



**13**

## **Biochar e o eucalipto**

Claudia Maria Branco de Freitas Maia

Marcela Guiotoku

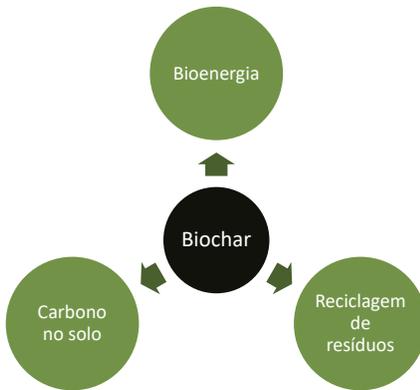
Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto

Lucília Maria Parron Vargas



## Introdução

O uso do biochar na silvicultura é uma proposta tecnológica que visa a captura de carbono no solo, assim como a melhoria de sua qualidade agronômica. Para contextualizar a origem desta proposta, é preciso falar sobre um tipo de solo de alta fertilidade que ocorre com grande frequência às margens de diversos rios na região Amazônica: as Terras Pretas. As Terras Pretas ou Terras Pretas de Índio são solos antropogênicos da Amazônia em diversos sítios arqueológicos de aldeias indígenas pré-colombianas, espalhadas desde Rondônia e Alto Rio Negro até as regiões mais próximas ao delta do Rio Amazonas. Além de vestígios tais como fragmentos de cerâmica e ossos, estes solos possuem uma alta fração de carbono pirogênico em sua matéria orgânica, associada a uma fertilidade muito acima daquela encontrada nos solos adjacentes (Cunha et al., 2009; Teixeira et al., 2009; Mangrich et al., 2011). O carbono pirogênico provém de fragmentos de carvão, acumulados por longos períodos de tempo, presentes ao longo de todo o perfil do solo, muitas vezes alcançando profundidades maiores que 2 m. O estudo destes solos revelou fortes indícios de que esta fração pirogênica, quando associada à matéria orgânica humificada e aos nutrientes sistematicamente adicionados a estes solos no processo de sua formação, levaram à sustentabilidade de sua fertilidade (Lehmann, 2009; Verheijen et al., 2014). Este conhecimento conduziu à proposta de se adicionar carvão ao solo para a melhoria de suas propriedades físicas, químicas e biológicas e, simultaneamente, para o aumento das reservas de carbono em sua fração mais estável da matéria orgânica (Mangrich et al., 2011; Novotny et al., 2015). O termo biochar, ou biocarvão, foi adotado pela comunidade científica para diferenciar o carvão de uso agronômico do carvão de uso energético. Por definição, biochar é uma matriz heterogênea, rica em carbono aromático e elementos minerais presentes em suas cinzas, produzido pela pirólise de biomassa obtida por critérios sustentáveis, por meio de tecnologias limpas e sob condições controladas (European Biochar Foundation et al., 2013). Segundo a International Biochar Initiative, o biochar pode ser assim chamado quando seu propósito é o uso agropecuário ou florestal (IBI, 2015). Ademais, três importantes estratégias são fortemente recomendadas dentro do conceito do biochar: a reciclagem de resíduos orgânicos, a geração de energia renovável e a agricultura de baixa emissão de carbono (Figura 1). Neste contexto, a biomassa florestal e seus resíduos (tanto os gerados na colheita, como os gerados por sua indústria), apresentam grande potencial como matéria-prima para a produção de biochar. Espécies florestais de rápido crescimento, especialmente o eucalipto, são ainda mais promissoras quanto a este potencial e, não por acaso, esta é a espécie florestal mais estudada para fins de produção de biochar. No Brasil não existe legislação específica que regulamente a produção ou classifique a qualidade de biochar. O carvão de uso agrícola hoje pode ser registrado como um material condicionador de solo e está sujeito às normas que regulamentam o uso destes materiais. Neste capítulo,



**Figura 1.** Estratégias recomendadas para a produção e uso de biochar.

são apresentados os principais enfoques e resultados alcançados na pesquisa sobre biochar envolvendo espécies de eucaliptos, com destaque para as pesquisas neste tema realizadas pela Embrapa e seus parceiros.

