.1. Para o controle, nenhum composto ou biochar foi adicionado.

Tabela 8.1 – Quatro combinações de biochar e composto aplicadas em vinhedos na Califórnia. % SOM é a adição direta calculada de matéria orgânica ao solo.

Tratamento	Composto, t/acre		Biochar, t/acre		% SOM
	Úmido	Seco	Úmido	Seco	
Controle					0
Composto	15	7.7			0.3%
Biochar			10	6.2	0.42%
Composto+biochar	15	7.7	10	6.2	0.7%

A aplicação de cada tratamento envolveu a abertura profunda de uma vala guiada por GPS na fileira de videiras na qual os corretivos foram aplicados. Uma segunda passagem com um arado de asas misturou os aditivos no solo, formando uma faixa de aproximadamente 60 cm de largura e 75 cm de profundidade (Figura 8.11). As videiras foram colocadas a 1,5 m de distância uma da outra, resultando em cerca de 0,7 m³ de solo cultivado e adubado por planta. Cada parcela de 0,5 acre (aproximadamente 2000 m²), foram replicados quatro vezes em um ensaio de blocos ao acaso. Todos os tratamentos receberam o mesmo regime de irrigação e fertilizante NPK. As frutas de cada tratamento foram colhidas anualmente e os rendimentos comparados aos do controle e dos anos anteriores para destacar o melhor tratamento para a produção agrícola. A contagem de cachos, o peso da poda, a qualidade dos frutos, o vigor da videira, a saúde do solo e o teor de umidade também foram monitorados em alguns anos.



Figura 8.11 – Aplicação de corretivos de solo em um vinhedo na Califórnia, sulcos profundos para o plantio das leiras de videiras, deixando um sulco no solo no qual os corretivos foram aplicados. Em seguida, os corretivos foram misturados com o solo a uma profundidade de três pés (aproximadamente 90cm) pela segunda passagem do sulcador e cobertos para formar leiras de plantio.¹³

A mistura de biochar e composto produziu o maior rendimento, em comparação com os outros tratamentos e o controle, em todas as safras, exceto na primeira (Figura 8.12). No primeiro ano de produção, 2019, o biochar sozinho produziu o maior rendimento; no entanto, observou-se que o vigor da videira era mais alto na parcela do tratamento com a mistura de biochar e composto, o que parece ter preparado o terreno para que ele se sobressaísse nas colheitas posteriores. Em 2021, os rendimentos foram prejudicados devido às condições climáticas ruins durante a floração e a frutificação. Nessa circunstância, o tratamento com mistura de biochar e composto mostrou seu valor, produzindo cachos maiores e em maior quantidade, resultando em um rendimento 24% maior do que o composto ou o biochar sozinho e 74% maior do que a prática padrão de NPK (o controle).

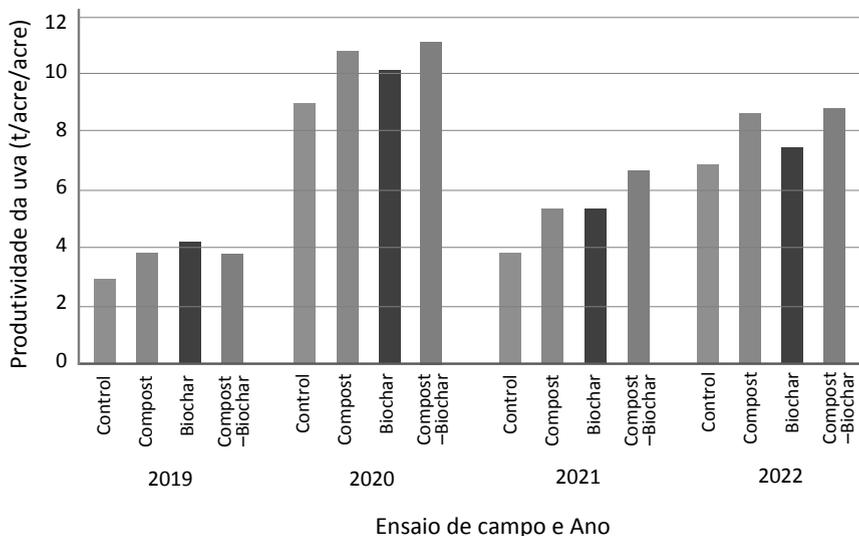


Figura 8.12 – Ganho em valores de produtividade de uvas por acre após a aplicação de biochar, composto e ambos em vinhedos em solo arenoso, King City, Califórnia, 2019-2022.¹³

Em termos de parâmetros de qualidade, o tratamento com biochar isolado produziu o maior aumento no volume e peso das bagas, açúcar, brix, antocianinas e taninos. Esses resultados indicaram a ausência de qualquer impacto negativo da aplicação de biochar e possíveis impactos positivos na qualidade da uva com a aplicação de formulações adequadas de biochar.

Os parâmetros do solo medidos em 2021, quatro anos após o início das alterações, mostraram melhorias substanciais. Notavelmente, os tratamentos com biochar se sobressaíram em relação ao composto sozinho em todos os indicadores do solo. Conforme mostrado na Figura 8.13a, os aumentos na matéria orgânica do solo medida em relação ao controle foram mais altos para a adubação com a mistura de biochar e composto (aumento de 0,4%), seguidos pelos de biochar (0,3%) e, depois, de composto (0,1%). Essa é a mesma ordem da quantidade de matéria orgânica adicionada ao solo (Tabela 8.1). A respiração do solo (indicando a biomassa microbiana total) e a liberação de nitrogênio orgânico seguiram esse mesmo padrão. Os tratamentos com biochar isolado, seguidos por biochar com composto, foram excelentes para aumentar o P extraível (Figura 8.13b), o carbono microbialmente ativo e o valor dos

nutrientes. As adições de composto foram importantes para a avaliação geral do solo, sendo que o melhor aumento na saúde do solo foi obtido com a adição da mistura de biochar e composto, seguida pela adição do composto sozinho.

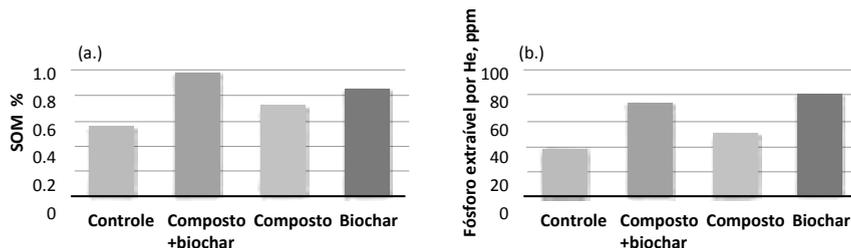


Figura 8.13 – Aumento da matéria orgânica do solo (SOM) e do P extraível após a aplicação de biochar, composto e ambos em vinhedos em solo arenoso, King City, Califórnia, 2019-2022.¹³

Um dos principais objetivos do estudo foi avaliar o efeito do biochar e do composto na economia de água. Todas as parcelas receberam a mesma irrigação, de modo que a maior produtividade das culturas nos solos corrigidos indicou maior eficiência no uso da água.

Os cálculos financeiros mostraram que, embora o composto sozinho fosse o mais econômico no curto prazo, o custo mais alto da mistura composto e biochar foi recompensado nos anos posteriores com uma renda maior, devido à capacidade do biochar de reter e regular a liberação de nutrientes do composto e ajudar a reter a água nos solos (Figura 8.14).

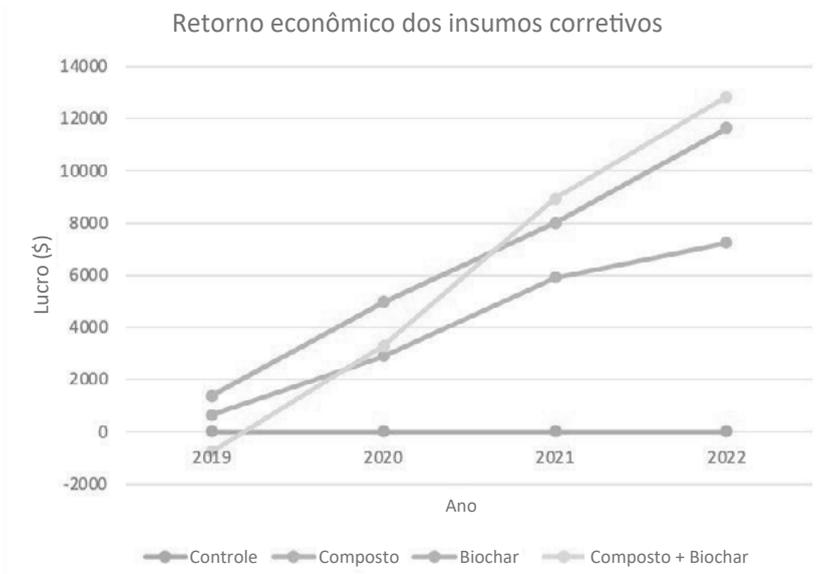


Figura 8.14 – Receita adicional acima dos custos (US\$/acre) para safras de uva após a aplicação de biochar, composto e ambos em vinhedos cultivados em solo arenoso, King City, Califórnia, 2019-2022.¹³

Estudo de caso 4: Peletização de sementes com biochar

O biochar pode revestir em alguns tipos de sementes (especialmente de gramíneas) com um aglutinante, como lignina ou bentonita (Figura 8.15). Os nutrientes também podem ser impregnados nos poros do biochar para ajudar na germinação das sementes e no crescimento das plantas. Essas sementes podem ser espalhadas manualmente ou com o uso de um avião ou trator, injetadas no subsolo usando semeadoras ou injetadas por um drone (Figura 8.16).

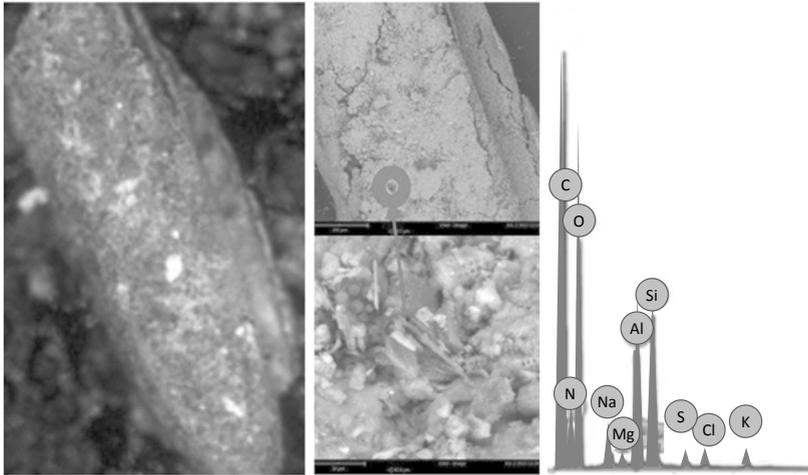


Figura 8.15 – À esquerda: Semente de grama Rhodes revestida com uma mistura de bentonita, diatomita e biochar. Ao centro: Imagem do microscópio eletrônico de varredura (MEV) do revestimento da semente mostrando pequenos pedaços de biochar ligados à bentonita e à diatomita. À direita: Análise de raios X do biochar indicando que ele tem alto teor de N e pequenas quantidades de Mg, Na, Cl, S e K. Modificado de Maraseeds.¹⁴



Figura 8.16 – Aplicação de sementes revestidas com biochar manualmente ou a partir de um avião (esquerda)¹⁵ ou a partir de um drone (direita).¹⁶

ESTUDO DE CASO 5: BIOCHAR EM TELHADOS VERDES

A baixa densidade e a alta capacidade de retenção de água e nutrientes do biochar o tornam ideal como substrato de crescimento para telhados e paredes verdes. Um estudo da Portland State University concluiu que os telhados verdes que continham 7% de biochar por peso no solo apresentaram retenção significativa de água e reduções na descarga de nitrogênio, fósforo e carbono orgânico.¹⁷ A retenção de água de até 100% foi relatada. O biochar também pode evitar a liberação de cobre, zinco e alumínio, que são frequentemente associados ao escoamento de telhados e paredes verdes. De modo geral, o biochar em telhados verdes pode melhorar a captação de água e a resiliência do telhado verde, além de reduzir a drenagem e melhorar a qualidade da água do escoamento em comparação com os telhados convencionais e os telhados verdes sem biochar. O biochar no solo não é facilmente combustível, portanto, a incorporação do biochar pode melhorar a resistência ao fogo proporcionada por um telhado verde adequadamente plantado e mantido. Um sistema de irrigação por aspersão ativada pelo fogo pode reduzir ainda mais o risco. Ao considerar telhados ou paredes verdes em áreas propensas a incêndios florestais, é importante confirmar se estes são permitidos dentro do nível de risco de incêndios florestais aplicável à propriedade de acordo com as normas locais.¹⁸

Um sistema simples usando biochar para aumentar a produção de plantas no topo de edifícios com telhados planos foi desenvolvido por Rob Lerner (Figura 8.17):

1. Construa canteiros com o material disponível, garantindo que as paredes dos canteiros sejam estanques; por exemplo, usando uma membrana elastomérica de vedação. A profundidade do canteiro pode variar de 400 mm a 1.000 mm, dependendo da profundidade de penetração das raízes.
2. Coloque cerca de 5 cm de pedra-pomes grossa ou algum outro meio altamente poroso no fundo do leito.
3. Instale um cano de água de 25 mm com fendas de 10 mm de comprimento cortadas a cada 20 mm ao longo do cano sobre a pedra-pomes. O tubo de água é conectado a um coletor.
4. Faça biochar a partir de material lenhoso em uma temperatura alta (cerca de 600 °C). Neste teste foi usado um forno de tambor TLUD.
5. Peneire o biochar em uma peneira de 1 cm e misture com os seguintes ingredientes:

Biochar	16%	Pedra-pomes vermelha	6%
Composto misto	9%	Pedra-pomes branca	6%
Composto para cogumelos	16%	Molde da folha	9%
Composto de minhocas	6%	Lodo de rio	6%
Estrume de cabra	9%	Casca de árvore decomposta	6%
Terra preta	9%		

- Coloque a mistura no canteiro e adicione biochar triturado na parte superior.
- Nas passarelas, foram instaladas pedras de pavimentação sobre um tapete de drenagem para levar a água.

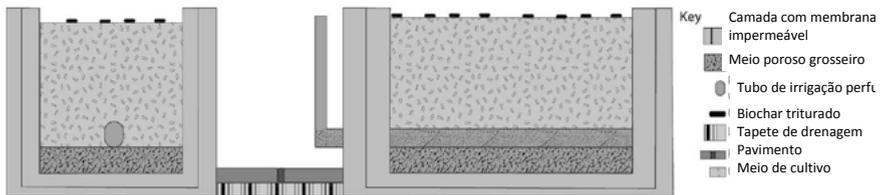


Figura 8.17 – Construção de um canteiro de cultivo no telhado.

ESTUDO DE CASO 6: JARDINS DE BIOCHAR EM ESPAÇOS PEQUENOS

Hermansyah Chen, trabalhando em vilarejos na Indonésia, desenvolveu jardins verticais produtivos à base de biochar usando bombonas plásticas recicladas (Figura 8.18). Passos para fazer esse jardim simplificado com biochar:

- Corte a parte superior de uma bombona plástica de 200 litros e, na lateral, use uma serra de cortes para fazer cinco fileiras de cortes retos de 12 cm de comprimento, com cinco cortes em cada fileira.
- Para moldar as caixas de cultivo em cada corte, faça uma cunha adequada com 9 cm de largura, 20 cm de comprimento e mais de 2 cm de espessura em uma extremidade.
- Aqueça a área ao redor do corte com um soprador de ar quente até que a área fique macia.

4. Insira a extremidade fina da cunha na fenda e, lentamente, crie a forma oval. Use um pano úmido para esfriar. Continue até que os 25 bolsos sejam moldados.
5. Pegue dois baldes de 20 litros e faça furos de 8 mm a cada 5 cm nas direções vertical e horizontal.
6. Junte os dois baldes. Na parte superior, adicione um tubo de enchimento com aproximadamente 125 mm de diâmetro.
7. Nas bombonas, coloque 10% de biochar (de preferência feito a partir de uma mistura de biomassa lenhosa, esterco e palha a temperaturas entre 400 °C e 600 °C) com 40% de minhocas e 40% de húmus ou solo florestal. Essa mistura heterogênea permitirá o cultivo de muitas plantas diferentes.
8. Encha os baldes do meio com resíduos vegetais e 2-5% de biochar de madeira, juntamente com minhocas.
9. Alimente as minhocas com restos de cozinha compatíveis.

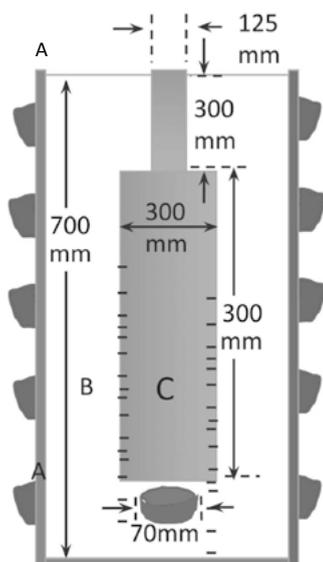


Figura 8.18 – Jardim de biochar em um espaço pequeno na Indonésia. **A:** Barril de plástico com bolsos moldados; **B:** Solo com biochar; **C:** Baldes centrais com restos de vegetais, minhocas e biochar.

CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou opções práticas para a aplicação de biochar (nas formas sólida ou líquida) no solo e como revestimento de sementes. Elas ilustram algumas abordagens adotadas em diferentes contextos e os tipos de resultados que podem ser obtidos. Algumas regras básicas foram delineadas para ajudá-lo a obter os melhores benefícios do ponto de vista da planta, do solo e financeiro. Conforme descrito, os biochars podem ser aplicados de várias maneiras em diferentes culturas e solos. O método, a taxa de aplicação e o tipo de biochar ou a combinação de biochar com fertilizante podem afetar o rendimento e a lucratividade. A taxa ideal para o rendimento pode ser diferente da taxa ideal para a lucratividade. Recomendamos que, sempre que possível, você experimente diferentes métodos de aplicação para identificar uma opção que minimize a mão de obra e maximize os benefícios financeiros e ambientais. Faça experimentos para desenvolver métodos que sejam adequados às práticas agrícolas e culturais locais, às restrições do solo e aos tipos de cultura. Por fim, ao aplicar o biochar, lembre-se de usar equipamentos de proteção de individual (EPIs), conforme recomendado pelas normas locais.



Referências

1. Joseph S. et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: Uma revisão dos mecanismos que controlam as respostas do solo e das plantas ao biocarvão. *GCB Bioenergy* 13:1731-1764 onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12885
2. Nielson S. et al. Crop-season and residual effects of sequentially applied mineral-enhanced biochar and N fertiliser on crop yield, soil chemistry and microbe communities. *Agriculture, ecosystems and environment (Agricultura, ecossistemas e meio ambiente)*. 255 52-61 doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.020
3. Jaiswal A.K. et al. (2014). Influência não monotônica da dose de biochar no crescimento de mudas de feijão e na suscetibilidade à *Rhizoctonia solani*: o “Shifted Rmax-Effect”. *Plant and Soil* 395:125-140 link.springer.com/article/10.1007/s11104-014-2331-2
4. Taylor P. (2010). *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment (A transformação da agricultura e do meio ambiente)*. NuLife Publishing.
5. Major J. (2010). Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems (Diretrizes sobre Aspectos Práticos da Aplicação de Biochar no Solo de Campo em Vários Sistemas de Manejo do Solo). (IBI); biochar-international.org/wp-content/uploads/2023/01/IBI_Biochar_Application.pdf
6. Graves D. (2012). A Comparison of Methods to Apply Biochar into Temperate Soils (Uma comparação de métodos para aplicar biochar em solos temperados). Capítulo do livro: *Biochar e Biota do Solo*, CRC Press.
7. Doyle Ag & Fabrication doyleag.com.au/portfolio-items/ibf3001-ibr3001-liquid-waste-soil-injector/
8. Lesco (2023). www.lesco.com
9. Meyer J. et al. (2022). Impact of Different Methods of Root-Zone Application of Biochar-Based Fertilizers on Young Cocoa Plants: Insights from a Pot-Trial. *Horticulturae* 222:328–342 doi.org/10.3390/horticulturae8040328
10. Greg Butler, SANTFA (s.d.) www.santfa.com.au/wp-content/uploads/Santfa-T-CE-Winter-14-Targeted-biochar-use-can-reduce-input-costs.pdf
11. Blackwell P. et al. (2010). Effect of banded biochar on dryland wheat production and fertiliser use in southwestern Australia: Uma perspectiva agrônômica e econômica *Australian Journal of Soil Research* 48:531-545 doi.org/10.1071/sr10014
12. Saling J. (2022). SCVTG AUG 11, 2022 Biochar in the Vineyard. *Vimeo* vimeo.com/738770545/fa1ecb256b
13. Sonoma Ecology Center (2021). Pilot Project for Using Biochar to Save Water in California Agriculture. Relatório científico final, 15 de dezembro de 2021.
14. Maraseeds (2023). www.maraseeds.com.au

15. www.seedballskenya.com/photos
16. airseedtech.com
17. Beck A. et al. (2011). Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. *Environmental Pollution* 159: 2111-2118 doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.022
18. Telhados e paredes verdes (n.d.) www.yourhome.gov.au/materials/green-roofs-and-walls#:~:text=While%20the%20soil%20bed%20could,as%20fuel%20during%20a%20bushfire

CAPÍTULO 9

Estudos de caso

Pontos principais

- Diferentes resultados serão obtidos em diferentes solos com diferentes biochars, taxas de aplicação e circunstâncias. Cada agricultor deve fazer seus próprios testes para determinar o melhor tipo e a melhor taxa de aplicação de biochar para aumentar sua produtividade e lucratividade.
- “Quanto mais custos um sistema de produção puder eliminar, mais ele poderá se dar ao luxo de gastar em biochar e acumular os benefícios cumulativos.” (Doug Pow)
- O aproveitamento da relação simbiótica entre o gado e os besouros rola-bosta para transportar um biochar enriquecido com nutrientes para o solo do pasto aumenta a eficácia do biochar e sua aplicação no solo, melhorando os benefícios para o solo, as plantas e os animais e aumentando a produtividade e a lucratividade.
- Embora a atual pecuária industrial faça a maior contribuição para a regeneração dos serviços ecossistêmicos, se for adequadamente aproveitada, ela poderá fazer uma contribuição importante, e até mesmo a maior, para a regeneração.
- Biochar de alto custo ou altas taxas de aplicação do biochar podem limitar o retorno do investimento. A relação custo/benefício pode ser aumentada com a obtenção econômica do biochar ou com o projeto e a produção estratégica de um biochar aprimorado que seja eficaz com taxas de aplicação mais baixas.

INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta vários estudos de caso, desde as experiências de agricultores individuais na Austrália e no Brasil que lucram com o uso do biochar até implementações em maior escala, como nos estudos de caso da NetZero. Esses estudos de caso ilustram a ampla gama de aplicações e os múltiplos benefícios do biochar em diferentes contextos. As pesquisas abordam desde o uso do biochar na melhoria de pastagens com amendoim forrageiro, em sistemas agroflorestais com bioinsumos em áreas de reforma

agrária, e na produção de hortaliças como alface, repolho e cebola, até sua aplicação em cultivos de milho, café arábica e cana-de-açúcar.

Além disso, incluem investigações sobre os efeitos do biochar nas propriedades químicas, físicas e hídricas de solos tropicais e na mitigação das emissões de N₂O, evidenciando o potencial do biochar como ferramenta estratégica para aumentar a produtividade, melhorar a qualidade do solo e promover sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Para cada estudo de caso, são descritos o contexto, a metodologia e os resultados. O impacto potencial do estudo e as principais conclusões são resumidos. É importante entender que resultados diferentes desses estudos de caso podem ser obtidos em outras áreas agrícolas com diferentes biochars, taxas de aplicação e circunstâncias. O ideal é que cada agricultor faça seus próprios testes para determinar o melhor tipo e a melhor taxa de aplicação de biochar para aumentar sua produtividade e rentabilidade.

1. ALIMENTANDO O GADO COM BIOCHAR PARA AUMENTAR A FERTILIDADE DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DA FAZENDA: AUSTRÁLIA OCIDENTAL

Contexto

Doug Pow, um agricultor e pecuarista da Austrália Ocidental, defende uma mudança de paradigma nas práticas agrícolas, enfatizando a integração estratégica do biochar nos sistemas agrícolas, em vez de vê-lo como um mero suplemento.

“Quanto mais custos um sistema de produção puder eliminar, mais ele poderá se dar ao luxo de gastar em biochar e acumular os benefícios cumulativos.”

Doug Pow adquiriu 150 toneladas de biochar derivado da madeira, a uma taxa reduzida de US\$ 120 por tonelada. O biochar foi produzido pela SIMCOA, em Bunbury, a partir de finos de carvão vegetal que são um subproduto da produção.

Metodologia

Para o teste com o gado, Pow misturou o biochar com melaço para substituir uma parte do regime tradicional de alimentação com feno que ele usava em conjunto com a pastagem para seu gado. O biochar foi administrado ao gado a uma taxa de 0,33 kg por cabeça por dia, combinado com

0,1 kg de melaço. Com a ingestão pelo gado e a incorporação no esterco, o biochar absorveu altos níveis de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo. Posteriormente, os besouros rola-bosta (*Bubas bison*) facilitaram o processamento rápido e o enterramento do esterco bovino (junto com o biochar) no perfil do solo, até 600 mm abaixo do solo (Figura 9.1).

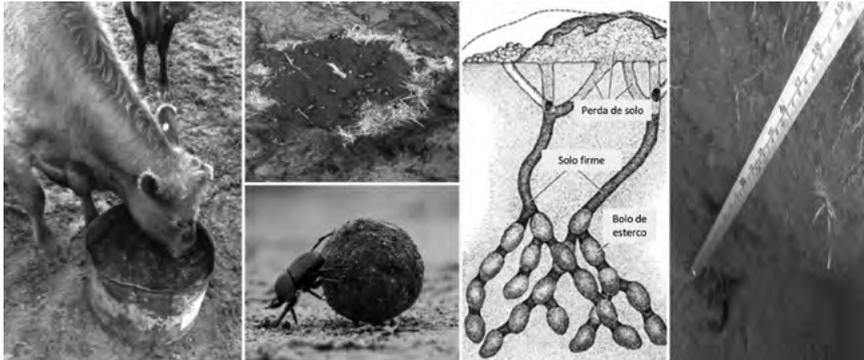


Figura 9.1 – À esquerda: Alimentando o gado com biochar. Ao centro: Besouros de esterco atraídos pela mistura de biochar e esterco mais do que pela camada de esterco subjacente. Os besouros enrolam o esterco de biochar em uma bola e o transportam para o solo, melhorando a ciclagem de nutrientes, a estrutura do solo e o crescimento da forragem. À direita: Bolas de esterco encontradas a uma profundidade de 50 cm.

Resultados

A ração com adição de biochar e o ecossistema de besouros rola-bosta melhoraram a eficiência da ração, a saúde do gado e a qualidade do pasto, eliminando a necessidade de fertilizantes adicionais ou de compra de feno suplementar. Os resultados de peso dos animais foram comparáveis aos registrados antes do uso do biochar. A estrutura de carbono recalcitrante do biochar permaneceu intacta ao passar pelo intestino do animal e ser transportada pelos besouros. A análise preliminar do solo indicou que houve um aumento no carbono do solo sem biochar.

Impacto

Os besouros rola-bosta enrolam o esterco no solo, ajudando assim a proteger a matéria orgânica. Esse estudo de caso aproveitou a relação simbiótica entre o gado e os besouros rola-bosta para transportar um biochar enriquecido com nutrientes para o solo do pasto, criando valor para o usuário em ambos os estágios sem acréscimo de mão de obra ou despesas, o que

contribuiu para aumentar a lucratividade. Entre todos estudos de caso, esse foi o que teve o maior impacto em termos de melhoria geral na fazenda. Ele destaca o potencial da utilização do biochar no manejo do gado, demonstrando sua capacidade de aumentar a lucratividade da fazenda e, ao mesmo tempo, promover práticas agrícolas regenerativas. Embora a atual pecuária industrial faça a maior contribuição para a degeneração dos serviços ecossistêmicos, se aproveitada adequadamente, ela poderia fazer uma contribuição importante, e até mesmo a maior, para a regeneração. Este estudo foi conduzido na Austrália, onde já se usa biochar na alimentação animal. No Brasil, testes e estudos devem ser feitos para comprovar sua segurança e eficácia.