## O eucalipto como matéria-prima para a produção de biochar

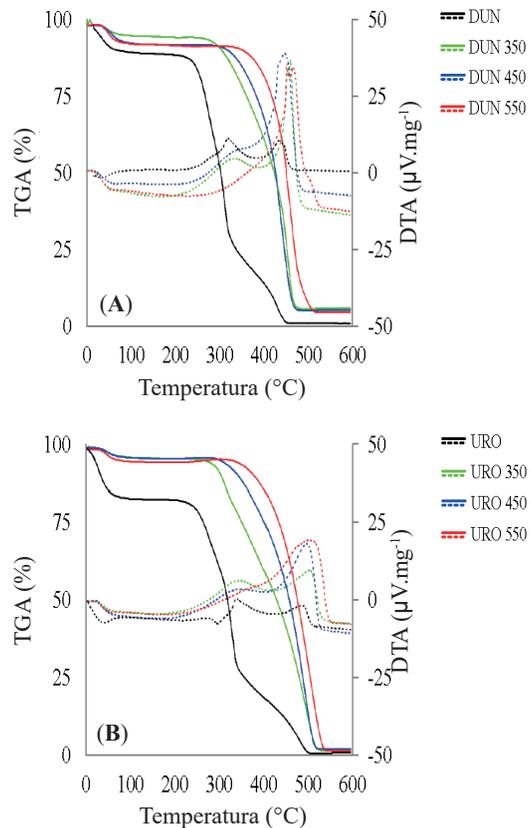
Uma grande variedade de biomassas e opções tecnológicas de pirólise podem ser usadas na produção de biochar e a sua qualidade depende destas opções. Para a produção de biochar, é imprescindível conhecer a composição química da matéria-prima (teores de celulose e hemicelulose, lignina, cinzas e extrativos), uma vez que a dinâmica de degradação térmica depende desta composição. Considera-se que biomassas ricas em lignina produzem um carvão de melhor qualidade e com maior poder calorífico (Demirbas, 2002). Além disto, quanto maior o teor de lignina, maior o rendimento em sólido após a pirólise (Laird et al., 2010; Lee et al., 2013). Por outro lado, biomassas mais ricas em celulose pirolisam mais rapidamente do que as demais (Gani; Naruse, 2007). Em espécies de eucaliptos, o teor de lignina varia com a idade da planta, altura do tronco, qualidade de sítio, tipo de clima no local de plantio e com a espécie estudada. A Tabela 1 mostra a composição química da madeira de diferentes espécies ou clones estudados pela Embrapa. Os percentuais de lignina variam desde 20,2% (como ocorre em *Eucalyptus smithii*) a 31,7% (*E. alba*), com média de 26%. A média da relação holocelulose/lignina nos eucaliptos está em torno de três. A madeira das árvores, em geral, é composta de celulose, lignina e hemicelulose em proporções aproximadas de 2:1:1, e a madeira dos eucaliptos está dentro destas proporções (Tullus et al., 2010).

Tabela 1. Teores (%) de extrativos, lignina e holocelulose da madeira de eucaliptos (*Eucalyptus* spp.).

Espécie	Extrativos %	Lignina %	Holocelulose %	Referência
<i>E. badjensis</i>	4,7	23,9	71,4	Pereira et al. (2003)
<i>E. paniculata</i>	4,9	23,7	71,3	Pereira et al. (2003)
<i>E. robusta</i>	6,7	28,5	64,8	Pereira et al. (2003)
<i>E. smithii</i>	3,9	20,2	75,9	Pereira et al. (2003)
<i>E. viminalis</i>	6,1	23,7	70,2	Pereira et al. (2003)
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> híbrido	5,1	27,2	67,7	Pereira et al. (2003)
<i>E. benthamii</i>	3,2	25,2	71,6	Pereira et al. (2001)
<i>E. dunnii</i>	1,0 <sup>(5)</sup>	22,3 <sup>(4)</sup>	76,7 <sup>(5)</sup>	Pereira et al. (2000)
<i>E. alba</i>	ND <sup>(1)</sup>	31,7 <sup>(2)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. botryoides</i>	ND	28,1 <sup>(2)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. camaldulensis</i> var. <i>obtusata</i>	ND	30,1 <sup>(3)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. citriodora</i>	ND	22,4	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. cloeziana</i>	ND	28,2 <sup>(2)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. dalrympleana</i> spp. <i>dalrympleana</i>	ND	25,9	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. deanei</i>	ND	26,7 <sup>(3)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. denticulata</i>	ND	25,0	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. dunnii</i>	ND	24,7 <sup>(5)</sup>	ND	Alho (2012)
<i>E. fastigata</i>	ND	26,1 <sup>(4)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. globulus</i> spp. <i>bicostata</i>	ND	23,5 <sup>(4)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. grandis</i>	ND	25,2 <sup>(4)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. maculata</i>	ND	23,3	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. microcorys</i>	ND	24,4	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. nitens</i>	ND	24,3 <sup>(6)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. nova-anglica</i>	ND	26,0	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. obliqua</i>	ND	26,4	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. pellita</i>	ND	30,6 <sup>(5)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. pilularis</i>	ND	25,2	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. propinqua</i>	ND	29,7 <sup>(2)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. regnans</i>	ND	23,7	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. saligna</i>	ND	25,9	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. seeana</i>	ND	27,6 <sup>(2)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. tereticornis</i>	ND	30,4	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. urophylla</i>	ND	27,3	ND	Pereira et al. (2000)
<i>E. urophylla</i>	ND	24,3	ND	Alho (2012)
<i>E. viminalis</i>	ND	24,9 <sup>(7)</sup>	ND	Pereira et al. (2000)

<sup>(1)</sup>ND não determinado; <sup>(2)</sup>média de 2 registros; <sup>(3)</sup>média de 6 registros; <sup>(4)</sup>média de 4 registros; <sup>(5)</sup>média de 3 registros; <sup>(6)</sup>média de 7 registros; <sup>(7)</sup>média de 11 registros.

O biochar é obtido do tratamento térmico da biomassa, na maioria das vezes via pirólise. A pirólise envolve o tratamento da biomassa sob temperaturas que variam de 300 °C a 900 °C, sob atmosfera com baixa concentração de oxigênio. A primeira etapa da pirólise envolve a secagem e, em seguida, ocorre a remoção progressiva dos voláteis pirolíticos (Neves et al., 2011). Com o aumento da temperatura ao longo da pirólise, os componentes da madeira passam por um processo de decomposição, sendo que as hemiceluloses se degradam entre 200 °C e 260 °C, as celuloses entre 240 °C e 350 °C e a lignina entre 280 °C e 500 °C. Em torno de 500 °C ocorre a etapa de pirólise primária e a degradação destes componentes está praticamente completa (Neves et al., 2011). Acima de 500 °C, a pirólise secundária começa a predominar com a quebra (cracking) dos produtos pirolenhos gerados na primeira etapa, havendo uma perda considerável de oxigênio elementar, principalmente via óxidos de carbono (CO e CO<sub>2</sub>) e um aumento nas reações que levam à condensação do carbono e sua aromatização. Assim, para a obtenção de biochar, a definição da temperatura de pirólise é de extrema importância para a qualidade do produto final, uma vez que, sob temperaturas mais baixas, o biochar apresentará características químicas muito diferentes daquele obtido sob temperaturas acima de 500 °C. Esse fato pode ser ilustrado na Figura 2, onde são mostradas curvas de análise termogravimétrica (TGA) e análise térmica diferencial (DTA) para biochars oriundos de duas espécies de eucalipto: *E. dunnii* (a) e *E. urophylla* (b); pirolizados em três temperaturas diferentes 350 °C, 450 °C e 550 °C (Alho, 2012). Nestas curvas, observa-se um primeiro evento térmico correspondente à perda de água em todas as amostras. Para as amostras in natura, segue-se a degradação da hemicelulose e celulose (próximo de 350 °C) e posteriormente da lignina (acima de



**Figura 2.** Curvas de análise termogravimétrica - TGA (linha cheia) e análise térmica diferencial - DTA (linha tracejada) para *Eucalyptus dunnii* (A) e *Eucalyptus urophylla* (B) in natura e seus respectivos biochars produzidos a 350 °C, 450 °C e 550 °C.

400 °C). Nos materiais pirolisados sob temperaturas mais baixas (350 °C e 450 °C) ainda é possível notar a presença de grupos funcionais em alguns componentes do carvão (carboxilas, carbonilas e hidroxilas) através do “ombro” próximo sob temperatura de 350 °C nas curvas de DTA. Nos biochars de *E. dunnii* e *E. urophylla* pirolisados a 550 °C, esses grupamentos não são identificados (Alho, 2012).

De modo geral, abaixo desta temperatura, o biochar carrega um maior número de funções oxigenadas em sua matriz estrutural, enquanto que, sob temperaturas mais altas, a razão O/C é menor devido à decomposição térmica destes grupos (Novotny et al., 2015). Estas características físico-químicas determinam suas funções predominantes no solo, visto que um biochar mais funcionalizado tende a mostrar maior atividade em atributos tais como a capacidade de troca iônica e sua relação com nutrientes. O biochar pouco funcionalizado, por outro lado, tende a apresentar estrutura com grupos aromáticos e policondensada, levando a um material mais ativo quanto à capacidade de adsorção, apropriado à depuração de solos poluídos. Assim, com a escolha correta das condições de pirólise, é possível obter biochars com diferentes propriedades funcionais (Masek; Brownsort, 2010). Na Tabela 2, são mostrados resultados de análise elementar de *E. dunnii* e *E. urophylla* e suas respectivas temperaturas de pirólise.

**Tabela 2.** Análise elementar de biochars de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus urophylla* sob diferentes temperaturas.

Espécie	C (%)	H (%)	N (%)	O* (%)	Referência
<i>E. dunnii</i> 350 °C	70,61	4,37	0,09	24,93	Alho (2012)
<i>E. dunnii</i> 450 °C	70,90	4,17	0,08	24,85	Alho (2012)
<i>E. dunnii</i> 550 °C	78,14	2,80	0,09	18,97	Alho (2012)
<i>E. urophylla</i> 350 °C	67,52	4,44	0,07	27,97	Alho (2012)
<i>E. urophylla</i> 450 °C	75,29	3,85	0,13	20,73	Alho (2012)
<i>E. urophylla</i> 550 °C	81,94	3,14	0,20	14,72	Alho (2012)

\*Valor obtido por diferença matemática: 0% = 100 – (C%+H%+N%).

Os valores encontrados de carbono e oxigênio elementar para os biochars pirolisados, sob diferentes temperaturas, corroboram com os dados termogravimétricos e evidenciam que a temperatura de pirólise e o tipo de matéria-prima influenciam no produto final, que terá maior ou menor concentração destes elementos na sua composição.

Existem vários trabalhos na literatura onde a pirólise de biomassa de eucalipto é estudada para produção de biochar (Kim et al., 2013; Doumer et al., 2015; Wrobel-Tobiszewska et al., 2015; Grima-Olmedo et al., 2016). Outros estudos relatam o efeito do biochar de eucalipto sobre diferentes aspectos do solo (Butnan et al., 2015; Drake

et al., 2015; Raboin et al., 2016; Zhang et al., 2016). Os resultados são, às vezes, controversos e de interpretação complexa, visto envolverem solos e processos de pirólises diferentes. A Embrapa vem atuando em diferentes aspectos na pesquisa sobre biochar de biomassa de eucaliptos, sua caracterização, efeito no solo e uso no cultivo de florestas (Carvalho et al., 2014, 2016; Peixoto et al., 2018; Silva et al., 2018). Um estudo conduzido na Embrapa Arroz e Feijão, sobre o efeito da adição de biochar de eucalipto (nas doses 8 Mg, 16 Mg e 32 Mg de biochar ha<sup>-1</sup>) em solo cultivado com feijoeiro (Silva et al., 2011), demonstrou que sem aplicação de N mineral: a adição de qualquer dose de biochar reduziu o teor de alumínio no solo; a dose 8 Mg de biochar ha<sup>-1</sup> aumentou as concentrações de fósforo e reduziu as de cálcio, magnésio e o pH em relação às outras doses de biochar testadas e ao controle; e a dose 32 Mg de biochar ha<sup>-1</sup> aumentou a produtividade do feijoeiro comum. Com aplicação de N mineral: as doses 16 Mg e 32 Mg de biochar ha<sup>-1</sup> reduziram os teores de cobre no solo e com ou sem aplicação de N mineral: a adição de 32 Mg de biochar ha<sup>-1</sup> aumentou as concentrações de potássio no solo.