Principais conclusões

- A integração estratégica do biochar no sistema agrícola alcançou seus benefícios de redução de custos e aumento da lucratividade de várias maneiras.
- O acesso ao biochar de fontes acessíveis contribuiu para a lucratividade geral.
- A adição de biochar aos regimes tradicionais de alimentação resultou em economia de custos e melhor desempenho animal.
- O aproveitamento de processos naturais, como a atividade do besouro rola-bosta, aumentou ainda mais a eficácia do biochar no enriquecimento do solo e no ciclo de nutrientes.

2. BIOCHAR E AMENDOIM FORRAGEIRO MELHORAM PASTAGENS: EVIDÊNCIAS DE UM EXPERIMENTO DE CAMPO NO BRASIL

Contexto

Foi avaliado o impacto de diferentes condicionadores de solo na qualidade do solo e na produtividade de três cultivares tropicais de gramíneas forrageiras do gênero *Brachiaria* (*Syn. Urochloa*). Os condicionadores de solo incluíram: biochar, moinha (resíduo local de carvão vegetal), fertilizante tradicional contendo nitrogênio, fósforo e potássio, calcário e amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* cv. Amarillo). Considerando a biomassa total produzida ao longo do experimento (soma de quatro colheitas), a maior produção de biomassa seca foi observada para *Brachiaria brizantha* cv. Piatã (14,1 Mg ha⁻¹) e cv. Marandu (12,7 Mg ha⁻¹), com aplicação de biochar a 30 Mg ha⁻¹.



Metodologia

O estudo de campo foi realizado no município de Itaguaí, estado do Rio de Janeiro, Brasil, entre novembro de 2015 e março de 2017. O experimento consistiu em 81 parcelas experimentais. Essas parcelas representaram cada gramínea forrageira sob os seguintes regimes: controle, moinha (tipo de carvão utilizado por agricultores locais para enriquecer o solo com carbono e melhorar a retenção de água), calcário, calcário + fertilizante NPK, biochar (15 Mg ha⁻¹), amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* cv. Amarillo), amendoim forrageiro + calcário, amendoim forrageiro + biochar (15 Mg ha⁻¹) e biochar (30 Mg ha⁻¹). Cada tratamento foi repetido três vezes para cada gramínea. A forragem e o solo foram coletados e medidos quatro vezes durante os 14 meses do experimento. O manejo da altura do pasto e dos intervalos de pastejo adotado neste estudo seguiu práticas utilizadas pelos agricultores locais. Os animais não tiveram acesso à área entre as colheitas de biomassa forrageira.

Resultados

A produtividade de forragem diferiu entre os tratamentos para as cultivares Marandu (F = 2,55, p = 0,047) e Paiaguás (F = 0,92, p = 0,550) (Figura 9.2).

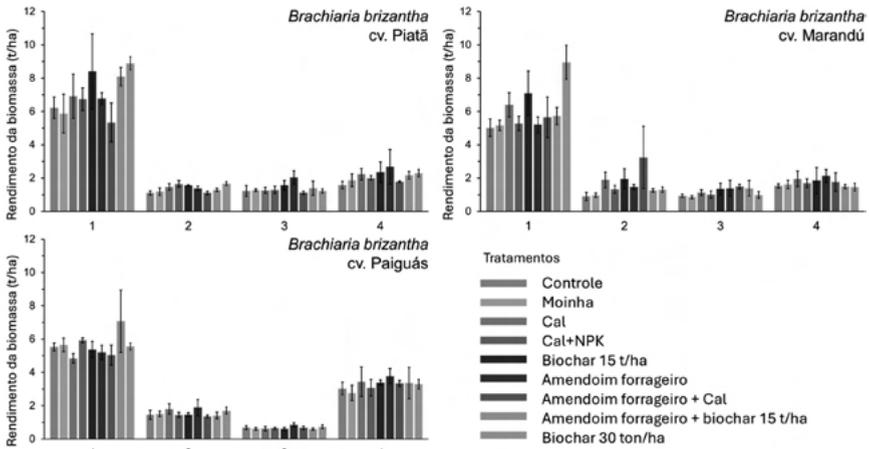


Figura 9.2 – Produção de matéria seca (Mg ha^{-1}) de três cultivares de *Brachiaria brizantha* (*Brachiaria brizantha* cv. Piatã (A), Marandú (B) e Paiaguás (C) sob diferentes regimes de correção de solo em 4 safras consecutivas ($n=3$).

Ao avaliar as tendências de produtividade da forragem por colheita, independentemente do tratamento e do cultivar de *Brachiaria*, a matéria seca tende a ser maior no primeiro período de colheita, com uma diminuição no segundo período (Figura 9.2). O cultivar Paiaguás apresentou uma leve queda na produção de biomassa seca na terceira colheita e um aumento na quarta. Considerando a biomassa total produzida ao longo do experimento (soma das quatro colheitas, Figura 9.3), a maior produção de biomassa seca para os cultivares Marandú e Piatã foi de $12,7$ e $14,1$ Mg ha^{-1} , respectivamente, com a aplicação de biochar na taxa de 30 t/ha , enquanto para o Paiaguás a maior produção de matéria seca ($12,4$ Mg ha^{-1}) foi observada no tratamento com amendoim forrageiro mais aplicação de 15 Mg ha^{-1} de biochar.

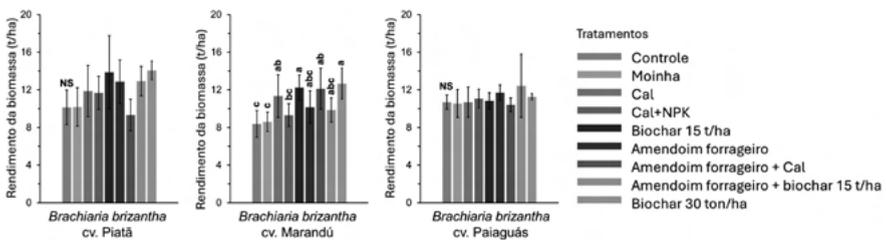


Figura 9.3 – Soma das quatro colheitas para três gramíneas forrageiras com desvio padrão. As letras acima das barras representam diferenças significativas (teste t), enquanto NS significa não significativo ($n = 3$).

Impacto

A aplicação de 30 Mg ha⁻¹ de biochar para os cultivares *Brachiaria brizantha* Marandu e Piatã ou o cultivo de amendoim forrageiro com 15 Mg ha⁻¹ de biochar para o cultivar Paiaguás resultou nos maiores aumentos na biomassa das gramíneas forrageiras. Esses ganhos representam um aumento de 34% na biomassa para Marandu, 28% para Piatã com 30 Mg ha⁻¹ de biochar, e 14% de aumento na biomassa para o tratamento com amendoim forrageiro + 15 Mg ha⁻¹ de biochar para o cultivar Paiaguás. Paiaguás é resistente à seca, o que, combinado ao biochar, pode potencializar uma variedade de serviços ecossistêmicos. Embora nossos dados não mostrem diferença estatisticamente significativa entre esse tratamento e o controle, do ponto de vista do produtor, esse aumento (na soma das colheitas) representa uma renda adicional.

Principais conclusões

- Considerando a biomassa total produzida ao longo do experimento (soma das quatro colheitas), a maior produção de biomassa seca foi observada para *Brachiaria brizantha* cv. Piatã (14,1 Mg ha⁻¹) e cv. Marandu (12,7 Mg ha⁻¹), com aplicação de 30 Mg ha⁻¹ de biochar.
- O cultivar Paiaguás apresentou a maior produção de matéria seca (12,4 Mg ha⁻¹) no tratamento com amendoim forrageiro + 15 Mg ha⁻¹ de biochar.
- Os aumentos na produção de massa seca se traduziram em rendas adicionais de US\$ 1.291, US\$ 1.183 e US\$ 991 por ano para Marandu, Piatã e Paiaguás, respectivamente.
- Os aumentos na produtividade das gramíneas forrageiras refletiram-se em mudanças positivas nas características do solo, como melhoria na capacidade de troca de cátions, no pH e no teor de nutrientes.

3. USO DE BIOINSUMOS COM BIOCHAR EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS LOCALIZADOS EM ÁREAS DE ASSENTAMENTOS RURAIS DA REFORMA AGRÁRIA NO NORTE DE MATO GROSSO/BRASIL

Contexto

Esse relato faz parte das atividades conduzidas durante a execução do projeto Gaia – Rede de Cooperação para a Sustentabilidade, parceria entre a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) e a Cooperativa dos Produtores Agropecuários da Região Norte do Estado de Mato Grosso (COOPERVIA). Seus principais objetivos foram a implantação de Sistemas Agroflorestais (SAFs) Agroecológicos, que, tendo como base os princípios agroecológicos de relações horizontais e participativas junto a todos os atores (famílias camponesas, povos tradicionais, agricultores e atores da comunidade acadêmica e das instituições de pesquisa e extensão) se consolidam como movimento, ciência e prática (FELIPE *et al.*, 2023). Dentro destas premissas, o projeto implementou práticas de empoderamento agrícola, visando a autonomia camponesa. O uso do biochar como insumo foi uma das práticas realizadas e implementadas nas áreas, tendo como foco a saúde do solo e o aumento do seu potencial produtivo de forma sustentável, influenciando a capacidade produtiva destas áreas no intuito de restabelecer o protagonismo das pessoas que vivem da terra. A incorporação do uso do biochar tem sido amplamente difundida dentro das práticas agroecológicas de forma a somar junto aos demais insumos permitidos, práticas que, de forma semelhante às Terra Pretas Indígenas (TPI), tem buscado a construção de solos vivos, saudáveis e carbono-eficientes.

Metodologia

A partir de práticas de troca de experiência e do resgate da produção de insumos agrícolas dentro das áreas produtivas foi realizada a produção de adubos orgânicos, remineralizadores do solo e fermentados orgânicos. Dentre as práticas difundidas nas áreas de implantação dos SAF tivemos: produção de biochar nas propriedades e produção de compostos orgânicos do tipo bokashi. O biochar foi obtido a partir de resíduos de galhos de árvores ou ainda dos finos de carvão de essências nativas. Após a produção do

biochar, o mesmo foi adicionado à pilha de composto bokashi. O bokashi foi composto da mistura de esterco animal (26%), casca de arroz (26%), solo local (26%), biochar (8%), serapilheira (7%), farelo de arroz (3%), pó de rocha (3%), açúcar (1%) e água. O bokashi passou por período de fermentação e após este período foi aplicado ao solo na dosagem de 5 kg/berço para plantas perenes e 150 g/berço em hortaliças.

Resultados

Os resultados da análise de solo são apresentados na tabela abaixo. Foi possível observar que, no ano I, os solos apresentaram alumínio trocável e pH baixo, fator que diminui a disponibilidade dos nutrientes para as plantas, o que é comum nos solos tropicais e resulta em limitações na produção agrícola. Já no ano II, após a aplicação dos bioinsumos, o pH foi elevado, o que tornou o alumínio indisponível, além de favorecer à disponibilização de fósforo, potássio, cálcio e magnésio. O composto adicionado serviu também como fonte de nutrientes ao sistema, exceto para o potássio nas áreas I e II. Essas melhorias tendem a se intensificar uma vez que esta adubação é realizada periodicamente junto a outras práticas agroecológicas como a manutenção da cobertura do solo, rotação de culturas e adubação verde.

Área	I*		II*		III*		IV*	
	Ano I	Ano II						
pH	5,4	6,2	5,4	6,1	5	6	5,5	5,8
AL³⁺ (cmolc dm⁻³)	0,16	0	0,29	0	0,43	0	0,15	0
P (mg dm⁻³)	1,8	65,2	1,2	46	0,7	86,7	1,4	8,6
K (cmolc dm⁻³)	0,05	0,05	0,05	0,06	0,03	0,13	0,07	0,12
Ca (cmolc dm⁻³)	0,73	1,47	0,67	1,72	0,2	1,67	0,88	1,37
Mg (cmolc dm⁻³)	0,37	0,61	0,28	0,96	0,08	0,86	0,31	0,59

***Ano I** – antes da aplicação; ano II após a aplicação. Produtor I: Cleonice; produtor II: Marciano; produtor III: Eliane; produtor IV: Marciel.



Figura 9.4 – Área sistema agroflorestal (**Esquerda**); produção de bokashi adicionado de biochar (**Direita acima**); aplicação de biochar nos berços de plantio (**Direita abaixo**).

Foi realizado o acompanhamento socioeconômico das famílias através das Agendas Agroecológicas em que cada família iniciou o registro do consumo próprio (da produção) e comercialização, obtendo então a renda bruta da produção. Através do acompanhamento dos registros, as famílias conseguiram compreender a importância da gestão familiar e compreender melhor o custo-benefício dos SAF agroecológicos.

Nem todas famílias conseguiram instituir os registros como um hábito, mas gostaríamos de destacar uma família em especial que iniciou os registros em junho/2021, informando uma comercialização de R\$ 808,00 por mês e o consumo próprio de R\$ 24,00, totalizando uma renda bruta de R\$ 832,00. Com o passar dos meses, com o aumento da produção e da comercialização e com o hábito de também registrar o consumo próprio, após 16 meses (outubro/2022), a família registrou R\$ 2.120 de comercialização e R\$ 1.397,00 de consumo próprio, totalizando R\$ 3.517,00 (422% de aumento na renda bruta). Claro que este valor não está relacionado apenas ao aumento da produção e da comercialização, mas também à sensibilização sobre a importância da gestão familiar (pois acarretou o hábito dos registros).

Impacto

Os bioinsumos cumpriram o papel de melhoria nas condições do solo e de importante fonte de nutrientes às plantas. Estas ações são pano de fundo para o fortalecimento dos territórios da agricultura familiar e melhoria das condições de vida de trabalhadores rurais, que, ao se tornarem responsáveis pela produção dos seus insumos e reconstruindo a vida de seu solo, viabilizam a segurança alimentar e nutricional das famílias produtoras e da região em que vivem sem, no entanto, impactar negativamente os ecossistemas em que estão inseridos.

Principais conclusões

- Biochar como parte dos insumos viáveis para uso em áreas produtivas voltadas para a agroecologia.
- Biochar traz benefícios aos solos ácidos tropicais.
- A aplicação de biochar junto a compostos orgânicos e fermentados produzidos *on-farm* é tecnologia acessível e viável para viabilizar a produção agrícola sustentável na busca pela segurança alimentar e nutricional de comunidades agrícolas.

4. A APLICAÇÃO DE BIOCHAR MELHORA O DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DE PLANTAS DE ALFACE

Contexto

A produção de alface no Brasil é expressiva, com uma produção de mais de 1,5 milhão de toneladas ao ano. A área ocupada por alface pode ultrapassar 86,8 mil hectares cultivados por mais de 670 mil produtores, com volume produzido de 575,5 mil toneladas. A produção de alface no Brasil se concentra nas regiões sudeste e sul, com destaque para São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraná. No entanto, esta é uma cultura bastante exigente, principalmente em disponibilidade hídrica, o que faz o setor demandar por tecnologias que melhorem as condições de solo e favoreçam a retenção de água para as plantas. Nesse sentido, o biochar foi aplicado para melhorar as propriedades do solo¹, visando aumentar a produção de alface.

Metodologia

O ensaio foi implantado em viveiro protegido por sombrite com 50% de redução da incidência luminosa. Foram implantados quatro canteiros com 10 m de comprimento, 1,2 m de largura e 0,2 m de altura (Figura 9.5). Foram avaliadas doses de 5,0; 10; 15 e 20 toneladas de Biochar por hectare e dois níveis de adubação (75 e 100% da dose recomendada).

Foi utilizado Biochar padrão NetZero Lajinha e os finos removidos da caixa de resfriamento no processo de estabilização. Foi realizado o cultivo de alface tipo crespa dia 28 de novembro de 2023 e a avaliação dia 28 de dezembro de 2023, 30 dias após o transplante das mudas de alface.

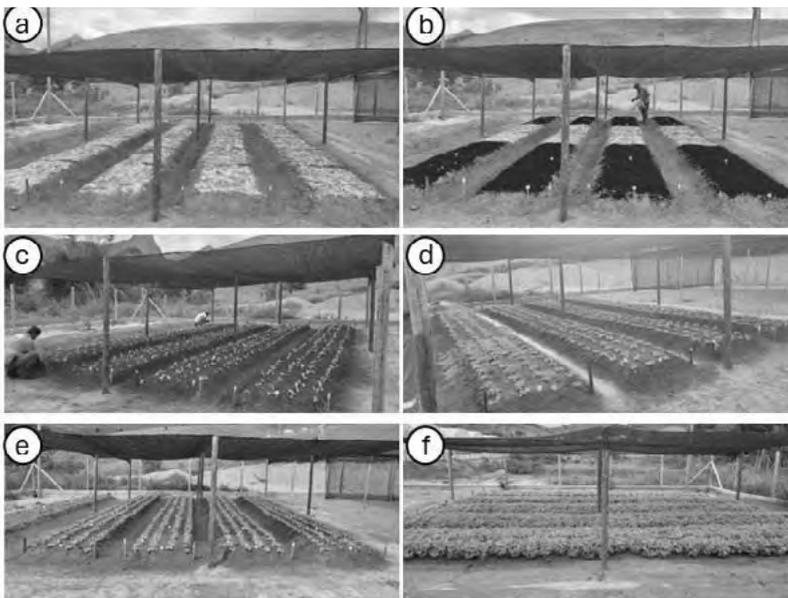


Figura 9.5 – Visão dos canteiros com calcário (a), com aplicação de biochar e finos (b), das mudas durante o transplante (c) e do desenvolvimento das plantas de alface aos 10 dias (d), 14 dias (e) e aos 28 dias (f) após o transplante.

Resultados

A aplicação do biochar padrão (Figura 9.6a) e dos finos (Figura 9.6b) promoveu um melhor desenvolvimento das folhas e das raízes (Figura 9.6a, b e c) das plantas de alface quando comparado ao controle.

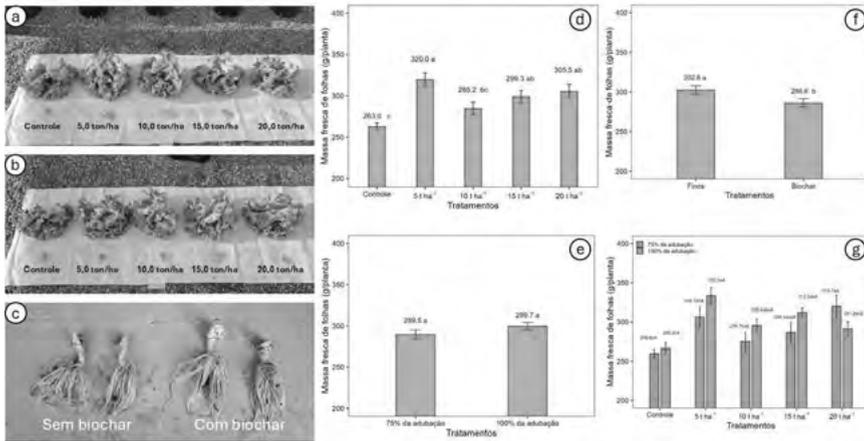


Figura 9.6 – Desenvolvimento das plantas sob efeito do biochar padrão (a) e dos finos (b) aos 30 dias após o transplante e (c) desenvolvimento de raiz com biochar na dose de 5,0 toneladas por hectare comparado ao controle sem biochar; Massa fresca de folhas de alface em função das doses de biochar (d), dos tipos de biochar (e), dos níveis de adubação (f), e da interação dose x tipo de biochar (g).

A aplicação de biochar aumentou a produção de alface independente da dose utilizada (entre 13 e 22%), exceto na dose de 10 toneladas por hectare (Figura 9.6d), a qual não diferiu do controle. A utilização dos finos (Figura 9.6f) proporcionou uma maior massa fresca de folhas (5,7%), enquanto não houve diferença na produção quando avaliados os níveis de adubação (Figura 9.6e). Comparando a interação entre os fatores doses e níveis de adubação, houve diferença significativa entre os níveis de adubação somente na dose de 5 toneladas por hectare, onde a aplicação de 75% da adubação proporcionou uma maior produção de alface (Figura 9.6g). Já em relação as doses em cada nível de adubação, observou-se maior produção de alface na dose 5 e 20 toneladas por hectare comparado ao controle, enquanto no nível de 100% da adubação a maior produção foi obtida na dose 5 e 15 toneladas por hectare (Figura 9.6g).

Impactos

O uso do biochar proporcionou uma maior produção de alface, além de favorecer uma economia de fertilizantes, uma vez que, mesmo com a redução de 25% do NPK, os resultados foram similares aos resultados obtidos com uso de 100% do NPK recomendado. Portanto, a adição de biochar a canteiros para produção de alface pode, além de melhorar a produção, reduzir custos para o produtor.

Principais conclusões

- O biochar aumentou a produção de alface acima de 5%.
- O uso do biochar permite economizar 25% de fertilizante.
- O uso de biochar moído para incorporação aos canteiros é mais eficiente devido à maior área de contato como o solo e mistura mais homogênea.

5. BIOCHAR DE CAMA DE FRANGO NO CULTIVO DE REPOLHO

Contexto

Em 2019, foi realizado um experimento em casa de vegetação na cidade de Maringá-PR no Brasil para avaliar o potencial do biochar enriquecido com minerais, derivado de cama de frango, quando aplicado ao cultivo de repolho. O objetivo do estudo foi analisar os efeitos de quatro doses de aplicação de biochar sobre as propriedades do solo e o crescimento do repolho, em comparação com um tratamento controle.

Metodologia

O experimento utilizou solo latossolo vermelho distrófico (classificação brasileira de oxissolos) coletado na cidade de Maringá, Paraná, Brasil, com uma composição textural de 16,2% de areia, 4,9% de silte e 78,9% de argila. Os vasos plásticos foram preenchidos com 3 kg desse solo e misturados com biochar nas taxas de aplicação de 0% (controle), 1,5%, 3%, 5% e 15% m/m, em triplicata para cada tratamento. Mudanças híbridas de repolho foram transplantadas para cada vaso, que foram dispostas em blocos aleatórios em uma estufa com irrigação três vezes ao dia por 1 minuto em cada evento com uma taxa de fluxo média de 60 mL/min. Após 30 dias, as plantas foram colhidas e suas massas secas foram determinadas.

Resultados

Todas as plantas tiveram desenvolvimento radicular semelhante; no entanto, aquelas cultivadas em solo tratado com 1,5%, 3% e 5% de biochar apresentaram melhor desenvolvimento geral em comparação com as cultivadas em solo de controle (Figura 9.7). O tratamento com 15% de biochar

resultou em plantas menores do que o tratamento com 5%. A aplicação de 5% de biochar produziu a maior massa seca total, aumentando o peso do repolho em 75%. Além disso, os tratamentos com biochar aumentaram significativamente o teor de carbono e o pH do solo, demonstrando a capacidade do biochar de atenuar a acidez do solo.

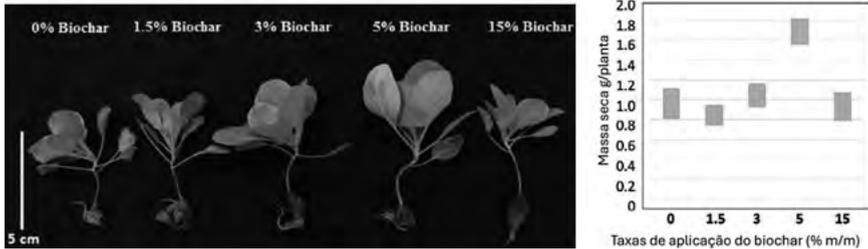


Figura 9.7 – Crescimento da planta de repolho após 30 dias de cultivo sob diferentes dosagens de biochar. As alturas das caixas representam intervalos de confiança de 95%. (Dados fornecidos por Ronix et al.)⁷

Impacto

O biochar de cama de frango é um condicionador de solo viável para as plantações de repolho, melhorando as propriedades físicas e químicas do solo e aumentando a produtividade. Além disso, a conversão da cama de aviário em biochar oferece uma solução sustentável para um problema de resíduos. Entretanto, as altas taxas de aplicação foram prejudiciais ao crescimento do repolho.

Principais conclusões

- A aplicação de biochar influenciou positivamente as propriedades do solo.
- A aplicação de biochar a 5% resultou nos maiores valores de massa seca para as plantas de repolho.
- Uma dosagem de 15% de biochar foi tóxica para as plantas.
- Portanto, testes em pequena escala são essenciais antes da implementação generalizada para determinar a dosagem ideal para maximizar os benefícios de rendimento e, ao mesmo tempo, evitar possíveis toxicidades.

6. BIOCHAR COMO CONDICIONADOR DE SOLO NA PRODUÇÃO DE CEBOLA EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, COMPARADO AO SOLO DESCOBERTO

Contexto

A fração fina de carvão, chamada moinha ou finos do carvão, sem valor comercial e gerada nas carvoarias após o peneiramento e seleção de carvão para uso doméstico, foi avaliada como biochar para condicionamento do solo na produção de cebola cultivada no sistema de plantio direto de hortaliças (SPDH), comparativamente ao solo descoberto (sem plantas de cobertura). Esse resíduo pode ser uma fonte recalcitrante de matéria orgânica e seu uso pode ocorrer pela incorporação ao solo (Figura 9.8), ou ser aplicado anualmente sobre a palhada de plantas de cobertura (Higashikawa et al., 2023).

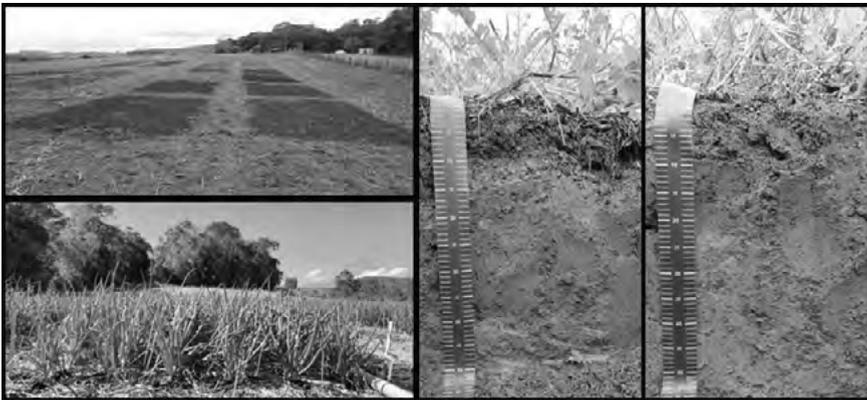


Figura 9.8 – Doses de biochar incorporados ao solo.

Metodologia

O estudo em campo foi conduzido na Estação Experimental de Ituporanga (Epagri) de 2016 a 2021 em Cambissolo Húmico. Os tratamentos consistiram em doses de 0,5; 10; 20; 40; 80 e 100 Mg ha⁻¹ de biochar na granulometria inferior a 10 mm, aplicadas em dose única em 2016 e incorporadas ao solo com grade até a profundidade de 12 cm. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com quatro repetições. As doses de biochar foram avaliadas em dois experimentos, sendo um deles em sistema de plantio direto (SPDH) e o outro com plantio em solo descoberto, sem plantas de cobertura. Cada experimento continha 28 parcelas e em cada ano a adubação mineral foi em kg ha⁻¹ de 150 de N na forma de nitrato de amônio, 290 de P₂O₅ na forma de susperfosfato simples e 160 de K₂O na forma de cloreto de potássio. No SPDH a adubação verde de inverno em abril de cada ano foi com a alternância dos consórcios, implantados com as respectivas densidades de semeadura, a saber: *Avena strigosa* Schreb (60 kg ha⁻¹) + *Raphanus sativus* (10 kg ha⁻¹) ou *Secale cereal* L. (60 kg ha⁻¹) + *Raphanus sativus* (10 kg ha⁻¹). No verão a adubação verde foi implantada em dezembro de cada ano com consórcio *Mucuna aterrima* (40 kg ha⁻¹) + *Penissetum glaucum* (30 kg ha⁻¹). Em julho de cada ano foram transplantadas mudas de cebola (Empasc 352 – Bola Precoce) e em novembro foi feita a colheita. A análise de fertilidade do solo e da água disponível do solo foram feitas em amostras coletadas na camada de 0 a 10 cm.

Resultados

Os anos de 2017, 2019 e 2021 foram mais secos e com menor precipitação durante o cultivo de cebola. Observa-se que tanto no SPDH como no cultivo em solo sem plantas de cobertura houve aumento no rendimento de cebola de 2016 a 2021.

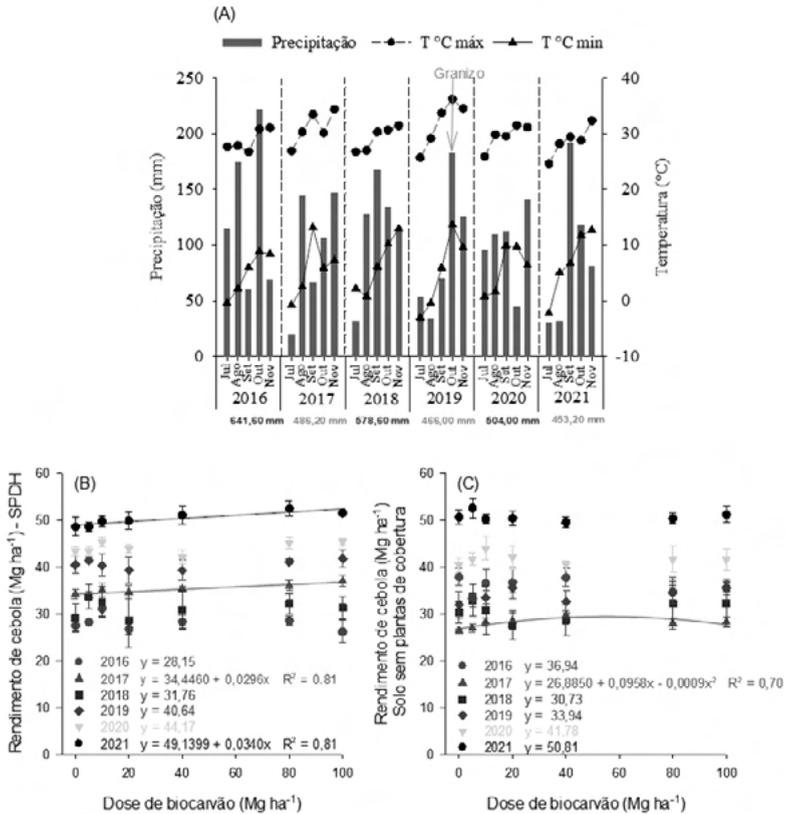


Figura 9.9 – Dados climáticos durante os cultivos de cebola nos anos de 2016 a 2021 (A). Rendimento comercial de cebola (Mg ha⁻¹) no sistema plantio direto – SPDH (B) e em solo sem plantas de cobertura (C) durante seis cultivos.

Houve resposta linear do rendimento de cebola à dose de biochar no SPDH nos anos mais secos (2017 e 2019). Nos anos de 2017 e 2019 no SPDH o ganho de rendimento de cebola foi de 29 e 34 kg, respectivamente por Mg de biochar incorporado ao solo. Enquanto que no cultivo em solo sem plantas de cobertura houve resposta quadrática e o rendimento máximo de 29,53 Mg ha⁻¹ de cebola foi obtido com a dose de 55,23 Mg ha⁻¹ de biochar. A resposta linear do rendimento da cebola no SPDH em ano mais seco provavelmente está relacionada a maior disponibilidade de água proporcionada pelo biochar (Figura 9.10).

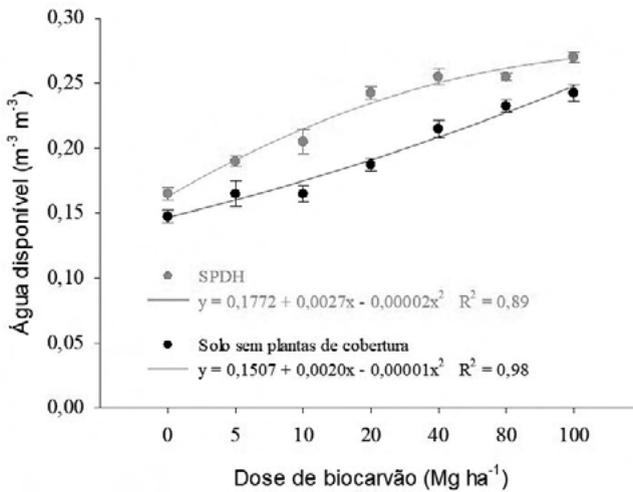


Figura 9.10 – Água disponível no solo na camada de 0 a 10 cm no sistema de plantio direto (SPDH) e em solo sem plantas de cobertura.

A máxima disponibilidade de água no SPDH de 0,27 m³ m⁻³ foi maior que no cultivo sem plantas de cobertura que foi de 0,23 m³ m⁻³. Em relação a fertilidade do solo tanto o SPDH (Figura 9.11a) quanto para o cultivo sem planta de cobertura (Figura 9.11b) teve a formação de dois grupos, sendo um grupo formado pelas doses de 80 e 100 Mg ha⁻¹ de biochar e as demais doses formando o outro grupo. Os dois sistemas foram semelhantes na melhoria da fertilidade do solo com o aumento das doses de biochar aplicados ao solo. As doses de biochar apresentaram efeito residual e contribuíram na ciclagem de nutrientes.

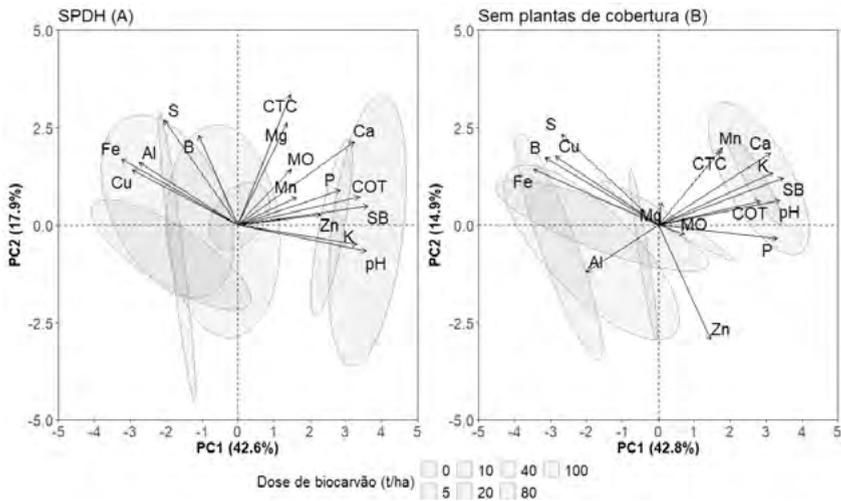


Figura 9.11 – Análise de componentes principais dos atributos de fertilidade do solo da camada de 0 a 10 cm no sistema de plantio direto (SPDH) e em solo sem planta de cobertura. COT = carbono orgânico total; CTC = capacidade de troca catiônica; MO = matéria orgânica; SB = soma de bases.

Impactos

A incorporação de biochar ao solo deixou o SPDH mais resiliente em anos climáticos com pouca chuva. Não há efeito negativo deste condicionador de solo na produção de cebola, mesmo nas maiores doses utilizadas. Os finos de carvão sem valor comercial podem ser utilizados na agricultura de acordo com os princípios da economia circular.

Principais conclusões

- O biochar principalmente combinado com plantas de cobertura aumenta a saúde do solo.
- A incorporação de biochar melhora a retenção de água do solo.
- Em anos secos há aumento linear no rendimento da cebola produzida em sistema de plantio direto.
- O biochar promove a melhoria da fertilidade do solo.
- Altas doses de biochar não afetaram o rendimento da cebola.

7. PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E HIDRICAS EM SOLOS TROPICAIS ARENOSOS E FRANCO-ARGILOSOS APÓS UM ANO DE INTERAÇÃO COM BIOCHAR DE MISCANTHUS

Contexto

A aplicação de biochar tem melhorado as propriedades do solo e contribuído para o crescimento de diferentes culturas. Este estudo avalia o efeito da quantidade de biochar nas propriedades físicas, químicas e hidráulicas do solo arenoso e franco-argiloso em condições tropicais. Um experimento de incubação foi instalado em condições de laboratório com oito tratamentos (controle, dois tipos de solo, arenoso e franco-argiloso, e três doses de biochar (6,25, 12,5 e 25 Mg ha⁻¹). Análises de porosidade, carbono total, nitrogênio e retenção de água no solo, foram realizadas após um ano. A porosidade aumentou em 1,87 e 2,31% nos solos franco-argiloso e arenoso, respectivamente, com a aplicação de 6,25 a 25 Mg ha⁻¹ de biochar. O carbono total aumentou em solos franco-argilosos e arenosos em 6,5 e 4,2 kg kg⁻¹, respectivamente, em comparação com o controle. O teor de nitrogênio total aumentou com a adição de biochar no solo franco-argiloso em relação ao solo arenoso. Foi verificado um efeito positivo do biochar na disponibilidade de água e um pequeno efeito na retenção de água, especialmente para o solo franco-argiloso com alta aplicação de biochar, mas essa influência não ocorreu para o arenoso, possivelmente devido ao curto tempo de interação.

Metodologia

O estudo investigou o efeito de diferentes doses de biochar de *Miscanthus giganteus* (0, 6.25, 12.5 e 25 Mg ha⁻¹) em solos arenoso (Arenosol) e franco-argiloso (Ferralsol) do Brasil, incubados por 12 meses a 30 °C em laboratório. O experimento fatorial totalmente casualizado com quatro repetições totalizou 32 vasos (100g solo + biochar). Após a incubação, amostras de solo foram coletadas para análise de propriedades físicas (retenção de água e porosidade) e químicas (carbono total, nitrogênio). Os solos foram coletados em Anhembi e Piracicaba, São Paulo, Brasil, e caracterizados quimicamente antes da incubação.



Resultados

Foram encontradas maiores quantidades de carbono no solo franco-argiloso em comparação ao solo arenoso. O carbono total aumentou com a adição de biochar em ambos os solos, mas para o solo franco-argiloso, esse efeito foi mais acentuado do que para o solo arenoso. No solo franco-argiloso, o carbono orgânico total variou de $23,1 \text{ g kg}^{-1}$ no controle a $29,6 \text{ g kg}^{-1}$ na maior adição de biochar (25 Mg ha^{-1}). Essa dose aumentou a quantidade de carbono em $6,6 \text{ g kg}^{-1}$ no solo franco-argiloso (Figura 9.12a). Para o solo arenoso, o carbono orgânico total variou de $5,7 \text{ g kg}^{-1}$ no tratamento controle a 10 g kg^{-1} com 25 Mg ha^{-1} de adição de biochar do solo. Portanto, esse aumento foi de $4,2 \text{ g kg}^{-1}$.

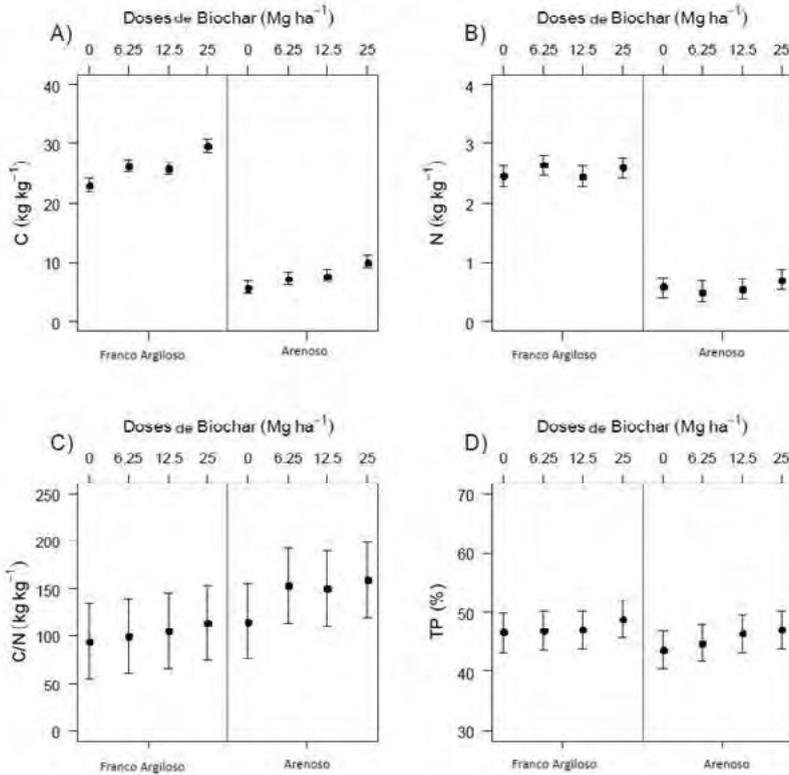


Figura 9.12 – Efeitos da quantidade de biochar nas propriedades físicas e químicas em solos franco-argilosos e arenosos. C: carbono; N: nitrogênio; C/N: razão atômica; TP: porosidade total. (A) Teor de carbono; (B) Teor de nitrogênio; (C) Razão carbono-nitrogênio; (D) Porosidade total.

A adição de 25 Mg ha⁻¹ de biochar aumentou o carbono total em ambos os solos, mas essa diferença foi significativa apenas para o solo franco-argiloso em comparação com as doses mais baixas e o controle. Solos arenosos tendem a aumentar o teor de carbono com a adição de biochar (6,25 a 25 Mg ha⁻¹), mas essa diferença não foi estatisticamente significativa (Figura 9.9A). O aumento da concentração de carbono de 6,6 kg kg⁻¹ em solo franco-argiloso e de 4,2 kg kg⁻¹ em solo arenoso com a adição de 25 Mg ha⁻¹ (Figura 9.9A) pode contribuir para o aumento da estabilidade de agregação, retenção de água, teor de água disponível e redução da densidade do solo. Essas propriedades físicas do solo são essenciais para a qualidade física do solo e, portanto, para o desenvolvimento das plantas.

Para o solo franco-argiloso, a relação C/N variou entre 9,4 (controle) e 11,4 (25 Mg ha⁻¹ de biochar; Figura 9.9C); para o solo arenoso, a relação C/N variou entre 11,6 (controle) e 15,9 (25 Mg ha⁻¹ de biochar; Figura 9.9C). O aumento da quantidade de biochar aumentou a relação C/N, mas esse aumento não foi estatisticamente significativo.

Independentemente da quantidade de biochar, o solo franco-argiloso apresenta menor relação C:N em comparação ao solo arenoso, o que pode ser atribuído à alta quantidade de nitrogênio no solo franco-argiloso. O aumento na dose de biochar aumentou a relação C:N; para o solo arenoso aumentou 4,3% e para o solo franco-argiloso, 2%. Esse aumento pode ser atribuído à alta quantidade de carbono no biochar (Figura 9.9C).

A quantidade de biochar aumentou a porosidade em ambos os solos. Embora a diferença não seja significativa, é possível notar que, em ambos os solos, a quantidade de biochar aumentou a porosidade total. Em comparação com o tratamento controle no solo franco-argiloso, a adição de 25 Mg ha⁻¹ de biochar aumentou a porosidade de 47 para 49%, para o solo arenoso, e de 44 para 47% para o solo franco-argiloso. A alta porosidade no biochar pode ser uma estratégia para aumentar a porosidade, a aeração e a movimentação de água.

A quantidade de biochar não afetou a retenção de água em solo arenoso, sendo verificado pequeno aumento na retenção de água no solo em baixa potência (1–10 hPa) em 12,5 Mg ha⁻¹. A partir da potência (10 hPa), a dose de biochar não afetou a retenção de água no solo: o comportamento da curva foi semelhante em todos os tratamentos, e a diferença entre os tratamentos na retenção de água foi muito pequena e insignificante. No solo Franco-argiloso, verificou-se que a maior quantidade de biochar (25 Mg ha⁻¹) aumentou a retenção de água, comparado aos demais tratamentos até 1000 hPa, e a partir desse potencial a retenção potencial de água foi semelhante para todos os tratamentos.

O aumento da retenção de água pode estar associado à matéria-prima do biochar (*Mischanthus*) que naturalmente contém grande quantidade de silício em sua estrutura. O Si reage com moléculas de água em reações de polimerização, causando a formação de fitólitos ou hidrogéis de sílica, estruturas essenciais utilizadas em reações bioquímicas e biofísicas em plantas.

Principais conclusões

- A alta dose de biochar (25 Mg ha⁻¹) em solo franco-argiloso pode ser benéfica para as propriedades químicas e físicas (por exemplo, concentrações de C e N, relação C/N, água disponível para as plantas e porosidade).
- Melhora no teor de água do solo, reduzindo o estresse hídrico das plantas e aumentando a quantidade de C e N.
- Os bons resultados na melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, especialmente em solo arenoso, podem estar associados ao tempo de interação, pois o biochar é um material estável.

8. DIFERENTES TIPOS DE BIOCHAR DERIVADOS DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS MITIGAM EMISSÕES DE N₂O E AUMENTAM CONTEÚDO DE CARBONO EM SOLOS TROPICAIS

Contexto

O biochar pode ser usado como uma tecnologia de remoção de dióxido de carbono (CO₂) para promover o sequestro de carbono (C) nos solos. Além disso, seu uso já foi previamente destacado pelo potencial de reduzir as emissões de óxido nitroso (N₂O) – um potente gás de efeito estufa (GEE), emitido principalmente após a aplicação de fertilizantes nitrogenados em sistemas agrícolas. Neste estudo, avaliou-se o impacto de quatro tipos de biochar, produzidos a partir de resíduos da cana-de-açúcar (palha e bagaço) e da produção florestal (pinus e eucalipto), sobre as emissões de N₂O e o acúmulo de C no solo (Gabetto, 2025). Todos os tipos de biochar avaliados reduziram as emissões de N₂O entre 25-50%, em comparação aos solos com somente aplicação de fertilizantes nitrogenados. No entanto, o biochar produzido a partir da palha apresentou maior capacidade de suprimir a emissão do gás em relação ao biochar derivado de resíduos de eucalipto. Por outro lado, os biochars produzidos a partir de resíduos florestais foram mais eficazes em elevar os teores de C no solo, considerando as mesmas doses de aplicação.

Metodologia

Um experimento em casa de vegetação foi conduzido por 60 dias em Campinas, São Paulo, Brasil. O experimento foi instalado de forma inteiramente casualizada e consistiu de seis tratamentos, com quatro repetições: (i) solo; (ii) solo + fertilizante nitrogenado (NF); (iii) NF + biochar de palha de cana-de-açúcar (NF+SB); (iv) NF + biochar de bagaço de cana-de-açúcar (NF+BB); (v) NF + biochar de pinus (NF+PB); e (vi) NF + biochar de eucalipto (NF+EB). Foi adotada uma dose de aplicação de 23 Mg ha⁻¹ para o biochar, sendo o material incorporado homogeneamente ao solo antes do plantio de uma muda pré-brotada de cana-de-açúcar por vaso. O solo utilizado no experimento foi coletado na camada superficial (0-20 cm) de uma usina de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, sendo classificado como Latossolo, com pH de 6,5 (CaCl₂), teor de Al inferior a 0,1 mmolc dm⁻³, P disponível de 239 mg dm⁻³ e K de 35 mg dm⁻³. O fertilizante nitrogenado foi aplicado na dose de 14,7 g de N por vaso, na forma de sulfato de amônio (21% de N), em todos os tratamentos, exceto no controle. A umidade do solo foi mantida em 60% da capacidade de campo ao longo do experimento. As amostragens de gás foram realizadas periodicamente ao longo do experimento, utilizando câmaras estáticas de PVC com volume de 117,8 cm³ (5 cm x 15 cm). As concentrações de N₂O foram quantificadas por cromatografia gasosa, e as emissões diárias obtidas por meio da metodologia de extrapolação linear. Emissões diárias foram então utilizadas para calcular as emissões acumuladas de N₂O ao final dos 60 dias de experimento, estimadas por interpolação linear. A concentração total de C no solo foi determinada pelo método da combustão seca, utilizando um analisador elementar (TruSpec CHN, LECO). Amostras de solo para quantificação de C foram coletadas ao final do experimento, na camada superficial (0-10 cm) dos vasos.

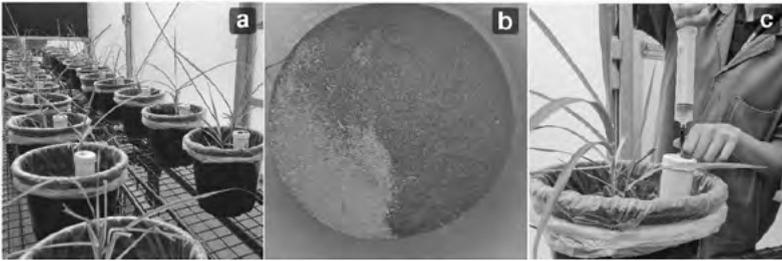


Fig. 9.13 – Painéis mostram as unidades experimentais dispostas na casa de vegetação (a), a mistura de solo e biochar antes do início do experimento (b) e o procedimento de amostragem de gases (c).

Resultados

Os resultados mostram que as emissões acumuladas dos tratamentos com biochar foram significativamente menores do que as do tratamento com fertilizante nitrogenado (NF), independentemente do tipo de biochar ($p < 0,05$). Entre os biochars avaliados, o derivado da palha de cana-de-açúcar apresentou o maior potencial de mitigar emissões de N_2O , reduzindo-as em 50% em comparação ao tratamento NF (Fig. 9.11a). Embora todos os tipos de biochar tenham se mostrado eficazes na redução das emissões de N_2O , o biochar produzido a partir de resíduos de eucalipto (ou seja, resíduos de poda e cascas de árvores) apresentou metade da capacidade de redução das emissões de N_2O em relação ao biochar de palha. Nenhuma diferença significativa entre os tratamentos com biochar foi observada em relação aos níveis de C no solo (Fig. 9.11b), com os teores de C variando entre 11 e 19 $g\ kg^{-1}$ nos tratamentos NF e NF+PB, respectivamente. No entanto, ao comparar a influência do biochar na dinâmica de C, observou-se que somente os tratamentos NF+PB e NF+EB exibiram concentrações de C maiores do que os tratamentos CTR e NF. Isso indica que os biochars derivados de resíduos florestais foram mais eficazes em elevar os teores de C no solo.

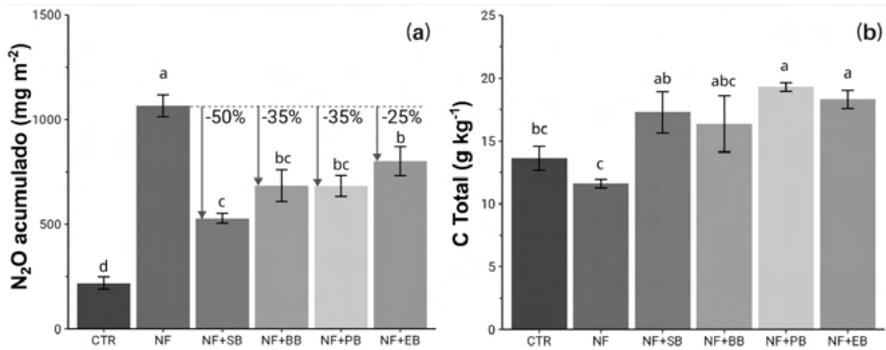


Fig. 9.14 – Emissões acumuladas de N_2O (a), e concentração final de carbono total no solo (b) ao final dos 60 dias de experimento sob diferentes tipos de aplicação de biochar. Os dados são apresentados como médias \pm erros padrão ($n = 4$), com letras diferentes indicando diferenças significativas entre os tratamentos com base no teste de Tukey ($p < 0,05$).

Impactos gerados

Todos os tratamentos com biochar emitiram de 25 a 50% menos N_2O do que os solos com apenas fertilizante nitrogenado. Essa redução pode ser considerada significativa, uma vez que a aplicação de resíduos orgânicos associada ao uso de adubos nitrogenados em solos agrícolas representa uma das principais fontes antropogênicas de N_2O . Apesar de este GEE estar presente em concentrações menores do que o CO_2 na atmosfera, ele ainda pode ser um contribuinte significativo para as mudanças climáticas devido ao seu elevado potencial de aquecimento global — cerca de 273 vezes maior do que o do CO_2 (Foster et al., 2021). Devido a esse fator, a emissão do gás pode representar um impacto ambiental relevante. Estudos mostram que até 44% das emissões totais de GEE associadas à obtenção de 1 L de etanol de cana-de-açúcar são derivadas da emissão de N_2O derivadas do uso de materiais orgânicos e adubos nitrogenados no campo (Carvalho et al., 2021). Nota-se um elevado potencial de aumento dos níveis de C no solo com o uso de biochars derivados de pinus e eucalipto, os quais elevaram as concentrações de C em 66% e 57%, respectivamente, em comparação aos solos com apenas adubo nitrogenado. Os resultados aqui apresentados demonstram que, independentemente da matéria-prima avaliada, a aplicação de biochar representou uma entrada direta de C no solo, ao mesmo tempo em que mitigou as emissões de N_2O .

Todos os tipos de biochar avaliados neste estudo foram produzidos a partir de algumas das biomassas residuais mais comumente utilizadas para o desenvolvimento de bioprodutos, reforçando seu potencial para uma aplicação mais ampla em estratégias voltadas ao aumento da sustentabilidade em agrossistemas. No entanto, variações na magnitude dos resultados finais aparentam ser influenciadas pela matéria-prima utilizada na produção do biochar. Enquanto o biochar derivado de palha de cana-de-açúcar foi mais eficaz na mitigação das emissões de N_2O , os biochars derivados de resíduos florestais demonstraram maior potencial para aumentar os níveis de C no solo. Portanto, essas distinções devem ser cuidadosamente consideradas em futuros trabalhos voltados à previsão dos impactos ambientais da aplicação de biochar em solos agrícolas.

Principais conclusões

- Independentemente da origem da biomassa, todos os tipos de biochar reduziram as emissões acumuladas de N_2O em 25% a 50% em comparação ao tratamento com fertilizante nitrogenado.
- Todos os biochars aumentaram os teores de C no solo, mas apenas aqueles derivados de resíduos de madeira apresentaram níveis de C superiores aos dos tratamentos CTR e NF.
- A matéria-prima utilizada na produção do biochar é uma variável-chave que deve ser considerada ao se prever os impactos ambientais da sua aplicação no solo.
- Aplicação de biochar pode ser considerada uma solução baseada na natureza para reduzir emissões de N_2O e aumentar os níveis de C em solos tropicais.

9. A APLICAÇÃO DE BIOCHAR NO AUMENTO DA PRODUÇÃO DE SILAGEM E GRÃOS EM LAVOURAS DE MILHO

Contexto

Um ensaio de campo foi conduzido na fazenda Taquara Preta, localizada em Paiva, Minas Gerais, Brasil, e outro na fazenda experimental da COOCAFÉ, no município de Lajinha – MG, com o cultivo de milho, para avaliar a eficácia do biochar como condicionador de solo. A fazenda cultiva milho para produzir silagem e abastecer o rebanho leiteiro, já a cooperativa comercializa e presta assistência técnica para produtores leiteiros. A produção de silagem é uma forma

de reduzir o custo da ração animal, mas os produtores frequentemente são obrigados a comprar silagem devido à baixa produção recorrente nos períodos de seca ou devido à má qualidade do solo. O biochar foi aplicado para melhorar as propriedades do solo¹, visando aumentar a produção de silagem e grãos de milho.