## O efeito do biochar em mudas e plantios de eucalipto

O biochar para fins florestais envolve não somente seu uso em plantios, mas também em substratos para produção de mudas florestais. Embora o uso de casca de arroz carbonizada ou torrefada em substratos para mudas seja uma prática relativamente comum e antiga, o estudo sobre o uso de carvão de outros tipos de biomassa se acentuou na última década, após o surgimento da proposta do biochar (Dumroese et al., 2011; Belda et al., 2016; Krapfl et al., 2016; Rezende et al., 2016; Barros et al., 2017; Lonardo et al., 2017; Soares et al., 2019; Zhang et al., 2019). Quando presente em substratos, o biochar parece atuar no sentido de reter nutrientes em sua matriz e proporcionar uma liberação mais equilibrada destes nutrientes para as mudas, o que levaria também a menores perdas de nutrientes do substrato por percolação ou lixiviação. Especificamente sobre o uso de biochar para a produção de mudas de eucaliptos, a Embrapa avaliou o desempenho de mudas cultivadas em substratos com doses crescentes de biochar e de biochar ativado. Neste estudo, o biochar foi preparado a partir de resíduos de serrarias do norte do Mato Grosso. A ativação consistiu na aplicação de vapor d'água sob temperaturas acima de 400 °C, na fase terminal da pirólise. Os tratamentos com 75% e 100% de biochar ativado mostraram os melhores resultados para o crescimento em altura e diâmetro do coleto (Barros et al., 2016). Outro estudo, porém, não registrou diferenças quanto à qualidade de mudas de *E. dunnii*, quando carvão foi adicionado ao substrato (Sass et al., 2018). Em outro trabalho, avaliou-se a eficiência de biochar de eucalipto como condicionador de substrato para o desenvolvimento de mudas florestais de carvoeiro (*Tachigali vulgaris*) como espécie representativa do

Cerrado (Souchie et al., 2011). Os resultados mostraram um incremento significativo na altura das mudas, número de folhas, diâmetro do coleto e na massa seca radicular e da parte aérea, assim como forte correlação positiva com as concentrações de biochar.

Na última década, estudos sobre o uso de biochar em plantios florestais têm sido mais frequentes (Gómez-Luna et al., 2009, 2012; Drake et al., 2015; Fernández-Ugalde et al., 2017; Gao et al., 2017; Lin et al., 2017; Zhang et al., 2017; Zhou et al., 2017; Ramlow et al., 2018; Zhang et al., 2019), incluindo alguns estudos sobre o uso de biochar em plantios de eucaliptos (Pereira et al., 2013; Leal et al., 2015; Farias et al., 2016; Peixoto et al., 2018; Silva et al., 2018; Woiciechowski et al., 2018). Esses estudos relatam o aumento da condutividade hidráulica e acessibilidade da água da planta, assim como o aumento da concentração de N total e da CTC.

Em parceria com uma empresa reflorestadora do Paraná, a Embrapa está estudando o efeito do uso do biochar como condicionador de solos, em plantios de eucalipto (“urograndis”, híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*). O biochar produzido a partir de resíduos de eucaliptos provenientes de serraria foi aplicado em um Latossolo Vermelho-Amarelo, na região de São Jerônimo da Serra, PR, com dose única (3,2 Mg de biochar ha<sup>-1</sup>), para avaliar a possibilidade de redução de adubação química, ao longo de quatro anos de plantio. Os resultados alcançados até o momento mostraram que o uso de biochar e adubação NPK em plantios de eucalipto aumentaram a atividade da enzima urease do solo, após três meses de plantio (Silva et al., 2018). A urease (ureia amido hidrolase) é a enzima que catalisa a hidrólise de ureia a NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, disponibilizando esta forma nitrogenada para a absorção pelas raízes. Além disto, observou-se a redução da densidade do solo e um aumento na porosidade total em ambas as profundidades estudadas. Foram medidas a altura e o diâmetro do coleto ou do tronco de 20 plantas por parcela, aos 3, 6, 9, 12 e 18 meses de idade. Os resultados gerados até esta idade indicaram que a aplicação somente de biochar não influenciou o crescimento das plantas em altura e diâmetro, em relação ao controle. Os dados dendrométricos foram semelhantes entre a dose de adubação comercial e a dose reduzida em 20%, bem como no caso destas doses de adubação serem aplicadas com ou sem biochar. Estes resultados preliminares indicam, aos 3 meses de idade, um potencial de se reduzir a dose comercial de adubação nas condições ambientais e de manejo existentes no experimento; sendo que o efeito do biochar nos atributos físicos e químicos do solo e no incremento do volume de madeira estão sendo avaliados a cada 12 meses de idade (Peixoto et al., 2018). Ensaios de extração de água demonstraram que, na camada superficial do solo, houve incremento na disponibilidade total de água e nas camadas de maior profundidade houve aumento da macroporosidade e redução da microporosidade. A dose de biochar aplicada neste estudo aumentou a disponibilidade de água do solo (Fogaça et al., 2019). Outro estudo sobre a biologia do solo no mesmo plantio demonstrou que o biochar, produzido por pirólise lenta, a partir de resíduos da madeira de eucalipto, não provocou a fuga de minhocas onde o mesmo foi aplicado no solo,

nem provocou a mortalidade de *Eisenia andrei*, espécie usada como indicadora em estudos ecotoxicológicos (Nicola et al., 2018).