METODOLOGIA

O biochar foi produzido utilizando casca de café como matéria-prima (Tabela 1), após pirólise a aproximadamente 650 °C na fazenda Taquara preta. O ensaio foi implementado em uma área de 1 hectare, na qual 0,5 hectare foi considerado controle, e 0,5 hectare recebeu a dose de 4,2 toneladas de biochar por hectare. Na fazenda experimental da COOCAFÉ, o teste foi realizado em uma área de 0,1 hectare irrigado, aplicando-se 4,8 toneladas por hectare. Em ambos os casos, o biochar foi aplicado a lanço e, em seguida, incorporado ao solo. Após a aplicação e incorporação do biochar, o milho foi semeado e todo o manejo seguiu a rotina já realizada nas propriedades (fertilização, controle de doenças etc.). Na fazenda Taquara Preta, para avaliar o efeito do biochar na produção de biomassa do milho, 4 talhões de 25 m² foram avaliados em cada área 90 dias após o plantio, totalizando 100 m² de área colhida. Como a variedade de milho apresentou dupla aptidão, optou-se por deixar uma parcela para avaliar a produção de grãos, que foi avaliada ao final da colheita. Para isso, foram avaliados 3 talhões de 9 m², colhendo-se as espigas e medindo-se a massa de grãos. Na área experimental foram mensurados diferentes pontos, medindo-se a produção de biomassa em três linhas de 10 m lineares nos diferentes pontos. Após o corte realizou-se a pesagem e cálculo da quantidade de biomassa produzida por hectare.

Propriedades do biochar	Valores
pH (H ₂ O)	10,2
CE (mS/cm)	3,8
C Total	67,3
CTC (mmol _c /kg)	438
P %	0,42
K %	4,09
Ca %	1,23
Mg %	0,34
S %	0,16

Resultados

Na colheita de biomassa para produção de silagem, observou-se que a aplicação de biochar na dose de 4,2 toneladas por hectare promoveu um aumento no desenvolvimento das plantas e na produtividade de silagem (biomassa) (Figura 9.15).

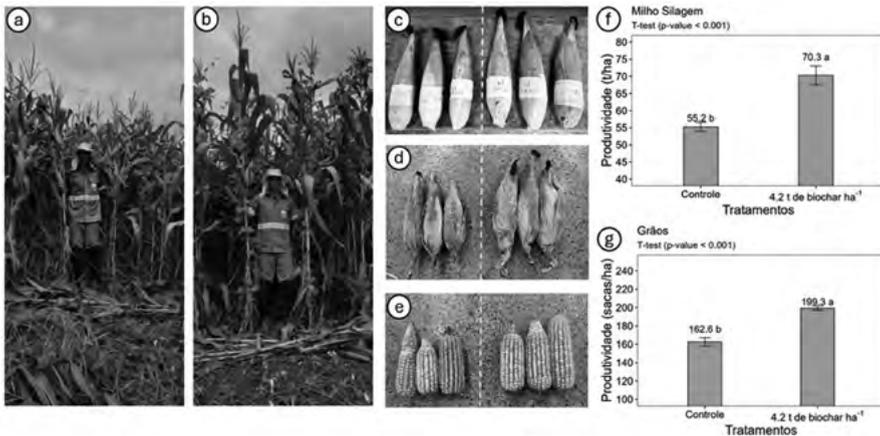


Figura 9.15 – Desenvolvimento de plantas de milho na área controle (a) e com aplicação de biochar (4,2 toneladas por hectare), (b) desenvolvimento de espigas sob o tratamento de controle (esquerda) e aplicação de biochar (direita) (c, d, e), rendimento de biomassa (f) e rendimento de grãos (g).

A produtividade de biomassa para silagem foi 15,1 toneladas maior que o controle, ou seja, aproximadamente 27,4% a mais de biomassa foi produzida (Figura 9.15f). Para a produtividade de grãos, a aplicação de biochar promoveu um aumento de 36,7 sacas por hectare em comparação ao controle, ou um aumento de 22,6% na produtividade de grãos (Figura 9.15g).

A aplicação e incorporação de biochar na dose de 4,8 toneladas por hectare favoreceu um maior desenvolvimento das plantas (Figura 9.16b) quando comparado ao controle (Figura 9.16a), e aumentou a produção de silagem em 12,2 toneladas por hectare (Figura 9.16c).

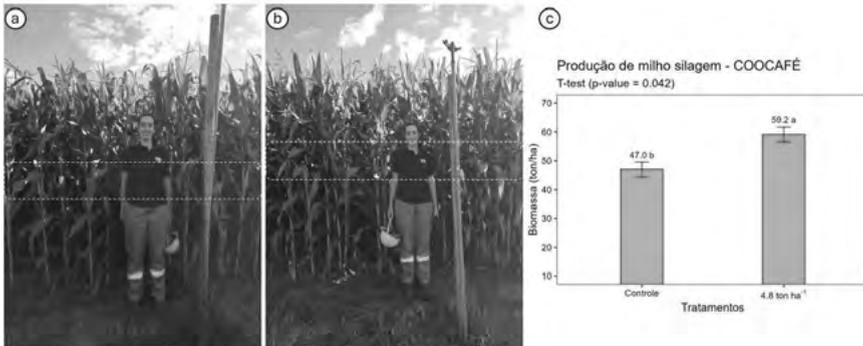


Figura 9.16 – Desenvolvimento de plantas de milho na área de controle (a) e tratadas com biochar (4,8 toneladas por hectare (b) com demarcação da altura das espigas (linha pontilhada), e rendimento de biomassa (c).

O aumento na produção de silagem na fazenda experimental da COOCAFÉ foi de aproximadamente 26%, valor similar ao obtido na fazenda Taquara Preta. Esses resultados mostram o potencial do biochar, independente da condição de cultivo, em melhorar a produção das culturas agrícolas.

Impactos

O uso do biochar como um condicionador do solo favorece um maior aporte de biomassa na cultura do milho, sendo uma estratégia para o produtor na época da seca. A maior produção de biomassa, associada as melhorias das condições de solo promovidas pelo biochar, garantem a sustentabilidade da produção agrícola.

Principais conclusões

- A aplicação de biochar aumentou a biomassa do milho e a produtividade de grãos por hectare em mais de 20%.
- Devido ao baixo valor agregado do milho e da silagem, considerando os resultados aqui apresentados, serão necessários mais de uma safra para que se tenha o retorno do investimento no biochar.
- Devido a possibilidade de 2 safras no ano agrícola esse retorno pode ser mais rápido. Além disso, devido a estabilidade do biochar no solo, não há necessidade de reaplicação, ou seja, seu efeito e durabilidade no solo pode durar décadas.

10. A APLICAÇÃO DE BIOCHAR AUMENTOU A PRODUTIVIDADE DE CAFÉ ARÁBICA NAS MATAS DE MINAS E MONTANHAS DO ESPÍRITO SANTO

Contexto

Ensaio de campo foram conduzidos na fazenda Bom Jardim, localizada em Afonso Cláudio, Espírito Santo, Brasil, e no sítio Canário da Terra, em Humaitá, município de Mutum – MG. Ambos os testes foram realizados em uma plantação de café arábica, para avaliar a eficácia do biochar como condicionador de solo. O estado de Minas Gerais e do Espírito Santo são o primeiro e segundo maiores produtores de café do Brasil respectivamente¹. Nos últimos anos, esses estados têm sofrido com severa escassez hídrica, assim como outros estados e culturas agrícolas no país. Diante disso, o biochar surgiu como uma alternativa para melhorar a sustentabilidade da fazenda, em termos da eficiência do uso de água e nutrientes pelas plantações de café. O biochar foi aplicado para melhorar as propriedades do solo², visando aumentar a produção de café.

Metodologia

O biochar foi produzido utilizando casca de café como matéria-prima (café Robusta – Fazenda Bom Jardim e café arábica – Sítio Canário da Terra) (Tabela 1) após pirólise a aproximadamente 650 °C. Na fazenda Bom Jardim, o experimento foi implementado em uma área de 350 m², cultivada com café arábica, variedade Acauã, no espaçamento de 2 x 0,5 m (10.000 plantas por hectare). Foram utilizados sete tratamentos: controle sem aplicação de biochar; 375 g de biochar por planta com e sem incorporação, 750 g de biochar por planta com e sem incorporação e 1125 g de biochar por planta com e sem incorporação. Cada tratamento foi formado por cinco fileiras com dez plantas, totalizando 50 plantas por tratamento. No sítio Canário da Terra, o experimento foi implantado em uma plantação de café arábica da variedade catucaí 24/137, cultivado com espaçamento de 2,7 x 0,8 m (4.630 plantas por hectare). O ensaio foi implementado em faixas lado a lado com cinco repetições, cada repetição composta por 15 plantas, avaliando-se duas doses de biochar (0 e 560 g por planta) com incorporação do biochar após a aplicação. Após a aplicação e incorporação do biochar, todo o manejo do café seguiu a rotina já realizada nas propriedades (fertilização, controle de

doenças etc.). Para avaliar o efeito do biochar na produtividade do café, o café foi colhido e beneficiado para obtenção da produtividade em grãos secos.

Propriedades do biochar	Valores
pH (H ₂ O)	10,2
CE (mS/cm)	3,8
C Total	67,3
CTC (mmol _c /kg)	438
P %	0,42
K %	4,09
Ca %	1,23
Mg %	0,34
S %	0,16

Resultados

A aplicação de biochar na fazenda Bom Jardim aumentou produtividade do café em mais de 27%, em comparação ao controle (Figura 9.14). A aplicação de biochar na dose mais baixa (375 g planta⁻¹) aumentou a produtividade de grãos de café em 43%, e na dose mais alta (1125 g planta⁻¹), em 65%. A produtividade de grãos de café foi de 7,5 a 18,5 sacas maior que o controle. A forma de aplicação não influenciou os resultados, exceto para maior dose de biochar, que se mostrou mais eficaz quando incorporada. Neste caso, a produtividade de café foi de 20 sacas maior que a do biochar aplicado na superfície.

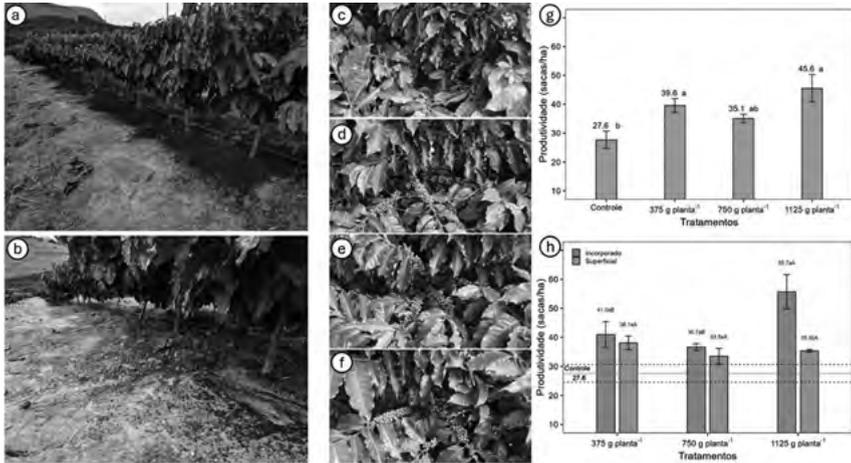


Figura 9.17 – Aplicação de biochar em cafezal com 6 meses após o plantio na forma superficial (a) e incorporada (b), quantidade de grãos nas plantas controle (c) 6 meses após a implementação do ensaio e após a aplicação de biochar nas doses de 375 g por planta (d), 750 g por planta (e) e 1125 g por planta (f), rendimento de grãos devido às doses de biochar (g) e rendimento de grãos devido às doses e forma de aplicação (h).

No sítio Canário da Terra, as plantas de café com aplicação de biochar apresentaram melhor desenvolvimento vegetativo (Figura 9.18d e 9.18e) e maior produção de grãos (Figura 9.18f e 9.18g).

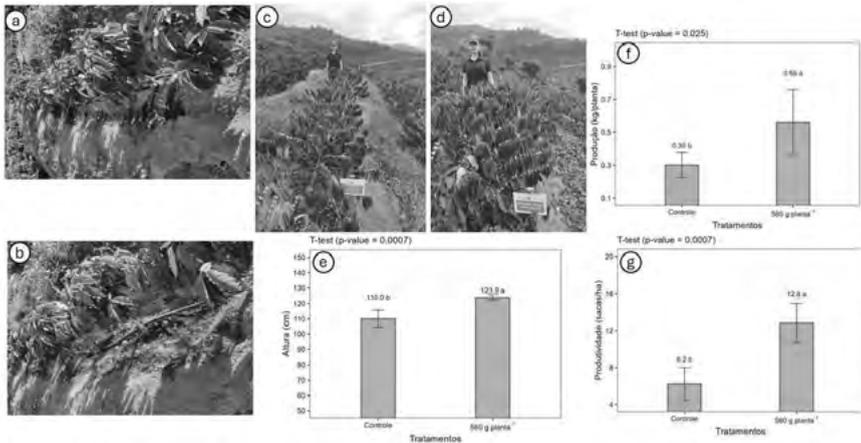


Figura 9.18 – Aplicação de biochar em cafezal com 7 meses após o plantio na forma superficial (a) com posterior incorporação (b), desenvolvimento das plantas sem (c) e com aplicação de biochar (d), altura de plantas (e), produção de café maduro (f) e rendimento de grãos devido a aplicação de biochar (g).

A altura das plantas (Figura 9.17e) na área com aplicação de biochar foi aproximadamente 13,9 cm maior, o que representou um aumento de aproximadamente 12,6% na altura da planta. Em outras palavras, as plantas apresentaram melhor desenvolvimento vegetativo. A produção de grãos de café maduros foi aproximadamente 260 g maior nas plantas com biochar quando comparadas àquelas sem aplicação de biochar (controle) (Figura 9.17f). Esse aumento corresponde a um aumento de 86,7% na produção de café maduro. Em termos de produtividade, a aplicação de biochar promoveu um aumento de 6,6 sacas por hectare em comparação ao controle (Figura 9.17g). Esse aumento representou um incremento de 106% na produtividade da cultura do café na primeira colheita.

Impactos

O uso de biochar promoveu um aumento significativo na produção de café arábica. Provavelmente houve uma melhora na eficiência do uso de água e nutrientes e melhoria na saúde do solo. O aumento na dose de biochar promoveu maior produtividade, mas espera-se menor retorno econômico devido ao custo do biochar. Portanto, uma alternativa para melhorar os lucros seria dividir as altas doses ao longo de vários anos, a fim de reduzir o custo anual. Isso não causaria perdas, uma vez que pequenas doses resultaram em um ganho significativo de produtividade e um alto retorno econômico. Além disso, espera-se que esse comportamento se mantenha ano após ano.

Principais conclusões

- A aplicação de biochar aumentou a produtividade de café por hectare em mais de 27%.
- O biochar pode ter um rápido retorno econômico devido aos ganhos de produtividade e ao valor agregado do café no mercado atualmente.
- Considerando o aumento de produtividade observado nos estudos, dividir a aplicação ao longo de vários anos pode ser uma estratégia para reduzir o custo anual.

11. O USO DO BIOCHAR MELHORA O DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Contexto

A produção de cana-de-açúcar do Brasil para a safra 2024/25 esteve estimada em 677 milhões de toneladas, o que representa uma diminuição de 5,1% em relação à safra anterior. A produtividade média também sofreu queda, com previsão de 77.223 kg/ha, o que representa uma redução de 9,8% comparada à safra anterior¹. Os principais fatores que contribuíram para essa diminuição incluem o impacto das condições climáticas adversas, como baixos índices pluviométricos e altas temperaturas, especialmente nas regiões Centro-Sul, que são responsáveis por 91% da produção nacional. Nesse sentido, o biochar foi aplicado para melhorar as propriedades do solo², visando aumentar a produção de cana-de-açúcar.

Metodologia

O estudo foi implantado na fazenda Taquara Preta, em Paiva, MG na implantação de uma lavoura de cana-de-açúcar, cultivada em um espaçamento de 1,5 m entre linhas. O ensaio foi implantado em faixas lado a lado com cinco repetições. Avaliou-se quatro doses de biochar (0; 5; 7,5 e 10 toneladas por hectare), e três diferentes adubações (sem adubação; adubação mineral e adubação orgânica). O biochar (Tabela 1) foi aplicado em área total (Figura 9.19) e incorporado ao solo na profundidade de 20 cm em 31 de outubro de 2023.

Propriedades do biochar	Valores
pH (H ₂ O)	10,2
CE (mS/cm)	3,8
C Total	67,3
CTC (mmol _c /kg)	438
P %	0,42
K %	4,09
Ca %	1,23
Mg %	0,34
S %	0,16

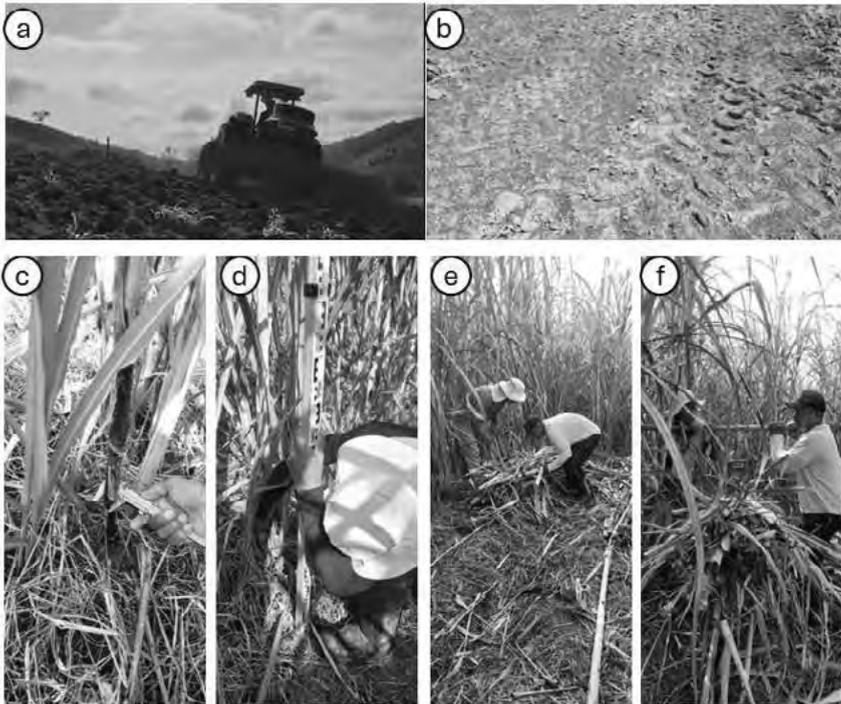


Figura 9.19 – Área experimental com aplicação do biochar (a) e sua distribuição no solo antes da incorporação (b) em uma área para cultivo de cana-de-açúcar; medição dos parâmetros biométricos (c, d) e determinação da produção de biomassa (e, f).

A primeira avaliação foi realizada dia 23 de abril de 2024, aproximadamente seis meses após a aplicação do biochar. Avaliou-se dez plantas em cada repetição, deixando-se plantas como bordaduras entre os tratamentos. Para avaliação do efeito na produção realizou-se cortes dia 23 de julho de 2024 para determinar a produção de biomassa. Como nesta avaliação não se observou efeito dos diferentes fertilizantes nas doses de biochar, optou-se por não apresentar os dados.

Resultados

A aplicação do biochar melhorou o desenvolvimento das plantas de cana de açúcar (Figura 9.20). A aplicação de biochar promoveu plantas entre 30 e 50 cm (9,4 a 15,6%) maiores em estatura que o controle sem biochar (Figura 9.20e).

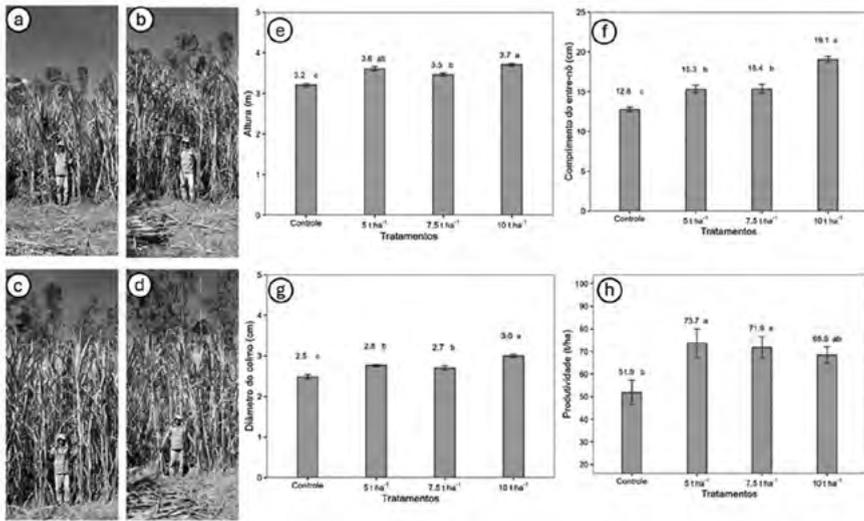


Figura 9.20 – Desenvolvimento das plantas de cana de açúcar no controle (a), 5,0 toneladas por hectare (b), 7,5 toneladas por hectare (c) e 10 toneladas por hectare (d); altura (e), diâmetro do colmo (f), comprimento do entre-nó (g) e produtividade de biomassa em função da aplicação de biochar (h).

O diâmetro do colmo foi maior cerca de 0,2 a 0,5 cm (8 a 20%) (Figura 9.20g), enquanto o comprimento do colmo foi superior entre 2,5 a 6,3 cm (19,5 a 49,2%) (Figura 9.20) quando comparado as plantas sem aplicação de biochar. A produtividade estimada (Figura 9.20h) da cana de açúcar aumentou entre 20 e 21,8 toneladas por hectare, quando comparado ao controle. Na dose de 5 toneladas de biochar o aumento na produtividade foi de 42% e na dose de 7,5 toneladas o aumento foi de 38,5%. Na dose de 10 toneladas por hectare, apesar de não diferir estatisticamente do controle, houve uma média de 16,6 toneladas de incremento na produção de biomassa, ou seja, 32%.

A aplicação do biochar aumentou a produção de caldo em aproximadamente 40% (Figura 9.21a) e aumentou o °Brix em 2,5% (Figura 9.21b).

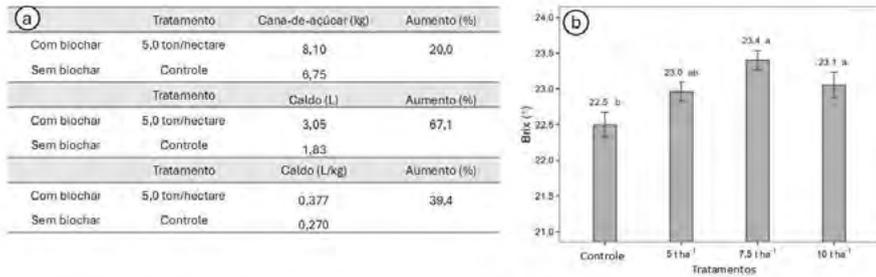


Figura 9.21 – Produção de caldo (a) e °Brix de cana-de-açúcar (b) em função da aplicação de biochar.

Além do aumento de aproximadamente 100 mL de caldo por kg de cana-de-açúcar com uso do biochar, houve um incremento de 0,6 a 0,9 °Brix. Esse aumento representa um acréscimo de aproximadamente 1% do teor de açúcar da cana em função do suso do biochar.

Impactos

O uso do biochar aumentou a produção da cana-de-açúcar, caldo e o °Brix, conseqüentemente aumentando a renda do produtor, devido a maior produção de biomassa e açúcar por área colhida.

Principais conclusões

- A aplicação do biochar aumentou a produção de cana-de-açúcar em mais de 30% e o °Brix em aproximadamente 2,5%.
- Houve o incremento de aproximadamente 1% do conteúdo de açúcar da cana colhida com uso do biochar.

12. O PAPEL DO BIOCHAR NA BIODISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES EM SOLO DE TERRA PRETA E SOLO ADJACENTE DA AMAZÔNIA

Contexto

Nas últimas duas décadas, diversas investigações demonstraram que o carbono pirogênico é um fator-chave para a manutenção de altos níveis de matéria orgânica do solo e nutrientes disponíveis em Terras Pretas Amazônicas (TPA) (Glaser et al. 2001; Glaser et al. 2002). As grandes quantidades

de carbono pirogênico indicam um aporte elevado e prolongado de matéria orgânica carbonizada, provavelmente devido à produção de biochar em fogueiras, enquanto apenas pequenas quantidades de biochar são adicionadas aos solos adjacentes como resultado de incêndios florestais e técnicas de corte e queima (Fearnside et al. 1999; Glaser et al. 2001). Como a quantidade e a qualidade do biochar são as principais diferenças entre as TPAs e os solos adjacentes, é importante entender como essas variáveis afetam a biodisponibilidade de fósforo e outros nutrientes. Assim, os objetivos deste estudo foram (i) avaliar a influência do biochar TPA na biodisponibilidade de P e (ii) determinar o papel do biochar na solubilidade e biodisponibilidade de nutrientes de um Latossolo Amarelo distrófico da Amazônia.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado em laboratório e em casa de vegetação. O biochar do solo TPA foi removido, e moído para passar por uma peneira de 0,50 mm. Uma isoterma de adsorção de P no biochar foi construída (Olsen & Watanabe, 1957). Foram coletadas 5 kg de amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo a 0,250 m de profundidade e misturadas seguindo os tratamentos da Tabela 2. Após dois meses de incubação, amostras de cada tratamento foram coletadas para análise química.

Tabela 2 – Total de biochar, fertilizante químico e cal aplicados em cada tratamento.

Tratamentos	Biochar. ⁽¹⁾	N	P	K	Cal ⁽²⁾	FTE ⁽³⁾
		mg kg ⁻¹			t. ha ⁻¹	g/plot
T1	0	0	0	0	0	0
T2	0	60.0	52.4	50.0	4	0.125
T3	500	0	0	0	0	0
T4	500	60.0	52.4	50.0	4	0.125

FTE BR 24: Fritted traces elements. 0,125 g/parcela com 5 kg de solo, boro: 0,9 mg/kg; cobre: 0,4 mg/kg; ferro: 1,5 mg/kg; manganês: 1,0 mg/kg; molibdênio; Biochar; Biochar moído e Calcário.

Resultados

O biochar pode desempenhar um papel significativo nas reações de sorção/dessorção de P em TPA (Tabela 2). O biochar utilizado neste estudo foi eficiente na adsorção de P e, por grama de material, sorveu P de forma

mais eficiente do que a fração argilosa do Latossolo Vermelho-Amarelo (solo adjacente). Esses resultados sugerem que o biochar pode competir com minerais de argila e óxidos de alumínio e ferro. As figuras 9.22a e 9.22b também mostram que o biochar de diferentes locais de TPA e profundidades do solo apresentam diferentes propriedades de sorção de P.

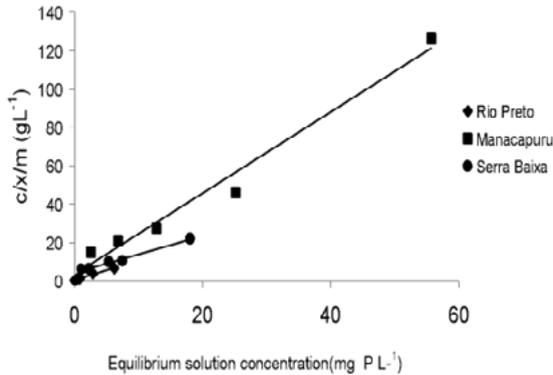


Figura 9.22a – Relação entre a concentração de P na solução de equilíbrio e a adsorção de P pelo biochar coletado de três locais diferentes.

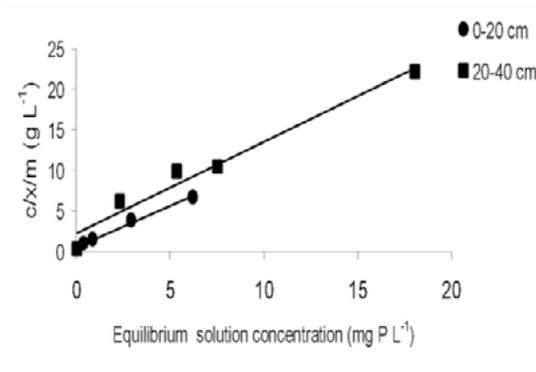


Figura 9.22b – Relação entre a concentração de P na solução de equilíbrio e a adsorção de P pelo biochar coletado em duas profundidades de solo do Rio Preto da Eva.

As capacidades máximas de adsorção variaram de 0,29 a 1,03; uma diferença de mais de três vezes.

Tabela 3 – Equações isotérmicas de Langmuir. Capacidades máximas de adsorção de fósforo (CMAP). Energia de adsorção e fatores de capacidade máxima de fósforo (FCMP) para biochar removido de solos TPA e de solos adjacentes (SA) coletados em três locais. Para Jiquitaia, duas profundidades também são representadas (Falcão et al., 2003).

Material	Equação da regressão $C/(x/m) = A + BX;$ (X = P- solução)	R2	MPAC Mg g ⁻¹	Energia de adsorção L mg ⁻¹	FCMP mL g ⁻¹	Argila ⁽⁸⁾ %	Local
Biochar em TPA							
Jiquitaia (0-0cm) ⁽¹⁾	Y = 1.0133X + 0.5011	0.9903**	0.9868	2.0221	1995	16	2° 37' S 59° 40' W
Jiquitaia (20-40cm) ⁽²⁾	Y = 1.1242X + 2.2431	0.9653**	0.8895	0.5012	446	16	2° 37' S 59° 40' W
Acutuba (0-20cm) ⁽³⁾	Y = 0.9694X + 4.2065	0.9888**	1.0315	0.2304	238	30	3° 30' S 60° 20' W
Laranjal (0-20cm) ⁽⁴⁾	Y = 2.111X + 3.356	0.9770**	0.4737	0.6290	298	48	3° 20' S 60° 30' W
SA							
Tapiré (0-20 cm) ⁽⁵⁾	Y = 7.2696 + 3.3605X	0.997**	0.2975	0.4623	138	58	3° 14' S 60° 07' W
Cairai (0-20 cm) ⁽⁶⁾	Y = 2.1561 + 1.5008X	0.994**	0.6663	0.6961	464	28	5° 25' S 59° 28' W
Laranjal (0-20 m) ⁽⁷⁾	Y = 3.4396 + 1.4125X	0.993**	0.7079	0.4106	291	62	3° 20' S 60° 30' W

** **significância.** 1%. (1,2,3 e 4) Biochar removido de TPA. (5,6 e 7) Solo adjacente. (8) % de argila total em solo TPA e SA

Tabela 4 – Valores de pH, P, K, Ca, Mg, Al e H encontrados nos tratamentos avaliados.

Treat-ments	pH		pH		P		K		Ca		Mg		Al ⁺⁺⁺		H ⁺ + Al ⁺⁺⁺	
	H ₂ O		KCl		mg kg ⁻¹		Cmolc kg ⁻¹									
T1	5.4	c	4.3	c	0.54	b	0.20	b	0.00	c	0.00	a	0.00	a	0.28	a
T2	8.2	b	7.8	b	32.1	b	0.22	b	1.29	ab	0.04	a	0.00	a	0.00	a
T3	9.0	a	8.5	a	30.5	b	0.93	a	2.04	ab	0.28	a	0.00	a	0.00	a
T4	9.0	a	8.5	a	69.4	ab	0.87	a	2.16	a	0.36	a	0.00	a	0.00	a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não são diferentes no nível P=0,05.

Comparando o tratamento controle (T1) com o tratamento que recebeu apenas biochar (T3), o valor do pH aumentou mais de três unidades, aumentando o valor de fósforo disponível para mais de 30 mg kg⁻¹. É importante mencionar que o biochar apresentou extratibilidade de P semelhante ao tratamento (T2), que recebeu apenas fertilizante mineral. Não apenas P,

mas também K, Ca e Mg aumentaram significativamente após a aplicação do biochar, semelhante aos resultados mostrados em estudos de lisímetro (Lehmann et al., 2003). A Tabela 4 mostra que o biochar é um valioso corretivo do solo e fonte de nutrientes.

Impactos

Os dados gerados nos revelam o biochar causando impactos econômicos, especialmente quando se observa o biochar atuando da mesma maneira que o calcário no aumento do pH do solo e na eficiência em adsorver o P, sendo o biochar um material de menor custo e de fácil acesso. Além disso, esses valores de pH podem ser mantidos por mais tempo no solo, mostrando o impacto ambiental do biochar, estocando carbono de forma mais eficiente no solo, favorecendo a biologia do solo e a matéria orgânica, considerando as condições climáticas do estado do Amazonas, além de reduzir a utilização de fertilizantes minerais, fatores que fortalecem a bioeconomia.

Principais conclusões

- A presença do biochar no solo, reflete em melhora significativa no aumento de pH e na disponibilidade de P, comprovando que a alta fertilidade encontrada em solos de terra preta da Amazônia está alicerçada na presença de biochar.
- O biochar é eficiente nos processos de sorção e dessorção de fósforo, podendo ser usado como um valioso corretivo da acidez, aumentando o $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$, diminuindo a acidez trocável (Al^{+++}) e aumentando a biodisponibilidade de fósforo, potássio, o cálcio e o magnésio em solos da Amazônia.

Referências

1. Joseph S. et al. (2015). Feeding biochar to cows: Uma solução inovadora para melhorar a fertilidade do solo e a produtividade agrícola. *Pedosphere* 25:666-679 [doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30047-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30047-3)
2. Robb S., Joseph S. (2020). A report on the value of biochar and wood vinegar (Um relatório sobre o valor do biochar e do vinagre de madeira). ANZBIG anzbig.org/wp-content/uploads/2020/07/ANZBI-2020-A-Report-on-the-Value-of-Biochar-and-Wood-Vinegar-v-1.2.pdf

3. Leng R.A. et al. (2012). O biochar reduz o metano entérico e melhora o crescimento e a conversão alimentar do gado local “Amarelo” alimentado com lascas de raiz de mandioca e folhagem fresca de mandioca. *Livestock Research for Rural Development* 24:199. www.lrrd.org/lrrd24/11/leng24199.htm
4. Biochar Soil Trials Pilot Project Northern Territory, Relatório final, preparado para o Territory Natural Resource Management. Earth Systems, março de 2014 www.agriculture.gov.au/sites/default/files/abares/aclump/documents/Pilot_NT.pdf
5. NSW Department of Primary Industry (2013). Gross margin budget archive.dpi.nsw.gov.au/data/assets/pdf_file/0019/470035/Zucchini-gross-margin-budget.pdf
6. Energy Farmers Australia (2017). Poultry litter biochar for horticulture; A report to Landcare farmchar.com.au/wp-content/uploads/2017-Poultry-Litter-Biochar-for-Horticulture-Final-Report-.pdf
7. Ronix et al. (2021). Biochar da mistura de cama de aviário e finos de carvão vegetal como condicionador de solo: Otimização das condições de preparação por meio da metodologia de superfície de resposta. Relatórios de tecnologia de biorrecursos doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100800
8. USDA. Brasil: relatório anual do café. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, Serviço Agrícola Exterior. Jun. 2023. apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee%20Annual_Brasilia_Brazil_BR2023-0011.pdf
9. Latawiec, A.E., Rodrigues, A.F., Korys, K.A. et al. (2023). Biochar and Forage Peanut improve pastures: Evidence from a field experiment in Brazil. *Agric Ecosyst Environ* 353. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108534>
10. Felipe R.T.A., Rayol B.P., Vasconcelos B.N.F. et al. Sistemas agroflorestais agroecológicos: trajetórias, perspectivas e desafios nos territórios do Brasil. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 18, n°1, 2023.
11. Joseph S., Cowie A. L., Van Zwieten L. et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13, 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
12. Duarte S., Glaser B., Paiva de Lima R., Pelegrino Cerri, C. E. (2019). Chemical, Physical, and Hydraulic Properties as Affected by One Year of Miscanthus Biochar Interaction with Sandy and Loamy Tropical Soils. *Soil Systems*, 3(2), 24. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020024>
13. Higashikawa F.S., Silva C.A., Carducci C.E. et al. (2023). Effects of the Application of Biochar on Soil Fertility Status, and Nutrition and Yield of Onion Grown in a No-Tillage System. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v 69, n. 2, p. 212–227. [doi:10.1080/03650340.2021.1978073](https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1978073).

14. Carvalho J. L. N., Oliveira B. G., Cantarella H. et al. (2021). Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111423>
15. Foster P., Storelvmo T., Armour K. et al. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 923-1054). Cambridge University Press.
16. Gabetto F. P., Tenelli S., Netto-Ferreira J. B. et al. (2025). Biochar from crop residues mitigates N₂O emissions and increases carbon content in tropical soils. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1–17. <https://doi.org/10.1002/bbb.2734>
17. USDA. Brazil: coffee annual report. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. Jun. 2023. <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee%20Annual%20Brazil%20BR2023-0011.pdf>
18. Joseph S., Cowie A. L., Van Zwieten et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13, 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
19. Conab. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Companhia Nacional de Abastecimento. v.12 – safra 2024/25, n.4 – Quarto levantamento, Abril 2025. 45 p.
20. Joseph S., Cowie A. L., Van Zwieten et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13, 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
21. Barber S.A. (1995). *Soil Nutrient Bioavailability. A mechanistic approach*. Wiley & Sons, Inc. New York. *Bodenkundliche Berichte*, 68, 196 pp.
22. Erich M.S. (1991). Agronomic effectiveness of wood ash as a source of phosphorus and potassium. *J. Environ. Qual.* 20: 576-581.
23. Falcão N.P. de S., Comerford N.B., Lehmann J.D. Nutrient Bioavailability of Amazonian Dark Earth Soil – Methodological Challenges. In: Lehmann, J.; Kern, D. C.; Glasser, B.; Woods, W. (Org.). *Amazon Dark Earth, origin, properties and management*. Holanda, 2003, v. 1, p. 255-270.
24. Fearnside P. M., Graca P. M. L., Nilho N. L. et al. (1999). Tropical forest burning in Brazilian Amazonia: measurement of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Altamira, Pará. *For. Ecol. Manage.* 123: 65-79.
25. Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. (2001). The Terra Preta phenomenon – a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88, 37-41.

26. Glaser B., Lehmann J., Steiner C. et al. (2002). Potential of Pyrolyzed Organic Matter in Soil Amelioration. In: Ministry of Water Resources (Ed.), 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China.
27. Isobe K., Fujii H., Tsuboki, Y. (1996). Effect of charcoal on the yield of sweet potato. *Jpn. J. Crop Sci.* 63: 453-459.
28. Kishimoto S., Sugiura G. (1985). Charcoal as a soil conditioner. National Timber Research Institute of the South African Council for Scientific and Industrial Research v.5 pp. 12.23.1-12.23.16. From: Symposium on Forest Products Research International Achievements and the Future.
29. Lehmann J., da Silva Jr. J.P., Steiner C. et al. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* 249: 343-357.
30. Meyers N.L., Kopecky M.J. (1998). Industrial wood ash as a soil amendment for crop production. *Tappi Journal* 81(4): 123-130.
31. Naylor L.M., Schmidt E.J. (1986). Agricultural use of wood ash as a fertilizer and liming material. *Tappi Journal* 69(10): 114-119.
32. Novais R.F., Smyth T.J. (1999). Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 399p.
33. Olsen S.R., Watanabe F.S. (1957). A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir Isotherm. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21:144-149.

CAPÍTULO 10

Biochar para agricultura regenerativa

Pontos principais

- O uso de biochar junto à prática agrícola regenerativa pode reduzir o tempo e os custos envolvidos na restauração de solos degradados em terras produtivas.
- O uso de biochar pode ser integrado à criação de animais para melhorar a saúde dos animais, reduzir odores e emissões de gases de efeito estufa e aumentar a produtividade das pastagens.
- A alimentação de ruminantes com biochar pode ser combinada com a introdução de novas espécies de besouros rola-bosta que processam ainda mais o biochar e podem incorporá-lo profundamente no perfil do solo. O biochar equilibra o esterco e o torna mais atraente para os besouros rola-bosta, que são prejudicados por toxinas, antibióticos e vermes.
- O biochar fornecido aos animais deve atender aos padrões de alimentação aplicáveis aos animais. Assegure-se de que o biochar para alimentação animal seja de alta qualidade, livre de contaminantes, seguro, adequadamente formulado, testado e monitorado, de acordo com diretrizes regulatórias.
- A aplicação de biomassa, composto, minerais, ácido pirolenhoso e biochar em trincheiras e ao redor de árvores pode aumentar o crescimento das plantas e sua resistência a doenças.
- A produção de biochar na fazenda a partir de resíduos da própria fazenda e o uso da energia do gás de síntese com integração de sistemas de energia fotovoltaica podem aumentar a lucratividade da fazenda e reduzir sua emissão de gases de efeito estufa.
- A aplicação de compostos líquidos com biochar em pastagens existentes pode aumentar o crescimento nas baixas estações.
- A integração de práticas indígenas de manejo de incêndios com a aplicação de biochar poderia reduzir os danos causados por incêndios florestais.

INTRODUÇÃO

O biochar pode desempenhar um papel fundamental na agricultura regenerativa, que visa restaurar os solos e aumentar a biodiversidade, ao mesmo tempo em que garante a prosperidade do agricultor. A integração do biochar a essa abordagem é relativamente nova, mas oferece benefícios significativos. O biochar proporciona o pontapé inicial na regeneração do solo e mantém a saúde e a produtividade do solo ao longo do tempo, o uso contínuo de biochar também promove benefícios adicionais ao solo, como por exemplo o aumento da capacidade de retenção de água. O que leva ao acúmulo de carbono estável e disponível no solo, expandindo assim os valores associados a créditos de carbono, serviços ecossistêmicos, biodiversidade e resistência à seca e às mudanças climáticas. Neste capítulo, explicamos como o biochar pode ser integrado à agricultura regenerativa e destacamos seus benefícios em áreas rurais e para agricultores por meio de alguns exemplos e estudos de caso.

BENEFÍCIOS DO BIOCHAR NA AGRICULTURA REGENERATIVA

A integração de biochars em iniciativas de agricultura regenerativa pode ajudar no sucesso e na longevidade da transição da prática agrícola convencional, reduzindo custos, aumentando a quantidade e a qualidade da produção agrícola, melhorando a resiliência e garantindo maior lucratividade.^{1,2,3} Nem todos os biochars serão eficazes em uma iniciativa regenerativa específica. Os biochars precisam ser projetados, formulados e testados em várias taxas de aplicação para garantir a eficácia e a lucratividade no contexto de solos, culturas, restrições e condições climáticas específicas da propriedade rural. Conforme detalhado no Capítulo 8, os biochars podem apresentar diferentes relações dose-resposta, sendo eficazes em uma taxa de aplicação ideal, ineficazes em uma taxa muito baixa e até mesmo prejudiciais às culturas e ao solo, ou não rentáveis, em uma taxa muito alta. Portanto, as taxas de aplicação do biochar podem ser tão importantes quanto sua concepção, considerando desde seu material de origem até o produto final. Chamaremos o biochar que é estrategicamente direcionado e aplicado em uma taxa eficaz de biochar adequado para a finalidade (APF).

A aplicação de biochar líquido e sólido de APF, organominerais complexados com biochar (BOMC) e fertilizantes compostos com biochar (BCF) pode auxiliar e promover uma transição regenerativa por meio de sua capacidade de:

- Catalisar o acúmulo de carbono no solo,
- Promover a abundância de micróbios promotores de crescimento,
- Aumentar a capacidade de retenção de água do solo,
- Melhorar a eficiência do uso de nutrientes,
- Aumentar a resistência a doenças e outros estresses ambientais, como altas temperaturas,
- Reduzir o escoamento e a perda de nutrientes,
- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa,
- Reduzir a toxicidade do solo,
- Atuar como uma barreira contra a entrada de água com alto teor de sal ou substâncias tóxicas,
- Controle de ervas daninhas e pragas (usando ácido pirolenhoso),
- Incorporar e agregar valor a resíduos agrícolas.

Esses atributos do biochar APF se combinam para dar suporte:

- **Melhoria da saúde do solo:** Promovendo a vitalidade geral do solo e a resiliência agrícola.
- **Aprimorando a performance produtiva:** Promovendo maior produtividade, qualidade, resistência a doenças e resiliência a estresses ambientais, garantindo uma produção agrícola robusta.
- **Redução da dependência de insumos externos:** Aumentando a retenção, disponibilidade e eficiência dos nutrientes, bem como a redução das perdas de nutrientes, diminui significativamente a necessidade de insumos externos, como fertilizantes e agroquímicos, e promove um sistema agrícola mais autossuficiente.
- **Impacto ambiental atenuado:** Redução das emissões de gases de efeito estufa, do escoamento e da perda de nutrientes e da toxidez do solo, agindo como um tampão, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, que será cada vez mais valorizada e recompensada pela sociedade.
- **Manejo de ervas daninhas e pragas:** O uso do ácido pirolenhoso, em conjunto com a redução do uso de outros herbicidas, pode reduzir perdas e despesas e aumentar a produtividade de pastagens e culturas agrícolas. Em especial, a redução do uso de determinados produtos químicos permite que os micróbios que promovem o crescimento se restabeleçam.

- **Gerenciamento de água:** A maior parte do biochar produzido em temperaturas acima de 450 °C-500 °C atua como uma barreira para a águas contaminadas com alto teor de sais ou substâncias tóxicas, e facilita a absorção de água atmosférica, livre de contaminantes, podendo reduzir o risco de incêndios graves, auxiliando, assim, em práticas eficazes de gerenciamento de água.
- **Gerenciamento de resíduos:** O biochar é melhor produzido a partir de resíduos agrícolas (destacando que a produção de biochar deve ser equilibrada com outros usos benéficos dos resíduos agrícolas, como compostagem). As propriedades do biochar podem ser aprimoradas quando associado à resíduos minerais, na compostagem ou adicionado à ração animal.
- **Restauração de solos degradados:** Solos degradados podem ser restaurados para serviços ecossistêmicos e produção de alimentos e fibras, fazendo uma grande contribuição para a resiliência de áreas agrícolas e, certamente, para a resiliência do planeta de forma geral.
- **Maior lucratividade:** a incorporação do biochar em práticas agrícolas regenerativas pode aumentar os lucros dos agricultores, principalmente quando o biochar é produzido na fazenda a partir de resíduos agrícolas, minimizando assim os custos de produção e maximizando os retornos.

Os benefícios financeiros da incorporação assumem muitas formas, inclusive os decorrentes da redução dos custos de insumos; do aumento da produtividade e da qualidade das culturas; da melhoria da resistência a doenças; do aumento da tolerância a secas, incêndios e mudanças climáticas; da melhoria da fertilidade, da remediação da terra, da remediação da água, do controle da poluição, da produção de calor e energia e dos créditos de carbono. Outros créditos ambientais serão monetizáveis no futuro, à medida que seu valor for reconhecido pela sociedade. Mesmo agora, essas ações ambientais são favoráveis às relações entre o consumidor e o produtor rural e suas práticas conservacionistas, benéficas em termos da boa vontade que geram na rede de clientes da fazenda e nas relações com a comunidade.

Todos esses benefícios ressaltam o potencial transformador do biochar de APF na agricultura regenerativa. A incorporação do biochar de APF na agricultura regenerativa oferece um caminho sustentável para o rejuvenescimento do solo, a conservação da biodiversidade e a prosperidade agrícola.

INCORPORAÇÃO DE BIOCHAR NA AGRICULTURA REGENERATIVA

O biochar pode ser incorporado aos sistemas agrícolas regenerativos por meio de vários métodos, alguns bastante inovadores. Aqui reunimos algumas das muitas maneiras de usar o biochar que foram apresentadas em outros capítulos.

Revestimento de sementes: Adicionar determinadas quantidades de biochar como revestimento de sementes, de diversos tipos, antes da semeadura, melhora as taxas de germinação e o estabelecimento das mudas. Os recursos de retenção de umidade do biochar criam condições favoráveis para o crescimento das mudas sem a necessidade de equipamentos ou etapas de processamento adicionais.

Fornecimento aprimorado de nutrientes: A suplementação do biochar com bioinsumos (biofertilizantes, compostagem, vermicompostagem, farinha de penas, algas, algas marinhas, extrato de peixe e esterco) amplia ainda mais seus benefícios. Essas combinações não apenas enriquecem o solo, mas também estimulam a atividade microbiana, promovendo a ciclagem de nutrientes e a vitalidade do solo.

Co-compostagem: Os benefícios multifacetados da co-compostagem de biochar e biomassa são discutidos em uma seção posterior deste capítulo.

Manejo de esterco: O biochar é um complemento valioso para as práticas de gerenciamento de esterco, pois controla os odores e aumenta a retenção de nutrientes. O biochar adicionado aos currais de animais é incorporado ao esterco pela ação do casco do animal, produzindo facilmente um biochar aprimorado, rico em nutrientes e com baixo odor para ser espalhado no campo.

Manejo de ervas daninhas e pragas usando ácido pirolenhoso: O ácido pirolenhoso em combinação com outros herbicidas e pesticidas pode reduzir as perdas de pastagens e culturas, aumentar a abundância de micróbios promotores de crescimento e aumentar a produtividade.

Alimentação animal: A adição de uma pequena percentagem de biochar na ração animal pode aumentar a saúde e a produtividade dos animais e produzir um esterco enriquecido para ser incorporado nas áreas agrícolas. Em particular, a alimentação de ruminantes com biochar, juntamente com a introdução de novas espécies de besouros rola-bosta, pode aumentar a produtividade das pastagens e aumentar o estoque de carbono no solo.

Integração do pastoreio com feno: A combinação da aplicação de biochar com os fardos de feno facilita a saúde e a produtividade dos animais, bem como o enriquecimento e a regeneração do solo. Um método fácil é espalhar o biochar na superfície do solo e colocar os fardos diretamente em cima. A ação dos cascos integra o biochar, o esterco e os resíduos de sementes de feno ao solo, rejuvenescendo efetivamente as áreas improdutivas. A introdução de novas espécies de besouros rola-bosta ajudará na incorporação de resíduos de biochar, esterco e feno no perfil do solo. (Essa prática é comum na Austrália e pode ser uma alternativa para as épocas de escassez de pasto no Brasil e países de criação animal).

Utilização de calor: A integração da energia excedente da produção de biochar aos requisitos de energia da propriedade rural reduz a dependência de combustíveis fósseis e diminui a emissão de gases de efeito estufa da atividade agrícola. O calor excedente gerado durante a pirólise da biomassa para a produção de biochar pode ser aproveitado para secar ou processar colheitas, aquecer estufas e galpões de animais, ou até mesmo gerar eletricidade.

Utilização de resíduos: A produção de biochar a partir de resíduos agrícolas permite a utilização eficiente dos resíduos e, ao mesmo tempo, gera valiosos corretivos para o solo.

Sequestro de carbono: A conversão de resíduos de matérias-primas em carbono estável e sua incorporação ao sistema agrícola para qualquer um dos benefícios e práticas acima também tem o potencial de gerar créditos de carbono. Os créditos de carbono podem ser gerados pelo sequestro do carbono estável no biochar e pelo carbono orgânico adicional do solo estimulado e protegido pelo envelhecimento do biochar. Esses créditos podem ter um valor significativamente maior do que os de outras práticas baseadas no solo e também podem aumentar os créditos ambientais da fazenda em sua comunidade.

EXEMPLOS DE INTEGRAÇÃO DE BIOCHAR COM PRÁTICAS REGENERATIVAS

Nesta seção, reunimos e descrevemos alguns exemplos inovadores de utilização do biochar em práticas regenerativas e serviços ecossistêmicos.

Exemplo 1: Co-compostagem de biochar com biomassa

O biochar pode ser incorporado aos processos de compostagem na atividade agrícola de várias maneiras. A melhor escolha de método depende da localização, do clima, do solo, dos tipos de plantas, das doenças das plantas e dos objetivos. O biochar pode ser adicionado após o processo de compostagem, antes da adição do composto ao solo, assim o composto e o biochar envelhecerão e se aperfeiçoarão mutuamente no solo. Como alternativa, o biochar pode ser misturado com a biomassa no início do processo de compostagem, o que melhora o processo de compostagem. Quando adicionado ao solo, o produto final co-compostado é mais benéfico do que o composto e o biochar produzidos separadamente.^{4,5} A co-compostagem tornou-se popular devido aos múltiplos benefícios que proporciona tanto ao composto quanto ao biochar, que se traduzem em maiores benefícios para a microbiota, o solo e as plantas.

O processo de compostagem gera calor, que evapora a água do substrato. Isso pode fazer com que o composto fique muito seco. Quando esse composto seco é aplicado ao solo, ele pode causar danos ao absorver a água do solo. A co-compostagem com biochar ajuda na retenção de água durante todo o processo de compostagem, resultando na redução da perda de água e em uma maior capacidade de retenção de água. Além disso, o biochar pode ser adicionado a substratos com excesso de água, reduzindo o teor de umidade a um nível adequado e gerenciável.

Além disso, a natureza porosa de alguns biochars permite maior fluxo de oxigênio, o que aumenta o crescimento microbiano durante a fase de compostagem. Isso, por sua vez, geralmente permite que o co-composto seja um melhor absorvedor de amônia e sulfeto de hidrogênio liberados pelas atividades microbianas. A presença de grupos funcionais adicionais na superfície do biochar co-composto reduz a lixiviação de nutrientes do composto quando adicionado ao solo. A porosidade e as superfícies ativas do biochar co-composto e da matéria orgânica ajudam a reduzir a presença de toxicidades no solo. Os biochars produzidos em altas temperaturas têm

alta capacidade de sorção e são úteis para imobilizar contaminantes orgânicos e inorgânicos, inclusive metais pesados. Os biochars de alta temperatura e alto teor de cinzas também tendem a ter alto pH e maior capacidade de calagem, o que pode elevar o pH de solos ácidos e ajudar a reduzir a disponibilidade de contaminantes. A co-compostagem ajuda a neutralizar o pH do biochar e a aumentar a matéria orgânica dissolvida no solo, melhorando a qualidade geral do solo. A aplicação de biochar co-compostado em solos de cultivo aumenta a degradação do carbono orgânico dissolvido em relação ao composto regular.

A quantidade de biochar adicionada à biomassa deve variar entre 5 e 20% (em uma base seca). Não há consenso sobre a taxa ideal. Do ponto de vista financeiro, a adição de 5% de biochar pode proporcionar o maior retorno para o agricultor, mas 10 a 20% pode ser o ideal para o sequestro de carbono.

Uma questão que precisa ser considerada é a manutenção de uma relação C/N ideal. A adição de uma alta porcentagem de biochar de madeira resultará em um excesso de carbono na pilha de composto. Taxas mais altas (até 20%) de um biochar com alto teor de N, como o biochar de esterco de aves produzido em baixa temperatura, podem garantir que a relação C/N permaneça ideal (aproximadamente 30:1). É importante que o agricultor faça experimentos com diferentes proporções para garantir a produção de um produto econômico.

Exemplo 2: Co-compostagem em sulcos e poços para armazenar carbono e água no solo

A compostagem de biomassa com biochar pode ser realizada de forma eficaz em áreas rurais, plantações de árvores e áreas de remediação em poços (figura 10.3) e trincheiras no solo, bem como nos campos. As trincheiras e os poços, onde a biomassa é lentamente transformada em composto catalisado pelo biochar, atuam como reservatórios que liberam lentamente nutrientes e água e criam diversas comunidades microbianas. As trincheiras podem ser usadas como barreiras reativas para controlar o movimento de água salgada, carregada de nutrientes ou contaminada.

A Figura 10.1 resume algumas aplicações potenciais das trincheiras de biochar e outros métodos de uso do biochar em práticas agrícolas regenerativas.

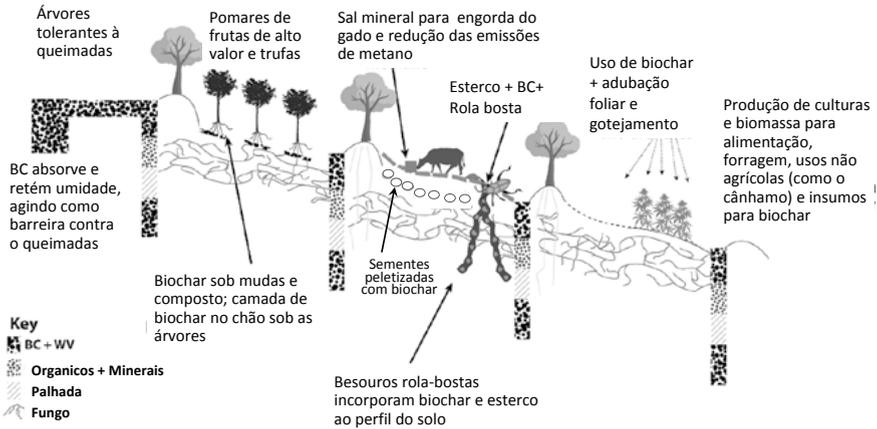


Figura 10.1 – Aplicação de trincheiras de biochar juntamente com alguns outros usos do biochar em práticas agrícolas regenerativas (Joseph). BC = biochar. WV = vinagre de madeira.