## **Necessidades de pesquisa e tendências futuras**

### **O contexto das mudanças climáticas**

A expansão da agricultura intensiva está associada ao aumento de emissões de gases de efeito estufa (GEE) como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ . A maioria dos solos agrícolas perdeu uma grande parte de sua capacidade de armazenamento de carbono orgânico no solo, tornando-se fonte de GEE (Woolf et al., 2010). No Relatório-Síntese publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em novembro de 2014, seus representantes sugeriram que, para “manter o aquecimento abaixo de 2 °C com custos gerenciáveis”, as emissões de GEE deveriam cair entre 40% a 70% globalmente entre 2010 e 2050, e cair para zero ou abaixo disto até 2100”. Este Relatório apontava ainda que os custos de mitigação seriam tão baixos que “o crescimento econômico global não seria fortemente afetado por eles” (Anderson, 2015). Além das medidas óbvias envolvendo a eliminação de emissões da matriz energética global, a adoção das chamadas tecnologias de emissão negativa (Negative Emission Technologies (NET)) aumentariam efetivamente a chance de sucesso para atingir tal limite de 2 °C, em 344 dos 400 cenários existentes na base de dados do IPCC (Anderson, 2015). Assim, as NET estariam no centro dos debates sobre onde investir em ciência e tecnologia, a fim de se atingir os objetivos recomendados pelo IPCC. Boa parte das tecnologias propostas na literatura, como a de “emissão-negativa”, se encontra em fase de estudos preliminares e longe de serem adotadas de modo efetivo e seguro em suas atuais fases de pesquisa e desenvolvimento, o que inclui certamente o biochar (Fuss et al., 2018; Minx et al., 2018; Nemet et al., 2018). Portanto, uma agenda de pesquisa dirigida para responder questões ainda abertas quanto ao uso seguro do biochar e quanto à finalização de produtos à base de biochar é imprescindível para viabilizar sua adoção como tecnologia de emissão negativa.

### **A aplicação do biochar como prática conservacionista e para melhoria da qualidade do solo**

A aplicação de biochar é uma prática eficiente de conservação do solo. Além de atuar no aumento da fertilidade do solo e da sua capacidade produtiva, resultando no aumento da produtividade das culturas (Liu et al., 2013), essa prática é eficiente na provisão de serviços ecossistêmicos, como aumento do estoque de carbono no solo,

da retenção de água e nutrientes no solo e da fauna edáfica e também na ciclagem de nutrientes e no sequestro de GEE. A aplicação do biochar impacta positivamente na fertilidade do solo por meio do seu efeito na CTC (Souza et al., 2016). O aumento da CTC é atribuído à existência de grupos carboxílicos na superfície do biochar, e também aos grupos carboxílicos expostos de ácidos orgânicos adsorvidos pelo biochar, sendo que ambos contribuem para a carga de superfície do biochar (Liang et al., 2006). Estudos demonstraram que o biochar tem o potencial de melhorar a biodisponibilidade do fósforo na superfície de solos arenosos (Gao; DeLuca, 2018). Além disso, o biochar pode efetivamente adsorver amônia ( $\text{NH}_3$ ), reduzindo sua perda por volatilização (Liu et al., 2017). Embora o biochar tenha uma disponibilidade limitada de nutrientes, a sua alta capacidade de adsorção permite a retenção de nutrientes na zona de enraizamento, aumentando a eficiência de fertilizantes, reduzindo a lixiviação de nutrientes e o escoamento superficial (Li et al., 2019). A alta porosidade do biochar também melhora a qualidade física do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e condutividade hidráulica (Laird et al., 2010; Li et al., 2019). Devido à sua alta porosidade, área superficial e abundância de grupos funcionais, o biochar tem sido avaliado como um material promissor para adsorção e redução da biodisponibilidade de pesticidas em solos poluídos (Liu et al., 2018). É esperado que a melhoria da estrutura e da estabilidade do solo, que ocorre com a aplicação do biochar, resulte na redução da frequência e da magnitude da perda de solo ocasionada por processos erosivos. Todavia, o impacto da aplicação do biochar na magnitude da erosão do solo não está muito claro e requer pesquisas sobre formas de aplicação e de incorporação do biochar ao solo, assim como dos mecanismos envolvidos na retenção de nutrientes.