Exemplo 3: Biochar em sulcos como uma barreira reativa para remediar a terra e a água

Um teste realizado em área de produção de alimentos e sândalo, de 1,8 hectares na Austrália Ocidental, demonstrou a capacidade do biochar de reduzir os impactos da salinidade excessiva sobre as plantas em solos salinos (Figura 10.2). O biochar atuou como um tampão reativo permeável, que permitiu a remediação de médio e longo prazo nestes solos.⁶



Figura 10.2 – Estudo de caso: Remediação com biochar de solos afetados por sal na Austrália Ocidental. **À esquerda:** Solo inicial de baixa qualidade e incrustado de sal. **À direita:** O mesmo local dois anos após a instalação de poços de carvão e sulcos preenchidos com biochar-mineral-biomassa (área preta na foto à direita).⁶

Trata-se de solo franco-argiloso com cascalho que estava sendo afetado pelo sal já havia algum tempo. Anteriormente, foram introduzidas plantas tolerantes ao sal e a terra afetada foi coberta com palha para minimizar a evaporação. Os gerentes anteriores da fazenda também instalaram uma vala agrícola subterrânea para lixiviar as águas subterrâneas salinas. No entanto, após quatro anos, a bomba falhou, provavelmente devido a sedimentos finos que causaram bloqueios.

Para superar as restrições do solo, foram perfurados poços de carvão com 15 cm de diâmetro a uma profundidade de 30 cm adjacente às mudas de árvores, a cerca de 50 cm da base do tubo-estoque (veja a Figura 10.3). Os poços reativos foram preenchidos com biochar, combinado com vários aditivos naturais (incluindo aminoácidos de peixe, cálcio solúvel em água, bactérias de ácido láctico e nutrientes de ervas orientais). Os poços de carvão desenvolveram uma alta abundância de fungos e bactérias benéficas, que, por sua vez, promoveram um novo crescimento e permitiram que a água do lago acessasse o perfil do solo, resultando em uma drenagem mais rápida e maior capacidade de retenção de água.

Foi realizado um teste para avaliar a eficácia com que o biochar, combinado com vários aditivos naturais, poderia servir como uma barreira reativa permeável contra o escoamento de água salgada e o estresse, além de proporcionar uma remediação de longo prazo para o solo afetado pelo sal. Foram escavadas trincheiras com 800 mm de profundidade e 150 mm de largura cada, posicionadas a um metro de distância de uma árvore em crescimento. Em seguida, essas trincheiras foram preenchidas com camadas de palha e biochar, juntamente com diferentes combinações de ingredientes naturais adicionais para criar cinco tratamentos experimentais distintos rotulados como T1 a T5 na tabela abaixo. A água de melação e o ácido pirolenhoso foram introduzidos no experimento para melhorar as populações microbiológicas e o desenvolvimento das raízes, promover a germinação das sementes, aumentar a fotossíntese, repelir pragas e evitar a infecção das plantas por doenças fúngicas, bacterianas e virais.

Ingredientes para poços ou trincheiras de carvão	T1	T2	T3	T4	T5
Palha	Y	Y	Y	Y	Y
Biochar (madeira de jarrah)	Y	Y	Y	Y	Y
Bactérias do ácido láctico	Y		Y	Y	Y
Vinagre de madeira	Y		Y		
EM-1	Y			Y	Y
Melaço	Y		Y	Y	Y
Chorume de húmus de minhoca	Y				
Urina fermentada	Y				Y

Cada trincheira tinha quatro camadas: 150 mm de cobertura de solo superficial, 100 mm de uma mistura de biochar, 200 mm de palha de trigo e 100 mm da mistura de biochar. Uma trincheira foi preenchida com solo para servir de controle (T6). As espécies de árvores plantadas na frente dos tratamentos incluíram *Eucalyptus erythrocorys*, *Eucalyptus preissiana*, *Eucalyptus pleurocarpa*, *Grevillea olivacea*, *Hakea petiolaris*, *Eucalyptus kruseana*, *Grevillea* Robyn Gordon e Frost Kill *Hakea baxteri*. Essas árvores foram plantadas ao lado dos buracos dos poços de carvão e das trincheiras.



Figura 10.3 – Estudo de caso: Remediação com biochar de solos afetados por sal na Austrália Ocidental. **Acima:** Perfuração de buracos perto do plantio de árvores e preenchimento com matéria orgânica, minerais, biochar e vinagre de madeira. **Ao centro:** Alguns dos mais de 3.000 poços de carvão. **Embaixo:** Dois anos depois.⁶

Um ano após o estabelecimento dos tratamentos, os níveis de salinidade do solo foram significativamente reduzidos. As análises do solo antes e depois demonstraram que os níveis de pH, carbono, nitrogênio, fósforo e biomassa microbiana aumentaram no solo ao redor das trincheiras tratadas com biochar em comparação com os níveis do solo de controle não tratado. O resultado mais notável do teste após um ano foi a redução do acúmulo de água nas seções inferiores da fazenda. Os poços também aumentaram o crescimento das plantas e reduziram parcialmente as doenças que podem ser transmitidas pelo solo e o ataque de insetos. As árvores envolvidas no teste estavam todas saudáveis e nenhuma mostrou sinais de ter sido afetada pela salinidade.⁶

Principais conclusões

Após um ano, os poços de biochar permeáveis:

- Promoveram o crescimento acelerado da planta.
- Reduziram o acúmulo de água.
- Aumentaram a resistência contra doenças transmitidas pelo solo e ataques de insetos.
- Reduziram ou eliminaram os problemas de saúde do solo causados pela salinidade.
- Reduziram os níveis de salinidade do solo e aumentaram os níveis de carbono e nitrogênio.

EXEMPLO 4: PASTAGEM REGENERATIVA

As práticas de pastagens regenerativas e sustentáveis envolvem a divisão de uma propriedade em piquetes menores com o pastoreio rotativo. A curta duração da pastagem combinada com um período mais longo planejado de recuperação, reduz o excesso de pastagem de espécies desejáveis. Uma densidade maior de animais pode resultar em uma pastagem mais uniforme em cada piquete. O cultivo perene é frequentemente integrado a essa prática de pastagem.

A incorporação do biochar na produção sustentável de gado:

- Reduz ou elimina significativamente os insumos externos de fertilizantes e outros agroquímicos,
- Reduz as emissões de gases de efeito estufa,
- Ajuda a restaurar terras degradadas.

Ao alimentar os animais com biochar*, certifique-se de que ele seja de alta qualidade, livre de contaminantes e produzido a partir de matérias-primas seguras por meio de pirólise controlada. Verifique a segurança química e microbiana do biochar para evitar disseminar patógenos e produtos químicos nocivos. Use tamanhos de partículas adequados para minimizar os riscos respiratórios e consulte um nutricionista para obter a formulação adequada da ração. Ao usar um pó, misture-o com melão ou glicerol; misture-o diretamente na ração; produza-o como uma formulação líquida; ou produza um pellet. Realize testes em pequena escala com a ração e cumpra as diretrizes regulatórias nacionais. Monitore a saúde e o desempenho dos animais para detectar quaisquer efeitos adversos.

Alimentar os animais com biochar e adicionar besouros do tipo rola-bosta ao pasto aprimora ainda mais essas práticas regenerativas de pastoreio e pastagem. Durante todo o ano, os besouros de esterco movem ativamente o esterco com biochar para o perfil do solo. O esterco que contém biochar tem menor teor de umidade, não se decompõe tão rapidamente e emite menos gases de efeito estufa.²

A adição de biochar em misturas de ração para vacas e ovelhas ajuda no crescimento animal e reduz a emissão de metano e N₂O do esterco. Tipos específicos de biochar adicionados à ração do gado melhoraram o crescimento muscular do gado e aumentaram a produção de leite. O biochar fornecido às galinhas aumentou a solidez e a espessura da casca do ovo. Além disso, a adição de biochar à ração do gado agiu como um antibiótico, reduzindo a necessidade de medicamentos sintéticos para os animais e melhorando a saúde e a resistência contra doenças e enfermidades.³ Para obter mais detalhes sobre um estudo de caso usando biochar ração animal, consulte o Capítulo 9.

*Este estudo foi conduzido na Austrália, onde já se usa biochar na alimentação animal. No Brasil, testes e estudos devem ser feitos para comprovar sua segurança e eficácia.

EXEMPLO 5: APLICAÇÃO DE BIOCHAR LÍQUIDO EM PASTAGENS

A Southern Cross University (SCU) e o Australian New Zealand Biochar Industries Group (ANZBIG) realizaram um teste em uma fazenda em Mallanganee, NSW, para investigar a aplicação de biochar líquido no solo e na produção de pastagens. O biochar combinado com um fertilizante líquido orgânico (marca Charlie Carp; T3) ou com um fertilizante líquido

inorgânico NPK (T4; Figura 10.4) foi comparado com somente fertilizante (NPK), biochar líquido, somente esterco, e biochar misturado com esterco na forma sólida. O NPK total para cada tratamento foi igualado ao conteúdo de NPK na aplicação de esterco a 10 t/ha. Isso equivaleu a N = 92 kg/ha; P = 26,23 kg/ha e K = 41,78 kg/ha.

O tratamento e a primeira colheita do pasto ocorreram em um período de precipitação muito baixa. Na primeira colheita, o biochar líquido com NPK (T4) produziu taxas de crescimento da pastagem três a quatro vezes maiores do que as taxas após a aplicação de biochar líquido puro (T7) ou biochar-esterco (T5), e mais de duas vezes maiores do que as taxas após a aplicação de NPK sozinho (T2) ou biochar sólido com NPK (T6). Essas observações indicam uma resiliência muito maior em condições de seca devido à disponibilidade dos nutrientes e à promoção de atividade microbiana do tratamento com biochar líquido + NPK.

Para a segunda colheita a precipitação estava mais próxima da normalidade, e a produtividade do pasto de controle foi aproximadamente o dobro. Novamente, não houve diferenças entre o controle sem aditivos (T1), o esterco (T5) e o biochar puro (T7), e todos eles foram superados por um ou dois fatores dos tratamentos de biochar + nutrientes (T3, T4, T6). Entretanto, não houve diferença significativa entre esses tratamentos de biochar + nutrientes e o NPK puro (T2). O aumento da precipitação poderia resultar em mais dissolução dos macro e micronutrientes; no entanto, os dados do solo no momento dessas duas colheitas seriam necessários para maiores esclarecimentos. Um webinar com os resultados completos pode ser encontrado em www.youtube.com/watch?v=rGS9459YTpU

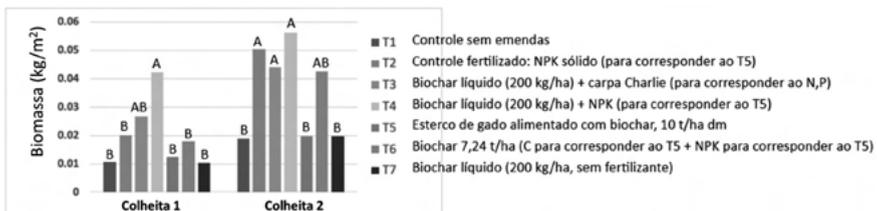


Figura 10.4 – Testes de biochar líquido com e sem aditivos em uma área agrícola em Mallangane, NSW. As duas coletas para análise do pasto foram feitas após uma única aplicação dos tratamentos, durante um período de baixa precipitação. Somente os resultados marcados com letras distintas são significativamente diferentes (por exemplo, na colheita 1, somente o tratamento T4 é significativamente maior do que os outros) (Dados adaptados da Southern Cross University e do Australian New Zealand Biochar Industries Group)

EXEMPLO 6: USO DO CALOR PROVENIENTE DA PIRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE BIOCHAR

O calor extra produzido pela pirólise da biomassa pode ser usado para secar ou processar culturas e aquecer estufas e galpões de animais. Também pode ser usado para operar resfriadores de adsorção e resfriar galpões de animais. Com mais sofisticação, o excesso de energia pode ser utilizado para produzir eletricidade. A integração da energia liberada durante a produção de biochar para suprir algumas das necessidades energéticas no sistema produtivo reduz a dependência de combustíveis fósseis e a emissão geral de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que melhora o solo e reduz o uso de fertilizantes.⁷ A Figura 10.5 ilustra a integração do biochar na produção de energia e o balanço de carbono na propriedade rural.

Os sistemas que aproveitam tanto o biochar quanto a energia produzida são chamados de *Combined Heat and Biochar* ou CHAB (*biochar e calor associados*). Em geral, sempre que possível na produção de biochar, seja na fazenda ou comercialmente, os sistemas CHAB devem ser projetados, implementados e promovidos para aumentar a eficiência dos recursos, a lucratividade e a capacidade regenerativa dos sistemas de biochar.

Esse uso combinado de calor e biochar reduz a dependência de combustíveis fósseis e diminui as emissões de gases de efeito estufa da fazenda.

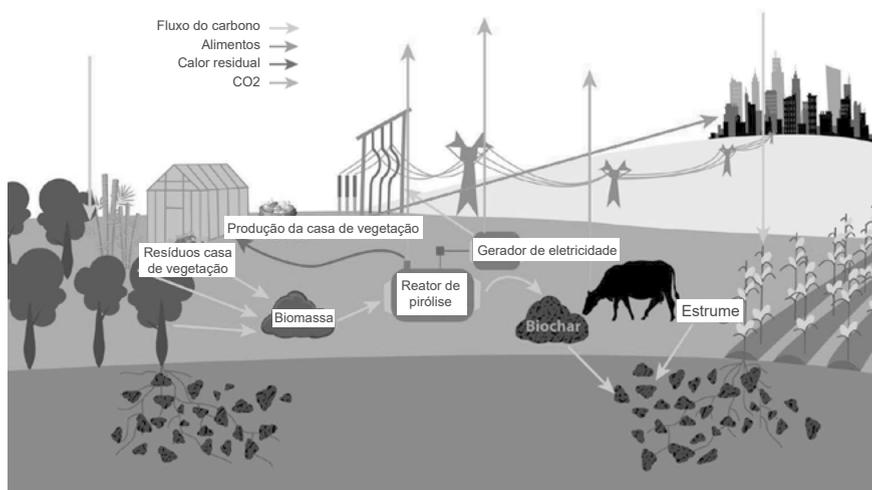


Figura 10.5 – Potenciais formas de utilização de energia e fluxos de carbono para calor, eletricidade e de biochar gerados durante a pirólise de biomassa.⁸

EXEMPLO 7: INTEGRAÇÃO DE BIOCHAR COM ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA EM ÁREAS RURAIS

O biochar integrado a sistemas solares e eólicos nas áreas rurais reduz a emissão de gases do efeito estufa desses sistemas e garante que os solos sob e ao redor da energia renovável permaneçam produtivos para o cultivo de alimentos ou pastagens.

O biochar pode ser incorporado ao concreto e ao pavimento usados em edifícios e estradas em fazendas de energia renovável. As trincheiras de biochar colocadas sob a borda de gotejamento dos painéis solares captam e armazenam a água condensada nos painéis à noite. Isso aumenta a produção de alimentos sob os painéis e a produção de pasto entre os painéis (Figura 10.6). O biochar também pode absorver a umidade da atmosfera e, potencialmente, os painéis poderiam ser mantidos mais frios devido à biomassa extra, à umidade e ao vapor de água ao redor dos painéis.

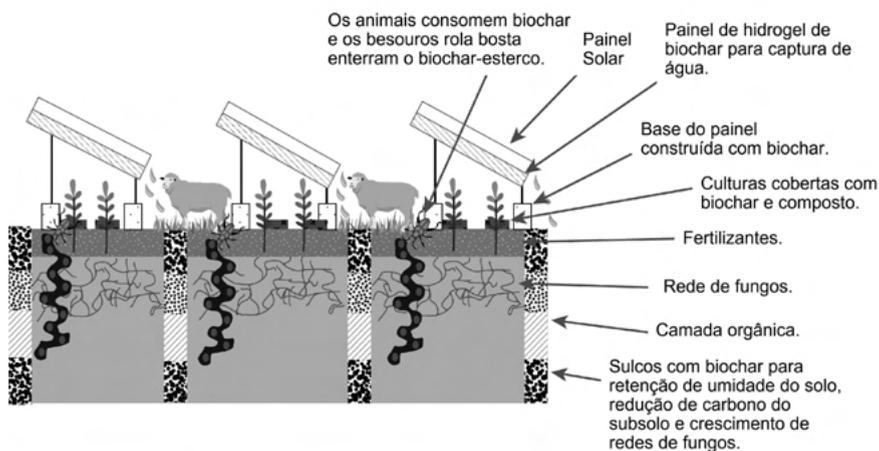


Figura 10.6 – Integração do biochar embaixo e entre os painéis solares (S. Joseph).



CONCLUSÃO

O uso do biochar como ferramenta para a agricultura regenerativa e sustentável ajuda a reabilitar solos degradados, aumentar a produtividade e a lucratividade do meio rural e facilita a transição para a agricultura regenerativa. A integração da produção de biochar *on farm* com o uso de calor residual e, em seguida, a aplicação do biochar no solo, reduzirá a emissão de gases do efeito estufa da agricultura. Da mesma forma, o uso de biochar na construção de parques solares e eólicos e sua aplicação no solo sob e ao redor dos painéis solares melhorará o equilíbrio de carbono nesses empreendimentos.

Referências

1. Hedley M. et al. (2020). A review of evidence for the potential role of biochar to reduce net GHG emissions from New Zealand agriculture www.nzagrc.org.nz/assets/Publications/Potential-Role-of-Biochar-in-NZ-2021.pdf
2. Iqbal S. et al. (2023). Regenerative fertilization strategies for climate-smart agriculture: Consequences for greenhouse gas emissions from global drylands. *Journal of Cleaner Production* 398:136650 doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136650
3. Osman AI. et al. (2022). Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. *Environmental Chemistry Letters* 20:2385- 2485 doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x
4. Antonangelo JA. et al. (2021). The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. *Journal of Environmental Management* 277:111443 doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111443
5. Wang Y. et al. (2019). Uma compreensão quantitativa do papel do biochar co-composto no crescimento das plantas usando meta-análise. *Science of the total environment* 685:741-752 [doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.244](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.244)

6. Solaiman ZM. et al. (2018). ANZBIG anzbig.org/wp-content/uploads/2021/08/Potential-of-biochar-permeable-reactive-barrier-LR.docx
7. Hansen V. et al. (2017). The effects of straw or straw-derived gasification biochar applications on soil quality and crop productivity: Um estudo de caso em uma fazenda. *Journal of Environmental Management* 186: 88-95 doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.041
8. Joseph S. et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: Uma revisão dos mecanismos que controlam as respostas do solo e das plantas ao biochar GCB *Bioenergy* 13:1731-1764 onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12885
9. Michael Taylor (2020). theaimn.com/never-has-there-been-a-greater-needed-for-aboriginal-fire-stick-farming/
10. Brianne Palmer (2020). casw.org/news/aboriginal-burning-practices-a-solution-to-australias-wildfires/
11. Roberts P. et al. (2021). Reimagining the relationship between Gondwanan forests and Aboriginal land management in Australia's "Wet Tropics" *iScience* 24:102190 doi.org/10.1016/j.isci.2021.102190

CAPÍTULO 11

Testando biochar em propriedades rurais

Pontos principais

- Este capítulo apresenta vários testes simples e baratos que podem ser realizados em áreas rurais ou em jardins para caracterizar um novo biochar e obter uma compreensão básica de seus prováveis efeitos no solo.
- Como os materiais de biochar variam muito, recomendamos que você sempre teste um novo material de biochar antes de usá-lo em seus solos.
- Se você estiver usando a mesma matéria-prima com mesmo teor de umidade, pirolisada à mesma temperatura no mesmo tipo de forno, o biochar só precisa ser testado uma vez.
- Faça testes com diferentes taxas de aplicação para ver o que acontecerá no solo, especialmente o efeito do biochar no pH. Uma pequena mudança no pH, como de 5 para 5,3, pode promover um grande efeito porque a escala de pH é logarítmica.
- O teor de cinzas do biochar, o total de sólidos dissolvidos (TDS) e o pH darão uma boa indicação da mudança de pH e do efeito de calagem induzido pelo biochar no solo e se poderão ocorrer efeitos adversos devido a um alto teor de sais. Isso é especialmente verdadeiro se o pH e o TDS forem medidos quando o biochar for combinado na proporção pretendida com o solo.
- Se efeitos adversos forem observados com base nos testes simples, poderá ser utilizada uma taxa de aplicação menor ou um biochar diferente.
- Testes de simples realização, como o de germinação e de fuga de minhocas, ajudam a detectar a toxicidade e a escolher um biochar que melhor promova a biota do solo e o crescimento das plantas.
- São necessários testes em vasos ou em campo para determinar o biochar e sua taxa de aplicação ideal para atender às restrições do solo buscando seu melhor aproveitamento. Será valioso desenvolver habilidades para o planejamento eficaz de testes, amostragem de solo e plantas e análises básicas.
- A criação de uma rede de contatos com o compartilhamento dos resultados também ajudará outras pessoas e contribuirá para o avanço da Revolução do Biochar.

INTRODUÇÃO

Os biochars e os solos apresentam grande variabilidade em suas características. As propriedades do biochar diferem de acordo com suas matérias-primas e processos de pirólise, e essas propriedades variadas afetam seu desempenho na aplicação pretendida. Por esses motivos, é prudente testar qualquer novo material de biochar antes de usá-lo no solo. Este capítulo foi elaborado para ajudar os agricultores e jardineiros a realizarem testes simples, porém essenciais, para garantir a segurança e a eficácia do biochar no solo. O capítulo foi atualizado a partir de dois capítulos do livro *The Biochar Revolution (A Revolução do Biochar)*¹ e de outros artigos publicados pelos mesmos autores.^{2,3} Ele também se baseia no trabalho publicado pela International Biochar Initiative (IBI),^{4,5} pelo European Biochar Certificate (EBC)⁶ e pelo *ANZBIG Code of Practice (Código de Prática ANZBIG)*.⁷

São fornecidos testes simples para:

- Os principais componentes do biochar, especialmente o teor de umidade e as cinzas;
- Propriedades relevantes para o solo: pH e TDS, para o biochar em si e quando combinado com o solo;
- Toxicidade (testes de germinação e fuga de minhocas).

As implicações dos testes são discutidas, com referências fornecidas para mais detalhes. Apresentamos orientações sobre como testar os efeitos do biochar no crescimento das plantas. O capítulo termina com uma breve introdução aos testes de campo e amostragem do solo, com referências a guias mais detalhados e indicações de laboratórios de testes australianos.

Munidos dos resultados desses testes, os agricultores e jardineiros podem tomar decisões embasadas sobre a integração do biochar em áreas maiores do solo e em práticas de gerenciamento contínuas.



COMPONENTES PRIMÁRIOS DO BIOCHAR

Os quatro principais componentes do biochar são umidade, cinzas, matéria orgânica lábil e matéria orgânica recalcitrante.

A umidade refere-se ao teor de água do biochar e, conforme medido, pode incluir alguns compostos orgânicos voláteis que evaporam junto com a água.

As cinzas referem-se à parte do biochar que não é orgânica.

A matéria orgânica lábil ou disponível é a parte orgânica do biochar que pode migrar para o solo e se tornar uma fonte de alimento para os microrganismos e as plantas do solo.

A matéria orgânica recalcitrante ou persistente é a parte orgânica do biochar que se espera que permaneça estável no solo por muito tempo, proporcionando um habitat para microrganismos e nutrientes.

Esses quatro constituintes primários do biochar são paralelos aos constituintes do carvão vegetal, conhecidos como umidade, cinzas, matéria volátil e matéria fixa, que são determinados por um procedimento padrão chamado análise de proximidade. Alguns dos procedimentos da análise de proximidade são adaptados para medir os constituintes do biochar, com ajustes variados para acomodar os diferentes requisitos e propriedades do biochar relevantes para sua aplicação nos solos (por exemplo, nem toda a matéria volátil é solúvel em água e disponível para as plantas).

As cinzas, a matéria orgânica disponível e a matéria orgânica persistente são medidas após secagem do biochar. Tanto o componente inorgânico (cinzas) quanto os componentes orgânicos podem ser caracterizados em componentes solúveis ou insolúveis em água. Os componentes solúveis se

infiltram no solo e ficam disponíveis para os microrganismos e as plantas, funcionando como nutrientes ou, em alguns casos, em um nível muito alto, apresentando-se como toxinas.

Sequência analítica

Todos os constituintes básicos do biochar podem ser medidos pesando-se a amostra de biochar antes e depois de aquecê-la a várias temperaturas sob condições definidas. A Figura 11.1 apresenta uma visão geral de uma sequência analítica prática e as temperaturas e condições necessárias para medir todos os constituintes. Você pode interromper essa sequência quando tiver o produto ou a informação de interesse. Por exemplo, se você quiser apenas o teor de umidade ou uma amostra seca, pode parar na medição de umidade.

Seguindo os procedimentos simples descritos nas seções a seguir, essas medições podem ser feitas com precisão suficiente com equipamentos tão básicos quanto um termômetro (ou termopar para altas temperaturas), uma balança, um forno e latas.

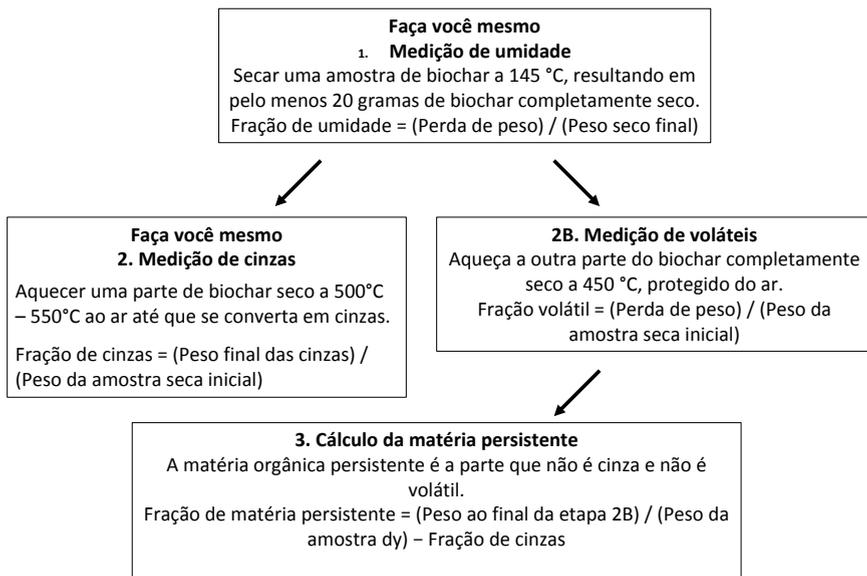


Figura 11.1 – Sequência analítica para determinar os principais constituintes do biochar usando métodos simples do tipo “faça você mesmo” (DIY). Observe que as fórmulas expressam as várias frações em uma base seca (db), ou seja, em relação ao peso seco final. Se multiplicadas por 100, as frações se transformam em conteúdo percentual (db).

Teor de umidade

A maioria dos biochars é hidrofílica – eles atraem e retêm prontamente grandes quantidades de umidade do ambiente. Além disso, o processo de produção de biochar geralmente envolve o resfriamento com água. Portanto, a quantidade de água presente no biochar pode variar muito, dependendo de como o biochar é produzido e se ele acumulou ou perdeu umidade durante o armazenamento ou o transporte. Há vários motivos para conhecer o teor de umidade:

- O biochar é um material ativo, portanto, é fundamental que tenha umidade suficiente para evitar a combustão espontânea e reduzir os riscos de poeira no armazenamento e no transporte.
- O teor de umidade do biochar pode atuar como um reservatório de água na rizosfera, que pode ser utilizado pelas plantas e microrganismos em momentos de estresse hídrico.
- A umidade aumenta os custos de remessa e reduz o valor da compra se for paga por peso (por esse motivo, o biochar é geralmente vendido por volume).
- A avaliação e a comparação das propriedades de vários biochars devem ser feitas em uma “base seca” uniforme, removendo assim a variável do teor de água.

O teor de umidade é medido pesando-se a amostra antes e depois da secagem em um forno a uma temperatura específica acima do ponto de ebulição da água. O teor de umidade é definido como a proporção da perda de peso em relação à massa úmida original (conhecida como base úmida) ou à massa seca final (base seca). Um padrão conveniente de “biochar livre de umidade” é geralmente determinado pela secagem de uma amostra a 105 °C até atingir um peso constante (ou seja, não há mais perda de peso quando a secagem é continuada). Normalmente, isso é feito em um forno de secagem com circulação de ar interna forçada por até 24 horas. Essa é a temperatura para a caracterização do teor de umidade do biochar exigido pela Iniciativa Internacional de Biochar (IBI)⁵, pelo Certificado Europeu de Biochar (EBC)⁶ e por outros métodos analíticos publicados.^{8,9} No entanto, esse não é o fim da história do teor de água.

A secagem a 105 °C remove apenas parte da umidade real contida em uma amostra de biochar. A água também pode ser adsorvida nas grandes áreas de superfície interna inerentes aos pequenos poros do biochar

ou mantida em formas mais fortemente ligadas como água de hidratação dentro da cinza presente no biochar ou como moléculas de água quimicamente envolvidas com as porções orgânicas do biochar. A Figura 11.2 mostra as perdas de peso medidas para sete biochars aquecidos de menos de 100 °C a 300 °C.

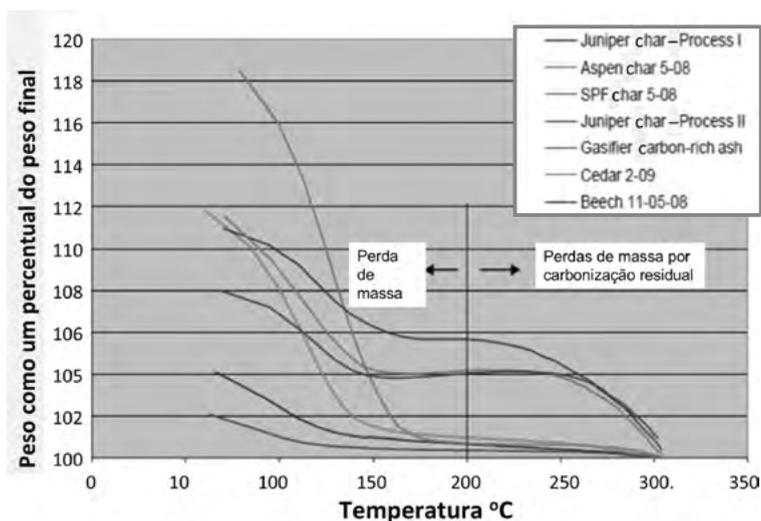


Figura 11.2 – Curvas de perda de peso para sete tipos de biochar. Fonte: McLaughlin et al. (2009)²

Uma temperatura de 145 °C-155 °C marca o início de um platô de peso estável, em que a maior parte da água e uma pequena quantidade de material volátil foram removidas, mas antes que o biochar comece a perder massa devido à oxidação e à carbonização em temperaturas mais altas. Assim, a secagem a uma temperatura entre 145 °C-155 °C condiciona o biochar por meio da dessorção da água e das substâncias voláteis que foram adsorvidas nos poros do biochar. Se esses voláteis não fossem dessorvidos, eles interfeririam na medição subsequente de cinzas e carbono volátil.

Para medir a matéria volátil, é necessário aquecê-la a 450 °C, o que eliminaria toda a água fortemente ligada ainda remanescente, o que distorceria as medições de outras frações. A água fortemente ligada também deve ser removida antes de medir a capacidade de adsorção. O biochar condicionado ou “dessorvido” é frequentemente chamado de biochar “seco no forno” para diferenciá-lo do biochar “sem umidade”. Outras características do biochar,

como o teor de cinzas, podem ser fornecidas como uma porcentagem do biochar “livre de umidade” ou do “biochar seco no forno” e designado de acordo. No entanto, o teor de cinzas e a fração volátil do biochar são mais bem representados quando se retira toda a água, para começar com uma amostra completamente seca e sem água.

Para a maioria dos biochars, apenas o vapor de água é expelido ao secar em temperaturas abaixo de 110 °C e, em comparação com o teor de água, quantidades insignificantes de voláteis serão liberados a 145 °C. No entanto, alguns biochars liberam quantidades significativas de vapores orgânicos, geralmente metanol e ácido acético (que podem ser detectados por seu odor pungente) junto com a água. A perda de peso da secagem na temperatura-alvo incluirá não apenas água, mas também outros solventes orgânicos de baixo ponto de ebulição. Essa fração se tornará mais proeminente em temperaturas mais altas e poderá influenciar o teor de umidade medido para que seja mais alto do que o teor de água real, e influenciar medições posteriores dos teores voláteis para que sejam muito baixos (já que alguns foram liberados na medição da umidade). Portanto, se aquecermos insuficientemente, parte da água poderá ser incluída nas outras frações e, se aquecermos demais, alguns voláteis poderão ser perdidos na fração de água.

Observações:

- A secagem do biochar a 105 °C-110 °C requer paciência ou deixar o biochar no forno de baixa temperatura de um dia para o outro – especialmente se estiver secando biochar úmido ou se desejar secar uma quantidade maior – para que tenha o suficiente para testar posteriormente as propriedades adicionais.
- Ao secar o biochar a 145 °C, o procedimento é mais curto, mas requer monitoramento por segurança e para detectar a oxidação do carvão. Alguns biochars, quando aquecidos a temperaturas internas em torno de 150 °C, podem começar a emitir voláteis e até mesmo gerar fumaça. Por esse motivo, a secagem deve ser feita sob uma coifa ou em uma área bem ventilada, como uma garagem aberta ou ao ar livre. Não deixe esse processo sem supervisão. Seque a 110 °C de um dia para o outro sem supervisão e, em seguida, leve a 145 °C-150 °C e seque por uma hora com supervisão.

- As emissões de voláteis ou fumaça são indicadores de que o biochar não está totalmente carbonizado ou que contém madeira torrificada. É provável que os biochars que contêm porções significativas de madeira torrificada tenham um comportamento diferente e possivelmente menos benéfico no solo do que os biochars totalmente carbonizados.

Os processos simples recomendados para a secagem em estufa a 105 °C e 145 °C, e para derivar o menor ou maior teor de água do biochar, são apresentados no Quadro 11.1. Se você realizar os dois procedimentos, a diferença nos resultados será uma medida da água mais fortemente ligada ao biochar, presumindo-se que outros voláteis insignificantes tenham deixado a amostra na temperatura mais alta.

Quadro 11.1 – Secagem de biochar e medição de umidade DIY

O que você vai precisar:

- Um forno simples (não um forno de micro-ondas).
- Um termopar ou termômetro de forno padrão adequado para uso dentro do forno elétrico. (Não confie no termostato de um forno elétrico barato.)
- Uma balança com precisão de 0,1 ou 0,01 gramas. Você pode usar uma balança de cozinha para uma amostra maior de biochar.
- Um pedaço de papel-alumínio, perfurado para deixar escapar o excesso de umidade e permitir a circulação do vapor.
- Para secagem a 145 °C: um recipiente vedado adequado para armazenar o biochar quente para inibir a adsorção de umidade do ar circundante.
- Uma amostra de biochar; pode ser de apenas 1 grama, medido com uma balança de precisão, mas de 10 a 100 gramas é mais fácil de medir, com a quantidade maior produzindo mais amostras para medições adicionais.

Decida sua temperatura-alvo (consulte as observações e a discussão acima da caixa):

- 105 °C-110 °C para biochar sem umidade e para medir o teor de umidade mais baixo.
- 145 °C-150 °C para biochar seco e para medir o teor de umidade mais alto.

O que fazer:

1. Prepare um prato de secagem ou uma lata pequena com a parte superior aberta e perfurações no fundo para o fluxo de ar. Registre o peso do recipiente.
2. Coloque a amostra no recipiente e registre o peso. A diferença é o peso inicial da amostra úmida.
3. Insira o termopar (ou termômetro de forno) no centro da amostra de biochar para medir sua temperatura interna.
4. Coloque a folha de alumínio perfurada sobre a parte superior do recipiente de biochar para proteger a amostra da fonte direta de calor do forno. Certifique-se de que o recipiente não esteja vedado para que a umidade possa sair do recipiente.
5. Siga as instruções para sua temperatura alvo:
 - a. Aqueça a amostra até que se atinja a temperatura interna desejada 105 °C-110 °C.
 - b. Mantenha-a assim por pelo menos duas horas ou durante a noite.
 - c. Pese a lata com a amostra seca.
 - d. Repita as etapas b e c em intervalos de uma ou duas horas até que o peso permaneça constante.
 - e. Ajuste o forno para 145 °C-150 °C (veja o método acima).
 - f. Desligue o forno quando a temperatura interna do biochar atingir 145 °C.
 - g. Mantenha o biochar no forno de secagem desligado até que você observe a temperatura interna máxima atingida (veja a nota abaixo).
 - h. Resfrie o biochar no forno de secagem ou, de preferência, em um recipiente fechado.
6. Registre o peso do recipiente com a amostra seca. Esse peso, menos o peso do recipiente vazio, é o peso da amostra seca
7. Calcule a diferença de pesos dividida pelo peso úmido inicial ou pelo peso seco final. Expressos em porcentagem, esses são os teores de umidade em uma base úmida ou seca; por exemplo:

$$\text{Teor de umidade (base seca)} = \frac{(\text{Peso úmido inicial} - \text{Peso seco final})}{\text{Peso seco final}} \times 100$$

Observações:

- Devido ao efeito de resfriamento da evaporação da umidade, certifique-se de que o interior do próprio biochar tenha atingido a temperatura necessária. Isso é especialmente importante para amostras maiores. É necessário algum cuidado para obter consistência.
- Ao secar a 145 °C, se a temperatura interna do biochar exceder a temperatura do forno, indicando que o biochar está gerando calor interno, o biochar começou a oxidar. Se isso ocorrer, o estudo de secagem deve ser repetido em uma temperatura de forno mais baixa para obter resultados precisos.

Cinza

As cinzas são a fração do biochar livre de umidade que não é orgânica. É do interesse do produtor ou comprador de biochar conhecer o teor de cinzas, pois o componente de cinzas de qualquer biochar pode ser considerado um componente benéfico ou prejudicial, dependendo da aplicação do biochar e da natureza e quantidade de cinzas.

O teor de cinzas é medido pela trituração de uma amostra seca de biochar (sem umidade ou seca em estufa) até obter um pó grosso e aquecê-la a uma temperatura de 500 °C-550 °C até que a amostra se torne um pó cinza-claro a branco, sem partículas pretas. A proporção entre o peso das cinzas e o peso original da amostra seca fornece a fração de cinzas em uma base seca (sem umidade ou seca no forno, dependendo do ponto inicial da amostra). Um procedimento “faça você mesmo” para medir o teor de cinzas é descrito no Quadro 11.2.

Quadro 11.2 – Medição de cinzas (faça você mesmo)

Assim como a umidade, a cinza também é bastante fácil de medir em casa, com a devida atenção à segurança.

Do que você vai precisar:

- Uma balança com precisão de 0,01 gramas.
- Um fogão de acampamento movido a propano.
- Uma lata de atum ou de ração para gatos limpa, seca e com tampa aberta (não de alumínio).
- Uma amostra de biochar finamente triturado ou em pó (de preferência seco).

O que fazer:

1. Aqueça a lata vazia para queimar os revestimentos do processo de fabricação.
2. Pese o recipiente depois que ele esfriar e registre.
3. Espalhe uma camada de ½ centímetro (ou ¼ de polegada) de biochar seco e moído no fundo da lata e anote o novo peso do recipiente.
4. Registre a diferença; esse é o peso do biochar seco.
5. Aqueça a lata aberta no fogão de acampamento em uma chama aberta que aqueça uniformemente todo o fundo do recipiente.
6. Mexa o conteúdo periodicamente e de maneira uniforme para facilitar a formação de cinzas, mas tome cuidado para não derrubar ou soprar as cinzas. Evite que o conteúdo da lata pegue fogo. Isso levaria as cinzas para longe como partículas na fumaça.
7. Continue até que a lata contenha apenas resíduos de cinzas cinzentas a brancas.
8. Pese a lata resfriada, incluindo as cinzas nela contidas.
9. Remova todas as cinzas e a lata vazia.
10. Registre a diferença; esse é o peso da cinza.
11. Registre a proporção entre os pesos de cinzas e de biochar seco, usando os valores registrados nas etapas 4 e 10.

$$\text{Teor de cinzas (base seca)} = \frac{\text{(Peso final das cinzas)}}{\text{Peso inicial da amostra seca}} \times 100$$

Observação:

- Um processo de incineração concluído terá queimado todo o material orgânico, deixando para trás cinzas inorgânicas. O pó preto em uma amostra incinerada indica a presença de material orgânico não queimado. Como a incineração produz um material muito estável, o tempo extra na temperatura do forno, sob limites de temperatura controlados, garantirá a incineração completa, sem efeito prejudicial na medição do teor de cinzas da amostra de biochar.

Níveis de cinzas e implicações

A maioria dos biochars feitos de madeira limpa produz menos de 5% de cinzas por peso, enquanto os resíduos agrícolas, como a palha de milho, podem produzir níveis significativamente mais altos. Se a matéria-prima original for madeira nova e limpa ou resíduos agrícolas, geralmente não há muita preocupação com o nível ou a composição das cinzas.

A cinza pode ser dividida em componentes solúveis e insolúveis em água. Quando o biochar é adicionado ao solo, a cinza solúvel causa seu principal efeito no pH. A cinza solúvel pode agir como a cal. Os componentes solúveis são lixiviados na água e no solo e ficam disponíveis para os microrganismos e as plantas. Alguns desses compostos disponíveis serão nutrientes para a

biota e as plantas, e alguns, como metais pesados ou altos níveis de sal comum – cloreto de sódio (NaCl) – podem ser tóxicos em um nível muito alto.

Sempre que a origem da biomassa for desconhecida ou os níveis de cinzas forem significativamente superiores a 10% do peso, pode valer a pena testar as cinzas quanto ao seu impacto no pH do solo, no total de sólidos dissolvidos (TDS) e na presença de metais. O pH e o TDS podem ser facilmente medidos por meio de medidores simples, conforme descrito abaixo na seção que trata dos Atributos Relevantes do Solo. Para solos ácidos, a alcalinidade adicional é bem-vinda, mas para solos com pH alto, a calagem adicional pode levar a um desempenho ruim das culturas agrícolas. O teste de TDS o alertará sobre os altos níveis de sais. Os testes de metais devem ser realizados por um laboratório qualificado, que também pode ajudar a interpretar os resultados analíticos. Nem todos os metais nas cinzas são ruins, mas todos os metais nas cinzas precisam ser compreendidos quanto ao seu destino e papel no solo. Consulte as seções sobre metais pesados nos Capítulos 4 e 6. Na Austrália, a Southern Cross University tem um Laboratório de Análise Ambiental, que é um dos primeiros especializados em testes de biochars (veja detalhes no final deste capítulo).

Matéria orgânica disponível

Ao usar os procedimentos de análise imediata para obter informações sobre os constituintes do biochar relevantes para o solo, são feitos ajustes para que a fração volátil da análise imediata seja um melhor indicador da matéria orgânica disponível. Em uma análise imediata de carvão ou carvão vegetal, a fração volátil é determinada pela medição da perda de peso quando o material é aquecido a 950 °C em uma atmosfera de nitrogênio. Nem todos esses voláteis serão solúveis em água e estarão disponíveis para as plantas. Hugh McLaughlin² propõe que um melhor indicador da fração orgânica disponível seja obtido pelo aquecimento de uma amostra de biochar seco em forno, obtido pelo método descrito acima, a uma temperatura de 450 °C e sua manutenção por até duas horas. Essa fração de temperatura mais baixa da matéria volátil é a fração mais facilmente solúvel em água e, portanto, disponível para microrganismos e plantas. A medição de matéria volátil “faça você mesmo” é semelhante à medição de cinzas “faça você mesmo”, exceto pelo fato de que o biochar é aquecido a 450 °C em uma lata com tampa de alumínio ou cadinho com tampa, mas a tampa deve estar solta para permitir a saída dos voláteis, mantendo o ar fora.^{2,8,9}

$$\text{Teor de matéria volátil (base seca)} = \frac{(\text{Peso inicial da amostra seca} - \text{Peso final})}{\text{Peso inicial da amostra seca}} \times 100$$

Matéria orgânica persistente

A matéria orgânica persistente é a parte do biochar livre de umidade que não é nem matéria volátil nem cinza. No final da desvolatilização acima, o peso final acima consiste no carbono estável e nas cinzas.

$$\text{Matéria orgânica persistente (base seca \%)} = (\text{Peso final} / \text{Peso inicial da amostra seca}) - \text{fração de cinzas} \times 100$$

Conforme mencionado, espera-se que a matéria orgânica persistente permaneça estável no solo por muito tempo, fornecendo um substrato valioso para microrganismos e nutrientes. Seu componente de carbono estável pode ser de interesse para a qualificação de créditos de carbono.

Carbono persistente

A matéria orgânica persistente descrita acima contém uma grande fração de carbono e várias quantidades de outros elementos, como nitrogênio, hidrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre. Para biochars típicos criados a partir de biomassa limpa de madeira por pirólise lenta, a fração de carbono está na faixa de 60 a 90%.

Esse carbono persistente é medido por meio da realização de uma análise química em uma parte do resíduo deixado após a medição da matéria volátil a 450 °C.

$$\text{Carbono persistente (base seca)} = \frac{(\text{Peso do carbono})}{\text{Peso inicial da amostra seca}} \times 100$$

Para converter o peso de carbono puro em peso de CO₂ sequestrado, cada unidade de peso de carbono puro é multiplicada pela razão estequiométrica de CO₂/C = 3,66.

$$\text{Peso de CO}_2 \text{ sequestrado} = \text{Peso de carbono} \times 3,66$$

As autoridades de crédito de carbono descontam esse sequestro teórico de CO₂, multiplicando-o efetivamente por um número menor, próximo a 2,5, para permitir erros de metodologia e vazamentos de carbono de volta à atmosfera como CO₂ liberado, inclusive por eventos imprevistos, como incêndios. As regras associadas aos créditos de carbono são complexas e mudam a cada ano.

ATRIBUTOS RELEVANTES PARA O SOLO

Além dos papéis fundamentais desempenhados pelos quatro componentes primários do biochar, algumas outras propriedades específicas do biochar são essenciais para avaliar como um determinado biochar afetará o solo. Essas propriedades incluem níveis de pH e sólidos totais dissolvidos (TDS), que são importantes e fáceis de medir.

Sólidos totais dissolvidos e pH do biochar

Os testes para avaliar o total de sólidos dissolvidos (TDS) e os níveis de pH são fáceis de realizar e antecipam com eficácia as consequências de curto prazo da introdução de um biochar específico em um determinado solo.

O TDS é definido como o conteúdo combinado de todas as substâncias dissolvidas na água que permanecem após a evaporação da água. Como os sais minerais se tornam iônicos quando dissolvidos na água, a condutividade elétrica da água é uma medida do nível desses sais. No contexto da análise do solo, o TDS mede o conteúdo total de sal dissolvido, incluindo fertilizantes e sais neutros que estão em solução em uma mistura de solo e água. Embora o TDS no solo possa fornecer nutrientes importantes, o excesso de sais tem um efeito adverso na maioria das plantas. Isso se torna preocupante quando o solo é corrigido com biochars que contêm alto teor de cinzas, especialmente aqueles derivados de materiais como cama de frango ou lodo de fábrica de papel. Os sais solúveis presentes no biochar podem se infiltrar solo, elevando seus níveis de TDS. Alguns biochars de alimentos, biossólidos e resíduos animais contêm altas concentrações de sal de cloreto de sódio, que podem ser prejudiciais às plantas.

O pH do biochar assume importância quando o biochar introduzido influencia o pH em uma direção desfavorável (muito alto ou muito baixo) para a cultura ou para as comunidades microbianas. Muitos biochars apresentam um efeito pronunciado de “calagem” e podem elevar os níveis de

pH do solo. Embora isso possa ser benéfico para solos muito ácidos para a cultura, pode não ser adequado para solos alcalinos.

Portanto, é fundamental monitorar os níveis de TDS e pH ao incorporar o biochar ao solo para garantir condições ideais para o crescimento das plantas.

Testando o biochar para pH e sólidos totais dissolvidos

Os níveis de pH e TDS podem ser facilmente medidos usando medidores portáteis de baixo custo em uma amostra criada pela mistura de uma porção de biochar puro com água de pH neutro que tenha baixa condutividade. O ideal é usar água destilada e deionizada, mas obter água deionizada fora de um laboratório de pesquisa pode ser difícil. Felizmente, muitas águas engarrafadas são aceitavelmente puras. O processo de medição é simples e está descrito no Quadro 11.3.

Quadro 11.3 – Testes faça você mesmo de pH e sólidos totais dissolvidos (TDS)

Do que você vai precisar:

- Papel de pH ou um medidor de pH.
- Medidor de condutividade ou TDS.
- Água deionizada.

Observações:

Em geral, a água engarrafada é suficientemente neutra e livre de íons. Há medidores de TDS e pH portáteis e baratos, ou medidores combinados, disponíveis, mas considere que os medidores mais caros podem ter uma vida útil longa.

O que fazer:

- Calibre seu medidor com um padrão fornecido pelo fabricante.
- Meça o pH inicial e o TDS da água.
- Crie uma pasta misturando uma parte de biochar puro com dez partes de água por peso. Misture ou agite a pasta e deixe-a assentar por dez minutos.
- Meça o pH e o TDS.

Observações:

- Se o ciclo de mistura e sedimentação for muito curto, o biochar flutuante poderá influenciar a medição de TDS.
- Se o biochar demorar muito para ficar úmido, consulte a seção a seguir.

Umedecimento acelerado – um teste simples para microporos ou óleos hidrofóbicos em biochar

Às vezes, o biochar pode levar algum tempo para ficar úmido e liberar o ar aprisionado. Isso pode ser superado por meio do umedecimento acelerado, conforme descrito a seguir, teste que também pode fornecer informações sobre outros atributos do biochar.

Os biochars podem ser difíceis de molhar por vários motivos. O biochar pode ter:

- a. Níveis elevados de óleos hidrofóbicos condensados e alcatrões,
- b. Uma fração significativa de madeira torrificada, ou
- c. Uma fração significativa de microporos, exigindo que o vapor de água migre e se condense nos poros para “molhá-los”.

As duas primeiras condições não proporcionam os benefícios duradouros associados ao biochar, embora possam proporcionar benefícios de curto prazo. Os óleos e alcatrões hidrofóbicos são dissolvidos do biochar pela água do solo, fornecendo nutrientes para microrganismos e plantas. A madeira torrificada não é biochar e provavelmente se decompõe no solo com o tempo. Por outro lado, os microporos são altamente desejáveis.

Uma maneira de verificar se há microporos ou óleos hidrofóbicos significativos é aquecer a pasta de biochar até próximo do ponto de ebulição da água, o que promove a migração do vapor de água para os poros. A presença de microporos desejáveis é indicada se o biochar liberar muitas bolhas minúsculas e depois afundar. A água que desenvolve um brilho oleoso ou fica com a cor de chá indica a presença e a liberação de óleos hidrofóbicos e alcatrões.

Quadro 11.4 – Umedecimento acelerado de biochar faça você mesmo

Do que você vai precisar:

- Um pote de conserva de meio litro, com tampa.
- Uma panela com tampa grande o suficiente para envolver todo o pote, preenchida com uma pequena quantidade de água, suficiente para envolver o frasco com vapor.

O que fazer:

- Faça uma pasta de 10% (em peso) de biochar seco e água (usando água deionizada) e coloque-a no pote de conserva.
- Coloque o pote, com a tampa frouxa, na panela.
- Aqueça a água, deixando-a ferver.
- Tampe a panela.
- Ferva por 30 minutos.
- Retire do fogo e deixe esfriar.

O que observar:

- Após o resfriamento, os biochars microporosos afundarão e os biochars hidrofóbicos menos desejáveis irão flutuar, o que proporciona uma divisão visual dos componentes do biochar.
- Agora você pode medir o TDS e o pH da pasta de biochar umedecida.

Verificação da mistura de solo e biochar

A planta é influenciada pelo pH real e pelo TDS no solo após a aplicação do biochar. Se as medições descritas acima em uma pasta de biochar e água indicarem que o biochar pode ter um efeito significativo no pH ou no TDS do solo, a contribuição do pH ou do TDS do biochar deverá ser estimada com base na taxa de aplicação e na proporção de diluição no solo. Se isso indicar que o solo corrigido teria um pH ou TDS muito alto, a taxa de aplicação deverá ser reduzida ou outro biochar deverá ser escolhido.

Como alternativa, e uma maneira mais precisa de determinar os valores do solo, a mistura real de solo e biochar proposta pode ser preparada e testada quanto ao pH e ao TDS. Para isso, a pasta de biochar-água é criada e adicionada a uma amostra do solo a ser utilizado na proporção pretendida. Como o solo no campo normalmente não terá um excesso significativo de água livre (devido ao escoamento, infiltração e evaporação), exceto durante eventos de chuva ou inundação, o pH e o TDS da amostra da mistura biochar-solo devem ser medidos na “saturação”. É quando a mistura contém o mínimo de água possível, ainda assim cobrindo completamente os sólidos de solo e biochar (ponto de saturação). A medição das

propriedades do solo na saturação é um método analítico padrão usado pelos cientistas do solo. O pH e o TDS do solo podem ser medidos antes e depois da mistura para verificar se o biochar está alterando ou aumentando significativamente o pH e o TDS do solo em uma faixa adequada ou inadequada para a planta.

Para a proporção solo/biochar que está sendo testada, esses testes finais de pH e TDS medem as condições que serão realmente criadas no solo. Se o pH for inaceitável ou o aumento de TDS for excessivo, o biochar não deve ser adicionado ao solo nas proporções testadas. Deve-se testar e utilizar uma dose menor de biochar ou um biochar diferente.

Capacidade de retenção de água

Conforme discutido no Capítulo 4, a capacidade de retenção de água (CRA) é uma propriedade importante do biochar, afetando sua adequação como corretivo do solo. A CRA é a quantidade de água que o biochar pode adsorver e pode ser expressa em peso ou em volume. A CRA gravimétrica (por peso) é calculada como:

$$\text{CRA} = \frac{\text{Massa de água retida pelo biochar}}{\text{Massa de biochar}} \%$$

Os seguintes métodos são comumente usados:

- Método gravimétrico: Envolve a pesagem de uma quantidade conhecida de biochar seco, saturando-o com água, deixando-o escorrer e, em seguida, pesando-o novamente. A diferença de peso é a quantidade de água retida. Dividindo esse valor pela massa seca de biochar, obtém-se a CRA.
- Método da placa de pressão: As amostras de biochar são saturadas com água e, em seguida, submetidas a diferentes níveis de pressão usando um aparelho de placa de pressão. A quantidade de água retida em cada pressão é medida por pesagem para construir uma curva de retenção de água, a partir da qual a CRA pode ser determinada.
- Método da coluna de água suspensa: O biochar é acondicionado em uma coluna e saturado com água. A coluna é então drenada e a quantidade de água retida é medida gravimetricamente ou pelo monitoramento do volume de saída.

O biochar continua a absorver água por dez dias ou mais. Um método simples de medir a CRA para biochar envolve a secagem do biochar a 105° C, peneirando-o a 2 mm e preenchendo alguns pedaços de cano de PVC de 3 cm de diâmetro e 5 cm de comprimento com o biochar. As extremidades do tubo são cobertas com tecido preso por elásticos. As amostras são encharcadas por dez dias e pesadas periodicamente, primeiro a cada hora e depois a cada dia, para observar a absorção de água. Em seguida, as amostras são secas por dez dias a 60 °C (para evitar o derretimento do PVC) e pesadas.

A absorção de água é calculada usando a seguinte equação:

$$W(t) = T - B - W(c+r+p)$$

em que $W(t)$ = água absorvida pelo biochar no tempo t , T = peso úmido total do biochar, do tubo de PVC e da cobertura de tecido, B = peso seco da amostra de biochar e $W(c+r+p)$ = peso úmido do tecido, da borracha e do tubo de PVC (isso permite qualquer absorção de água pelo tecido e pelo elástico). A inserção de $W(t)$ na equação acima fornece o GWC após o tempo de imersão t .