## Questões a serem respondidas na pesquisa do biochar

Entre as questões abertas, destacam-se algumas mais prementes:

### • Padronização de métodos analíticos e materiais de referência

Um dos desafios encontrados na pesquisa do biochar ou mais especificamente do carbono pirogênico é estabelecer um método simples, barato e preciso para a sua quantificação. O carbono recalcitrante ou não oxidável é uma parte da matéria orgânica fortemente associada ao carbono estável do solo. Na matéria orgânica originada da decomposição e humificação dos detritos orgânicos – vegetais ou animais – depositados no solo, além dos componentes prontamente reciclável ou oxidável, de função primordial na reciclagem de nutrientes e como fonte de energia para a vida microbiana do solo, encontra-se também um componente muito estável e de longa permanência no solo, associado às substâncias húmicas estabilizadas. A longa permanência no solo

destas estruturas ocorre por estarem fortemente protegidas dos agentes intempéricos, ou por serem de natureza química pouco reativa à degradação. Nesta parte da MOS, podem ser encontradas estruturas poliaromáticas ou de hidrocarbonetos de cadeia longa derivadas de ácidos graxos, pouco funcionalizadas e de baixas razões H/C e O/C. As estruturas poliaromáticas podem ser oriundas de processos de humificação de polímeros naturais como as ligninas e polifenóis naturais diversos. Mas estas estruturas podem ser originadas, também, pelo aporte de carbono pirogênico, durante eventos de queimadas ou pela adição de carvão no solo. Os métodos hoje disponíveis para a quantificação desta fração não conseguem distinguir sua origem. Assim, na pesquisa do biochar, ao se quantificar o C total e, por diferença, extraído o C oxidável, não é possível saber que parte vem do biochar e que parte vem da matéria orgânica humificada. Por esta razão, estudos sobre a degradação do biochar, ao longo do tempo, são complexos e exigem muitas vezes técnicas analíticas combinadas para acompanhar seu ciclo de vida no solo (Glaser et al., 1998; Novotny et al., 2015; Chang et al., 2018). Assim, para viabilizar e acelerar as pesquisas sobre o uso do biochar, é necessário o desenvolvimento de métodos analíticos mais simples e precisos.

#### • Programa de controle de qualidade analítica e materiais de referência

Os métodos analíticos adotados pela comunidade científica ao longo de duas décadas de pesquisa sobre biochar vêm sendo cada vez mais modificados, aprimorados e especializados. No início do milênio, os métodos foram adaptados daqueles recomendados para a análise de carvão energético, de carvão arqueológico ou da matéria orgânica de solos. Atualmente, já se dispõe de literatura crítica e revisada baseada nas experiências e, principalmente, nas dificuldades encontradas nos procedimentos analíticos adotados pelos diferentes grupos de pesquisa (European Biochar Foundation et al., 2013; IBI, 2015; Singh et al., 2017). Além da padronização de métodos recomendados, programas de controle de qualidade analítica vêm sendo implementados visando a testar e recomendar procedimentos e protocolos analíticos que permitam a comparação e confiabilidade de resultados. Em estudo analítico interlaboratorial com esta abordagem, foi reconhecido que, entre 38 atributos, somente pH e C apresentaram desempenho aceitável (Bachmann et al., 2016). A variabilidade dos demais atributos foi tão grande que ficou demonstrado a urgência de programas interlaboratoriais e padronização de procedimentos.

Para o sucesso de um programa analítico interlaboratorial, é necessário eleger alguns materiais de referência a serem usados como amostras-controle. Neste aspecto, a madeira de eucalipto se apresenta como um dos mais adequados, não somente pela grande quantidade de informações disponíveis na literatura sobre este material, mas também pelo seu grande potencial (seja da biomassa florestal, seja dos resíduos de sua exploração) como matéria-prima para a produção de biochar. Além disto, plantios

de eucalipto estão presentes em praticamente todos os biomas brasileiros, tornando-o acessível em todo território nacional.

#### • **Recomendações de critérios para produção, condições de pirólise e finalidade de uso**

Para a linha de pesquisa de desenvolvimento de produtos à base de biochar é preciso estabelecer critérios de pirólise que garantam a reprodutibilidade dos materiais obtidos. Estes critérios variam com o tipo de funcionalidade que está sendo buscada no biochar. Assim, por exemplo, para obtenção de materiais mais adsorventes, a serem usados como depuradores do solo, temperatura de pirólise mais alta ou, ainda, a ativação do biochar pode ser desejável. Para um biochar mais funcionalizado, buscando-se maior interação com nutrientes, uma temperatura de pirólise mais baixa pode produzir materiais mais apropriados. Em um determinado sistema de pirólise, os principais fatores que controlam a dinâmica do processo e a qualidade do carvão produzido são a temperatura e a taxa de aquecimento adotada até a temperatura final de pirólise. Mas a atmosfera no reator também afeta o produto final. Em estudos científicos, estes parâmetros precisam ser mais rigorosamente acompanhados e mencionados nas publicações. Muitos trabalhos sobre biochar sequer descrevem o material usado e, ou o processo como foi produzido, impossibilitando a reprodutibilidade ou comparação de resultados de outros estudos.

#### • **Critérios de qualidade: teor mínimo de carbono, cinzas e poluentes**

Embora não haja recomendação específica no Brasil com respeito da qualidade mínima e do uso de biochar, esta é necessária para a regulamentação de um potencial mercado no País. Vários países e centros econômicos já possuem tais recomendações (Meyer et al., 2017) e felizmente podem servir de guia ou diretriz para a atual fase de pesquisas sobre o biochar no Brasil. Porém, como exemplo de outros produtos, estes critérios precisam ser estabelecidos para os solos e climas brasileiros.