A densidade aparente também pode ser calculada:

$$\text{Densidade aparente (g/ml)} = \frac{\text{Peso seco do biochar no cilindro de PVC}}{\text{Volume do cilindro de PVC}}$$

O mesmo método pode ser aplicado para medir a CRA de solos ou de uma mistura de biochar e solo. A preparação adequada da amostra, a replicação e os controles (por exemplo, usando areia) são importantes para obter resultados precisos e reprodutíveis. O método completo pode ser encontrado nas referências.^{10,11} Medições adicionais, como a distribuição do tamanho dos poros, a área da superfície e a química da superfície, podem fornecer informações sobre os fatores que influenciam a CRA de diferentes biochars.

TESTES DE TOXICIDADE

Alguns biochars podem conter compostos tóxicos, inclusive grandes quantidades de compostos orgânicos, sais ou metais pesados, que podem prejudicar as plantas quando aplicados ao solo, conforme discutido nos Capítulos 4 e 6. No entanto, conforme discutido nos capítulos anteriores, os biochars podem reter metais pesados e toxinas orgânicas e, em baixas taxas de aplicação, é improvável que causem acúmulo nas plantações e nos animais.

Para uma avaliação inicial da toxicidade do biochar incorporado ao solo, é possível realizar o teste de germinação simples e/ou o teste de evasão de minhocas descrito nas próximas seções. Em caso de dúvida sobre possíveis compostos tóxicos metálicos, não metálicos e orgânicos em seu biochar, envie-o a um laboratório para teste. Os níveis seguros sugeridos, juntamente com sugestões sobre como determinar a disponibilidade de tóxicos, são apresentados no Código de Práticas para a Produção e Uso Sustentável de Biochar na Austrália e na Nova Zelândia (2021) da ANZBIG.⁷

Testes de germinação

A germinação eficaz das sementes é fundamental para o crescimento e o desenvolvimento subsequente das plantas. Portanto, a qualidade da germinação da semente pode servir como um teste de como a qualidade do biochar pode afetar o desempenho geral da planta. Se o biochar afetar negativamente a germinação das sementes, pode-se presumir que ele não é adequado para a aplicação nas plantas.

Teste de germinação simples

O teste simples de germinação de sementes do Quadro 11.5 é mais detalhado em *The Biochar Revolution*¹ e em *A Guide to Conducting Biochar Trials*, publicado pela International Biochar Initiative.³

Quadro 11.5 – Teste de germinação faça você mesmo

Do que você vai precisar:

- As sementes de alface (*Lactuca sativa* L.) são comumente usadas, mas o rabanete e o trevo também são adequados.
- Dois recipientes profundos em forma de bandeja.
- Solo suficiente para quase encher os dois vasos do local do teste de campo.
- O biochar a ser testado.
- Dois sacos plásticos transparentes (opcional).

O que fazer:

1. Reserve metade do solo para o controle.
2. Misture uma quantidade específica de biochar com o solo restante, visando reproduzir a taxa de aplicação pretendida no teste de campo (ou use uma proporção de 50:50 como um primeiro teste).
3. Coloque o solo sem biochar em um recipiente e um volume igual da mistura de solo e biochar no outro recipiente. Rotule os recipientes.
4. Espalhe o mesmo número de sementes na superfície de cada recipiente, usando pelo menos 20 sementes, ou mais, se as taxas de germinação forem baixas em condições normais.
5. Coloque os dois recipientes no mesmo ambiente para manter a temperatura ambiente e regue suavemente, garantindo que o solo seja mantido úmido. Colocar um saco plástico transparente ao redor de cada recipiente ajudará a evitar a manutenção da umidade do solo.
6. Verifique os recipientes diariamente para monitorar a germinação.
7. Conte as sementes germinadas em cada recipiente quando um número significativo delas tiver brotado. Não espere muito tempo, pois a contagem se torna difícil à medida que as plantas crescem e se emaranham.
8. Repita o teste para aumentar a significância dos resultados.
9. Repita os testes duas a três vezes para determinar a média e a variabilidade.

Kits de germinação comerciais para teste de biochars

Kits de teste comerciais para uma avaliação mais precisa e rápida da adequação dos biochars para aplicação no solo em uma série de culturas são desejáveis devido à complexa variabilidade da química do biochar e seus possíveis efeitos no desempenho das plantas. O desafio está na escassez de testes adaptados especificamente para o biochar, considerando suas diversas matérias-primas e métodos de produção. Métodos simples, como o uso de placas de Petri, têm sido empregados por pesquisadores para avaliar o impacto do biochar na germinação de sementes e no crescimento inicial das plantas.

Também foram utilizadas modificações dos métodos padrão de germinação em papel, incorporando solo ou extratos aquosos lixiviados de biochar.

Sistemas especializados, como bandejas de germinação com furos individuais ou configurações para avaliar os efeitos de compostos orgânicos voláteis, foram desenvolvidos para investigações mais detalhadas. Além disso, existem testes padronizados de germinação de sementes para produtos químicos tóxicos e pesticidas, como os testes da EPA e da OECD dos EUA, embora eles normalmente exijam quantidades maiores de solo e menos sementes por recipiente. Kits disponíveis comercialmente, como o Phytotoxkit (<http://www.microbiotests.be/slideshows/04.%20Phytotoxkit.pdf>), oferecem avaliações mais abrangentes, embora tenham sido subutilizados para a triagem de biochar.¹²

Teste rápido do impacto do biochar na germinação de sementes e na saúde do solo

Um método de teste rápido para avaliar o impacto do biochar na germinação de sementes e na saúde do solo utiliza uma câmara de crescimento Conviron Modelo ATC26, que permite a avaliação de um grande número de mudas durante um período prolongado de crescimento.¹² Os pesquisadores utilizaram esse método para avaliar 18 biochars diferentes derivados de seis matérias-primas em três temperaturas de pirólise de 350 °C, 500 °C e 750 °C. Eles examinaram os efeitos desses biochars sobre a germinação e o crescimento de sementes de culturas específicas colocadas em 15 gramas de solo com 1% do peso de um biochar. Esse teste possibilitou a avaliação rápida de muitos biochars e a determinação de quais deles ofereciam o melhor suporte para culturas e solos específicos. De acordo com os pesquisadores, esse método de teste rápido pode ser usado para avaliar uma variedade de nutrientes ou estressores baseados no solo usando uma quantidade limitada de solo e nutrientes ou contaminantes. Ele poderia ser adaptado para várias finalidades de pesquisa, como o estudo dos efeitos da calagem sobre o crescimento e os efeitos do aumento do fósforo extraível que ocorre em conjunto com a aplicação de biochar.

Teste de evasão de minhocas

Outra forma de avaliar o biochar é por meio da realização de testes de sobrevivência ou fuga de minhocas. Esses testes são projetados para revelar o efeito da toxicidade do solo sobre as minhocas como um indicador da

função de habitat dos solos. Há diferentes testes de minhocas disponíveis para vários tipos de solo, qualidade das avaliações e uso do solo:

- Sistemas de testes aquáticos.
- Avaliação da ecotoxicidade de solos contaminados.
- Função de habitat dos solos para o crescimento das plantas.
- Ponto final tóxico.
- Teste de reprodução.
- Teste de evasão.

O teste de evasão é usado como alternativa ao teste de reprodução, devido ao longo período de tempo necessário (56 dias) para o último.

O teste requer minhocas vivas para ser concluído; no entanto, ele pode ser mais sensível do que o teste de germinação. Um tipo comum de minhoca usada para esse teste na Austrália é a minhoca branca (*Enchytraeus albidus*). Ela é amplamente usada como alimento vivo para peixes de aquário e pode ser comprada em lojas de suprimentos para aquários ou na Internet. Como alternativa, podem ser usadas as espécies de minhocas *Eisenia fetida* (comumente conhecidas como minhocas vermelhas, minhocas brandling, minhocas-tigre ou minhocas vermelhas) ou as espécies próximas *Eisenia andrei*. Ambas as espécies são usadas para vermicompostagem e podem ser obtidas de vários fornecedores.

No Quadro 11.6, descrevemos um teste simples de evasão de minhocas e observamos algumas limitações na interpretação dos resultados do teste.

Quadro 11.6 – Teste de evasão de minhocas faça você mesmo

Do que você vai precisar:

- Um recipiente semelhante a uma bandeja (pode ser o fundo de um balde plástico de iogurte ou uma jarra de leite).
- Aproximadamente 1 litro de solo do local onde será realizado o teste de campo ou solo semelhante.
- Aproximadamente 1 litro de biochar.
- Vinte minhocas vermelhas ou brancas.
- Um pedaço de papelão ou folha de plástico.
- Tesouras.
- Uma caneta ou marcador.
- Um copo ou outro recipiente para medir.
- Um regador ou recipiente com furos para regar suavemente o solo.

O que fazer :

1. Preencha metade da bandeja com uma mistura de 50:50 de biochar e solo (ou uma mistura na taxa de aplicação pretendida) e preencha a outra metade com uma quantidade igual de solo de controle. Use o divisor para separá-los e marque sua localização.
2. Envolve o recipiente de vidro com papel alumínio para evitar a penetração de luz nas subcamadas do solo.
3. Com a divisória no lugar, regue suavemente os dois lados para garantir a umidade, sem saturar.
4. Remova o divisor e adicione 20 minhocas ao longo do local do divisor.
5. Coloque uma gaze ou plástico perfurado sobre a parte superior para evitar que as minhocas escapem e, ao mesmo tempo, permitir a entrada de ar e luz. O plástico ajudará a manter a umidade.
6. Deixe em repouso por 48 horas, mantendo um ciclo artificial de 16/8 dia/noite.
7. Após 48 horas, reinsira o divisor em seu local marcado.
8. Conte o número de minhocas em cada lado. Se uma minhoca foi cortada, adicione 0,5 a cada lado, independentemente da quantidade. Não conte as minhocas mortas.
9. Repita o teste pelo menos cinco vezes para verificar a significância dos resultados.

Se os solos com adição de biochar apresentarem um comportamento de evasão significativo em comparação com o solo de controle em vários testes, isso pode sugerir uma possível toxicidade no solo. O biochar não deve ser aplicado ao solo sem uma investigação mais aprofundada. Por outro lado, se as minhocas não evitaram o biochar, ele é seguro para aplicação no solo.

Uma metodologia padronizada para esse teste está disponível na Organização Internacional de Padronização (ISO 17512-1:2008); pode ser feito o download dela mediante o pagamento de uma taxa.

Limitações do teste de evasão de minhocas

Um estudo sobre o teste de evasão revelou que a eficácia do teste variava de acordo com o poluente e o nível de contaminação. O estudo concluiu que o biochar pode ser considerado tóxico se menos de 20% das minhocas permanecerem no solo com biochar. As limitações do teste incluem o fato de que ele não identificou todos os solos contaminados, de que ele pode detectar apenas reações de sensibilidade e evasão a determinados contaminantes e concentrações e não pode vincular uma propriedade específica ao comportamento de evasão. Para obter mais informações sobre o teste de evasão, consulte a referência.¹³

CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS E TESTES DE CAMPO

A otimização dos benefícios e da rentabilidade do biochar em áreas agrícolas, com seus tipos de solo, suas restrições e plantios, exige testes de campo para avaliar os efeitos do biochar sobre a produtividade, a resistência a doenças ou a qualidade das culturas. Os agricultores interessados nos efeitos do biochar em seus solos, ou na relação entre as mudanças no solo e os efeitos nas culturas, precisarão coletar amostras de seus solos e analisá-las quanto a várias características, inclusive níveis de nutrientes e densidade aparente.

Esta seção descreve os elementos essenciais dos testes de campo e da amostragem do solo e inclui referências a recursos.

Testes de campo

O processo de realização de ensaios de campo para testar a eficácia do biochar envolve várias considerações importantes.

Tratamento de controle

O estabelecimento de um tratamento de controle é essencial como linha de base para a comparação dos efeitos da aplicação do biochar. O controle é uma parte do solo experimental que tem um manejo idêntico em relação a todos os aditivos e outras condições (como lavoura, sombreamento, espaçamento entre plantas, manejo de pragas e doenças), exceto pelo próprio tratamento adicional com biochar. Geralmente é uma prática agrícola “normal”.

Replicação

Os testes de campo devem ser realizados em vários locais para levar em conta as variações na qualidade do solo, drenagem, sombreamento etc. Alguns fatores, como resíduos agrícolas de práticas de manejo anteriores, bancos de sementes de ervas daninhas ou pressão de pragas ou doenças de áreas adjacentes, podem ser totalmente desconhecidos. Se a zona de tratamento com biochar for atribuída de forma desigual a esses múltiplos “fatores de confundimento”, os resultados positivos ou negativos poderão ser atribuídos ao biochar quando, na verdade, são devidos a um ou mais destes fatores. Para reduzir a possibilidade de fatores de confundimento, é melhor aplicar cada tratamento em várias parcelas ou faixas, chamadas de réplicas. A replicação em pelo menos três a cinco parcelas é necessária para determinar a significância estatística ou a confiabilidade dos resultados.

Projeto experimental

As considerações sobre o projeto incluem:

- Replicação (muitos lotes distribuídos aleatoriamente é a melhor estratégia).
- Tamanho da parcela (parcelas com cinco a dez plantas, pelo menos, para medir a produtividade, a resistência a doenças etc.).
- Efeito de borda (as plantas nas bordas das zonas podem experimentar ambientes diferentes).
- Tratamento igualitário (o controle de lavoura, ervas daninhas, pragas e doenças deve ser uniforme em todas as unidades, a menos que esses fatores estejam sendo investigados).
- Ensaio cegos (sem rótulos, por exemplo, para evitar o viés inconsciente do operador de campo).
- Escolha da cultura (milho, feijão e cenoura são fáceis de avaliar; a abóbora pode se misturar e os tomates produzem por muito tempo, dificultando a coleta de dados).
- Preservação de amostras (reter amostras de biochar e de solo para comparar as características, caso um biochar se destaque, ou para estabelecer uma linha de base para monitorar as mudanças ao longo do tempo).

Taxas e métodos de aplicação

O biochar pode ser aplicado sozinho ou com outros aditivos, usando técnicas como a mistura uniforme do solo superficial, a aplicação em covas de plantio, em faixas ou em cobertura. As taxas de aplicação normalmente variam de cinco a 50 toneladas por hectare, mas o biochar precisa ser corrigido apenas na zona de raiz esperada das plantas. Além disso, o biochar aprimorado, os fertilizantes compostos de biochar e os complexos biochar-minerais podem ser projetados para serem eficazes com taxas de aplicação muito menores, semelhantes às do fertilizante comum.

Manuseio de biochar

O biochar é leve, quebradiço, empoeirado e pode entrar em combustão espontânea se estiver muito seco, por isso requer um manuseio cuidadoso. Técnicas como umedecimento ou peletização e incorporação ao solo subsuperficial podem ajudar a controlar o risco de combustão, a poeira e minimizar as perdas por erosão e vento.

Medições de rendimento

As colheitas devem ser coletadas de várias plantas em cada parcela experimental, evitando efeitos de borda. Os dados necessários para dimensionar seus resultados para um campo de produção completo (por exemplo, plantas por área ou metros lineares) devem ser coletados de forma consistente e registrados para análise.

Análise de resultados

A análise estatística ajuda a avaliar a importância das diferenças entre os tratamentos. A representação gráfica dos dados ajuda a interpretar e divulgar os resultados.

Divulgação dos resultados

O compartilhamento de resultados por meio de plataformas como o Registro de Ensaio da Iniciativa Internacional de Biochar (IBI) facilita a colaboração e contribui para o conhecimento coletivo sobre a eficácia do biochar.

Se você quiser obter mais detalhes sobre a execução de testes ou ensaios em larga escala para testar os efeitos do biochar no crescimento das plantas, consulte o capítulo de Julie Major em *The Biochar Revolution*¹ ou seu *IBI Guide to Conducting Field Trials*³, que apresenta os processos necessários para ensaios científicos precisos.

Medição da densidade aparente

O biochar pode ajudar a diminuir a densidade aparente, o que melhora a estrutura do solo, a capacidade de retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a aeração, além de reduzir o risco de erosão. Portanto, a medição da densidade aparente ajuda a avaliar a eficácia do biochar no aprimoramento da qualidade do solo, da produtividade das culturas e da sustentabilidade ambiental. Em geral, a densidade aparente é medida retirando-se o solo em amostras indeformadas (anel metálico de volume conhecido) e, em seguida, secando o solo completamente. A massa do solo seco (menos o anel), dividida pelo volume do anel, fornece a densidade aparente. O biochar geralmente tem uma densidade menor que a do solo. Você pode medir as alterações nos estoques de carbono após a aplicação do biochar medindo as alterações na densidade aparente do solo.

Amostragem do solo

A amostragem do solo antes e depois da aplicação do biochar traz uma visão da composição e das características do solo antes e depois da intervenção. As amostras devem ser coletadas em vários locais de cada parcela e enviadas para análise das principais propriedades do solo, como pH, níveis de nutrientes, conteúdo de matéria orgânica e atividade microbiana, que são essenciais para o crescimento das plantas e a saúde do solo.

Os resultados fornecem informações valiosas sobre as mudanças no solo e nas plantas induzidas por aditivos de biochar. Além disso, a amostragem do solo permite o monitoramento de tendências de longo prazo, ajudando os agricultores e pesquisadores a entender como o biochar interage com diferentes tipos de solo e climas ao longo do tempo. Essas informações são cruciais para otimizar as taxas de aplicação de biochar e outras estratégias para maximizar seus benefícios de aumentar a fertilidade do solo, melhorar a produtividade das culturas, atenuar os impactos ambientais, como as emissões de gases de efeito estufa e o escoamento de nutrientes e, principalmente, sua lucratividade.

Considerações sobre a amostragem representativa do solo

- Se seu experimento durar mais de uma estação de cultivo, a amostragem anual do solo deve ocorrer na mesma época todos os anos, para corresponder à disponibilidade de nutrientes que varia ao longo do ano.
- A amostragem antes do plantio ou após a colheita tende a ser a mais fácil do ponto de vista logístico.
- O solo que está muito úmido ou muito seco pode ser difícil de ser amostrado.
- O solo pode variar muito em uma pequena área.

Onde fazer a amostragem?

- Em uma parcela (aproximadamente 4 por 4 metros), você deve coletar solo de três a cinco locais diferentes para obter a média da variabilidade do solo.
- Evite as bordas dos tratamentos.
- Manter um padrão aleatório ou regular.

- Se estiver usando linhas de cultivo, considere onde o fertilizante pode estar concentrado ao escolher os locais de amostragem do solo. Em uma parcela, você pode escolher três locais nas linhas de cultivo e dois entre as linhas, ou escolher todos os pontos de amostragem próximos à zona radicular, caso essa seja a área de maior interesse de monitoramento.

Como fazer a amostragem?

- Pode ser usada uma espátula ou pá; também há muitos trados e perfuradores feitos para essa tarefa específica.
- Use um anel de alumínio se estiver coletando amostras para determinar a densidade aparente do solo.
- Use a mesma ferramenta todas as vezes e da mesma maneira.
- Certifique-se de que esteja coletando as amostras de solo na mesma profundidade todas as vezes (crucial, pois pode haver uma rápida mudança de propriedades com a profundidade, especialmente ao fazer a transição para fora da zona da raiz).
- A camada superficial (primeiros 10-20 cm) é geralmente priorizada, pois é que mais influencia a disponibilidade de nutrientes para as culturas.
- Identifique cada amostra, bandeja ou saco assim que ela for coletada, para evitar misturar as amostras e ter erros de rotulagem ou perda de amostras.
- Comece a secar o solo ao ar livre assim que possível, espalhando cada amostra sobre pedaços de plástico ou papel e deixando-a por vários dias até secagem. Observação: Evite manter as amostras em sacos plásticos, pois isso favorece a formação de mofo.
- Não seque ao ar se estiver coletando amostras para testes que exijam solos úmidos (por exemplo, testes de nitrogênio inorgânico ou biota do solo).
- Armazene suas amostras, se possível, depois de concluir os testes. Isso possibilitará uma nova análise ou mais testes posteriormente.

Amostra composta

Uma amostra composta é formada por amostras coletadas de vários locais em uma unidade experimental. Coloque todas as subamostras de uma unidade experimental em um balde e misture bem com a mão, quebrando os torrões grandes. Acumule 300 g de vários locais no balde e descarte o restante do solo. Não se esqueça de etiquetar com precisão o saco em que o solo é colocado.

Quantificação de carbono

Quantificar o aumento do sequestro de carbono devido a mudanças nas práticas agrícolas é importante para se qualificar para créditos de carbono. Métodos específicos para quantificar o biochar no solo estão sendo desenvolvidos. Até que esses testes estejam disponíveis ao público, a melhor alternativa atual é analisar o carbono total no solo e comparar a quantidade de carbono total no solo com biochar em comparação com o solo de controle (o solo que não recebeu biochar). O solo controle informará a quantidade de carbono não proveniente do biochar presente no solo. Entretanto, o biochar não se degrada facilmente e nem todas as análises de rotina de carbono ou matéria orgânica do solo o detectam. Portanto, é importante solicitar especificamente uma análise de carbono total, que é realizada por meio de combustão seca em um analisador C/N. Em caso de dúvida, entre em contato com o laboratório e explique o que você precisa.

Análise de amostras

Existem kits do tipo “faça você mesmo” disponíveis para analisar algumas propriedades dos solos (por exemplo, pH). Entretanto, para quem busca uma análise mais confiável da fertilidade do solo, um laboratório especializado é recomendado. Um laboratório regional de testes de solo pode realizar análises especificamente projetadas para os solos de sua região. Para encontrar um laboratório de testes de solo na sua região, entre em contato com serviços de extensão cooperativos ou governamentais, universidades com departamentos de agronomia ou lojas de jardinagem e produtos agrícolas. Muitos laboratórios têm formulários de pedido on-line e oferecem pacotes de análise.

MAIS INFORMAÇÕES

Conforme mencionado na Introdução, este capítulo foi resumido e atualizado a partir de dois capítulos do livro *The Biochar Revolution 1* (do Capítulo 8, *Characterising Biochars: Attributes, Indicators, and At-Home Tests*, de Hugh McLaughlin, e do Capítulo 14, *Simple Biochar Tests for Farmers & Gardeners*, de Julie Major e Kelpie Wilson), e de outros artigos publicados pelos mesmos autores.^{2,3} Também se baseia no trabalho publicado pela International Biochar initiative (IBI)^{4,5}, pelo European Biochar Certificate (EBC)⁶ e pelo *ANZBIG Code of Practice*.⁷ Mais detalhes e testes podem ser encontrados nesses recursos. Para testes mais complexos de biochar para gerar dados válidos para a análise da significância estatística dos resultados, consulte o Guia IBI, que está disponível on-line em www.biochar-international.org/publications/IBI.



Referências

1. Taylor P. (2010). *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture & Environment (A transformação da agricultura e do meio ambiente)*. NuLife Publishing
2. McLaughlin P.E. et al. (2009). All Biochars are Not Created Equal, and How to Tell Them Apart. Versão 2 (outubro) substituindo a versão original publicada na North American Biochar Conference, Boulder, CO (agosto de 2009)
3. Major J. (2009). A Guide to Conducting Biochar Trials. Iniciativa Internacional de Biochar. https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2023/01/IBI_Biochar_Trial_Guide_final.pdf

4. IBI Biochar Classification Tool. biochar-international.org/resources/biochar-classification-tool/
5. Definição de produto padronizado da IBI e diretrizes de teste de produto para biochar usado no solo. https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2020/06/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final2.pdf
6. Métodos analíticos da EBC. www.european-biochar.org/en/ct/8-Analytical-Methods
7. ANZBIG (2021). Code of Practice for the Sustainable Production and Use of Biochar in Australia and New Zealand (Código de Prática para Produção e Uso Sustentável de Biochar na Austrália e Nova Zelândia). anzbig.org/wp-content/uploads/2021/11/ANZBIG-Biochar-Code-of-Practice_22Nov2021_Version1.0-1.pdf
8. Singh B., Camps-Arbestain M., Lehmann J. (Eds) (2017). *Biochar: A Guide to Analytical Methods*. CSIRO Publishing.
9. Aller D., Bakshi S., Laird D.A. (2017). Método modificado para análise de proximidade de biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 124: 335-342 doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012
10. Gray M. et al. (2014). Captação de água em biochars: Os papéis da porosidade e da hidrofobicidade. *Biomassa e bioenergia* 61 196-205 doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.010
11. Adhikari S. et al. (2023). Evaluating Fundamental Biochar Properties in Relation to Water Holding Capacity (Avaliação das propriedades fundamentais do biochar em relação à capacidade de retenção de água). *Chemosphere*. 328 138620 doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138620
12. Olszyk D.M. et al. (2018). A Rapid-Test for Screening Biochar Effects on Seed Germination (Um teste rápido para triagem dos efeitos do biocarvão na germinação de sementes). *Comunicações Ciência do Solo e Análise de Plantas* 49:1-17 doi.org/10.1080/00103624.2018.1495726
13. Hund-Rinke K. e Wiechering H. (2001). Earthworm avoidance test for soil assessments. *J Soils and Sediments* 1:doi.org/10.1007/BF02986464

Agradecimentos

Agradecemos aos colegas de diversas instituições públicas e privadas que compartilharam dados, experiências e aprendizados, viabilizando os estudos de caso sobre aplicações de biochar no Brasil.

Registramos nosso reconhecimento à Embrapa Mandioca e Fruticultura, na pessoa da pesquisadora Dra. Fabiana de Abreu Rezende, e à Embrapa Territorial, na pessoa do pesquisador Dr. José Dilcio Rocha, pelo suporte técnico e científico na revisão da tradução da obra e pela colaboração que enriqueceram os estudos apresentados.

Agradecemos à NetZero pelo apoio financeiro à publicação, que permitiu ampliar o alcance desta edição e fortalecer a disseminação de soluções baseadas em ciência.

Nosso agradecimento também ao Departamento de Geografia e Meio Ambiente da PUC-Rio, na pessoa da Profa. Dra. Agnieszka Ewa Latawiec, pelo apoio à revisão da tradução desta obra.

Gostaríamos de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2025/01169-6, concedido a Dra. Amanda Ronix, pelo trabalho técnico e científico de tradução que viabilizou o desenvolvimento desta obra e pela coordenação do processo editorial.

Por fim, agradecemos à equipe editorial da PUC-Rio, especialmente ao Felipe Gomberg, aos revisores e a todos os parceiros que, direta ou indiretamente, contribuíram para tornar possível esta edição brasileira.

Sobre os autores

Paul Taylor

Paul é o editor do livro *The Biochar Revolution*. Ele se formou com a Medalha Universitária em física pela Universidade de NSW, recebeu um PhD da Universidade do Colorado e trabalhou no Harvard Smithsonian Astrophysical Observatory e no MIT. Atualmente, vive na Austrália e nos EUA, pesquisando e fazendo apresentações sobre biochar e mudanças climáticas.

Stephen Joseph

Stephen é formado em engenharia metalúrgica e tem doutorado em arquitetura e antropologia pela Universidade de NSW. Ele é membro do Institute of Energy e foi premiado com uma ordem da Austrália por seu trabalho em energia renovável e biochar. Foi CEO de uma empresa de energia renovável e depois de uma empresa de fertilizantes de biochar. Foi professor visitante e consultor do setor de biochar e da comunidade de pesquisa. Escreveu mais de 160 artigos revisados por pares e capítulos de livros nos últimos 14 anos.

O biochar pode ser considerado uma das alternativas mais promissoras disponíveis atualmente para atuar na mitigação das mudanças climáticas, pois pode contribuir para o armazenamento duradouro de carbono no solo, elevar a fertilidade e pode impulsionar a produtividade agrícola. Este livro é uma referência prática, escrita em linguagem direta e com recomendações aplicáveis no campo. Pensado para produtores, técnicos, formuladores de políticas e estudantes, oferece um caminho seguro para decidir quando, como e por que usar biochar de forma eficiente.



Esta edição alinha-se principalmente aos ODS 2 e 13.