#### • **Recomendações de critérios de uso agrônômico e florestal**

Quanto ao uso agrônômico do biochar, muitas questões ainda se encontram sem respostas e precisam ser esclarecidas, desde aquelas envolvendo o manuseio seguro, formas de aplicação, doses máximas seguras e frequência de aplicação, até as que envolvem o manejo, tais como métodos de incorporação no solo em sistemas convencionais ou de plantio direto. Estudos de longa duração e de acompanhamento da degradação do biochar, ao longo de vários anos, são escassos e necessários para a

maior segurança quanto ao seu efeito na matéria orgânica do solo. No caso de plantios florestais, o biochar pode ser usado desde a produção de mudas até o plantio propriamente dito, e muito há ainda para ser desenvolvido quanto ao uso em povoamentos puros ou em sistemas integrados. Estudos incluindo avaliação econômica e ciclo de vida do produto também são necessários para se alcançar ganhos ambientais efetivos, especialmente quanto à imobilização de carbono.

#### **• Desenvolvimento de novos produtos: biochar enriquecido, depurativos, substratos**

Finalmente, uma das linhas de pesquisa que, talvez, traga resultados mais consistentes e melhor potencial de mercado é a do desenvolvimento de novos produtos. O biochar vem sendo estudado não somente em sua forma pura, mas também como material componente de fertilizantes organominerais e, neste sentido, o biochar tem muito a contribuir para o desenvolvimento de fertilizantes com menor impacto nas emissões de GEE, menores taxas de perdas por lixiviação ou percolação de nutrientes, e que levem a uma maior sustentabilidade da fertilidade dos solos, tal como ocorre nas Terras Pretas Amazônicas.

## **Conclusões**

Devido à sua alta eficiência e rápido crescimento, especialmente nas condições de plantio brasileiras, o eucalipto tem um papel de destaque na pesquisa do biochar. Além dos usos tradicionais, como papel, construção e movelaria, sua madeira pode ser usada com alta eficiência na geração de bioenergia, com subprodutos importantes como o biochar. A pesquisa integrada em parceria com outras Unidades da Embrapa e com Universidades tem multiplicado o volume e a abrangência de seus resultados. A Embrapa vem contribuindo de modo constante para a pesquisa sobre a caracterização da qualidade do biochar produzido e seu uso na silvicultura, mas uma discussão detalhada é necessária para estabelecer suas prioridades e as metas a serem atingidas no médio e longo prazos. Políticas públicas que incentivem a implementação do biochar como tecnologia de emissão negativa de gases de efeito estufa, bem como para melhoria da qualidade do solo, precisam estar amparadas por dados consistentes da pesquisa, o que permitiria a promoção de sua adoção pelos agricultores.

## Referências

- ALHO, C. F. B. V. **Efeito da temperatura final de pirólise na estabilidade de biocarvão produzido a partir de madeira de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp***. 2012. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- ANDERSON, K. Duality in climate science. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 898–900, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2559>.
- BACHMANN, H. J.; BUCHELI, T. D.; DIEGUEZ-ALONSO, A.; FABBRI, D.; KNICKER, H.; SCHMIDT, H.-P.; ULBRICHT, A.; BECKER, R.; BUSCAROLI, A.; BUERGE, D.; CROSS, A.; DICKINSON, D.; ENDERS, A.; ESTEVES, V. I.; H EVANGELOU, M. W.; FELLET, G.; FRIEDRICH, K.; GASCO GUERRERO, G.; GLASER, B.; HANKE, U. M.; HANLEY, K.; HILBER, I.; KALDERIS, D.; LEIFELD, J.; MASEK, O.; MUMME, J.; PANEQUE CARMONA, M.; CALVELO PEREIRA, R.; REES, F.; ROMBOLA, A. G.; LA ROSA, M. de; SAKRABANI, R.; SOHI, S.; SOJA, G.; VALAGUSSA, M.; VERHEIJEN, F.; ZEHETNER, F. Toward the standardization of biochar analysis: the COST action TD1107 interlaboratory comparison. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, p. 9, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05055>.
- BARROS, D. L.; REZENDE, F. A.; CAMPOS, A. T.; MAIA, C. M. B. F. Biochar of sawdust origin in passion fruit seedling production. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, p. 200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v9n5p200>.
- BARROS, D. L.; REZENDE, F. A.; MAIA, C. M. B. F. Uso de biochar ativado na composição de substratos para mudas de eucalipto. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATOS PARA PLANTAS, 10., 2016, Campinas. **Novos materiais, novas culturas**: caderno de resumos. Campinas: IAC, 2016.
- BELDA, R. M.; LIDÓN, A.; FORNES, F. Biochars and hydrochars as substrate constituents for soilless growth of myrtle and mastic. **Industrial Crops and Products**, v. 94, p. 132-142, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.024>.
- BUTNAN, S.; DEENIK, J. L.; TOOMSAN, B.; ANTAL, M. J.; VITYAKON, P. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. **Geoderma**, v. 237-238, p. 105-116, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2014.08.010>.
- CARVALHO, M. T. de M.; MAIA, A. de H. N.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; OORT, P. A. J. van; HEINEMANN, A. B.; SILVA, M. A. S.; PETTER, F. A.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MEINKE, H. Biochar increases plant available water in a sandy soil under an aerobic rice cropping system. **Solid Earth Journal**, v. 5, p. 939-952, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/sed-6-887-2014>.
- CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. E.; BASTIAANS, L.; OORT, P. A. J. A. J. VAN; LEAL, W. G. O. G. O.; HEINEMANN, A. B. B.; SILVA, M. A. S. A. S. da; MAIA, A. H. N. H. N.; PARSONS, D.; MEINKE, H. Properties of a clay soil from 1.5 to 3.5 years after biochar application and the impact on rice yield. **Geoderma**, v. 276, p. 7-18, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.013>.
- CHANG, Z.; TIAN, L.; LI, F.; ZHOU, Y.; WU, M.; STEINBERG, C. E. W.; DONG, X.; PAN, B.; XING, B. Benzene polycarboxylic acid: a useful marker for condensed organic matter, but not for only pyrogenic black carbon. **Science of The Total Environment**, v. 626, p. 660-667, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.145>.

CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MADARI, B. E.; REZENDE, M. O. D. O.; CANELAS, L. P.; BENITES, V. M. Spectroscopy characterization of humic acids isolated from Amazonian Dark Earth Soils (Terra Preta De Índio). In: WOODS, W. I. (ed.). **Amazonian dark earths: wim sombroek's vision**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 363-372.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 20, p. 105-111, 2002.

DOUMER, M. E.; ARÍZAGA, G. G. C.; SILVA, D. A. da; YAMAMOTO, C. I.; NOVOTNY, E. H.; SANTOS, J. M.; SANTOS, L. O. dos; WISNIEWSKI, A.; ANDRADE, J. B. de; MANGRICH, A. S. Slow pyrolysis of different Brazilian waste biomasses as sources of soil conditioners and energy, and for environmental protection. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 113, p. 434-443, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.03.006>.

DRAKE, J. A.; CARRUCAN, A.; JACKSON, W. R.; CAVAGNARO, T. R.; PATTI, A. F. Biochar application during reforestation alters species present and soil chemistry. **Science of The Total Environment**, v. 514, p. 359-365, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.012>.

DUMROESE, R. K.; HEISKANEN, J.; ENGLUND, K.; TERVAHAUTA, A. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 2018-2027, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.053>.

EUROPEAN BIOCHAR FOUNDATION. **European biochar certificate**: guidelines for a sustainable production of biochar. Disponível em: <[www.european-biochar.org/en/download](http://www.european-biochar.org/en/download)>. Holland, [2013]. Acesso em: 2 abr. 2015.

FARIAS, J. de; MARIMON, B. S.; SILVA, L. C. R.; PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MORANDI, P. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H. Survival and growth of native *Tachigali vulgaris* and exotic *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* trees in degraded soils with biochar amendment in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 368, p. 173-182, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.022>.

FERNÁNDEZ-UGALDE, O.; GARTZIA-BENGOETXEA, N.; AROSTEGI, J.; MORAGUES, L.; ARIAS-GONZÁLEZ, A. Storage and stability of biochar-derived carbon and total organic carbon in relation to minerals in an acid forest soil of the Spanish Atlantic area. **Science of The Total Environment**, v. 587-588, p. 204-213, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.02.121>.

FOGAÇA, A. M.; BARBOSA, E. A. A.; GIAROLA, N. F. B.; PEIXOTO, R. T. G.; MAIA, C. M. B. F. Influência do biochar na disponibilidade de água de um latossolo. In: REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2019, Ponta Grossa. **Trabalhos [...]**. Ponta Grossa: UEPG; [Curitiba]: SBCS, Núcleo Estadual Paraná, 2019. 4 p.

FUSS, S.; LAMB, W. F.; CALLAGHAN, M. W.; HILAIRE, J.; CREUTZIG, F.; AMANN, T.; BERINGER, T.; GARCIA, W. O.; HARTMANN, J.; KHANNA, T.; LUDERER, G.; NEMET, G. F.; ROGELJ, J.; SMITH, P.; VICENTE, J. L. V.; WILCOX, J.; DOMINGUEZ, M. del M. Z.; MINX, J. C. Negative emissions: Part 2 : costs , potentials and side effects. **Environmental Research Letters**, v. 13, p. 1-48, 2018.

GANI, A.; NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. **Renewable Energy**, v. 32, p. 649-661, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.017>.

- GAO, S.; DELUCA, T. H. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 126, p. 144-150, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.002>.
- GAO, X.; DRIVER, L. E.; KASIN, I.; MASIELLO, C. A.; PYLE, L. A.; DUGAN, B.; OHLSON, M. Effect of environmental exposure on charcoal density and porosity in a boreal forest. **Science of The Total Environment**, v. 592, p. 316-325, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.073>.
- GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers. **Organic Geochemistry**, v. 29, p. 811-819, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(98\)00194-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(98)00194-6).
- GÓMEZ-LUNA, B. E.; RIVERA-MOSQUEDA, M. C.; DENDOOVEN, L.; VÁZQUEZ-MARRUFO, G.; OLALDE-PORTUGAL, V. Charcoal production at kiln sites affects C and N dynamics and associated soil microorganisms in *Quercus* spp. temperate forests of central Mexico. **Applied Soil Ecology**, v. 41, p. 50-58, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APSSOIL.2008.08.007>.
- GÓMEZ-LUNA, B. E.; RUIZ-AGUILAR, G. M. de la L.; VÁZQUEZ-MARRUFO, G.; DENDOOVEN, L.; OLALDE-PORTUGAL, V. Enzyme activities and metabolic profiles of soil microorganisms at KILN sites in *Quercus* spp. temperate forests of central Mexico. **Applied Soil Ecology**, v. 52, p. 48-55, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APSSOIL.2011.10.010>.
- GRIMA-OLMEDO, C.; RAMÍREZ-GÓMEZ, Á.; GÓMEZ-LIMÓN, D.; CLEMENTE-JUL, C. Activated carbon from flash pyrolysis of eucalyptus residue. **Heliyon**, v. 2, p. e00155, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00155>.
- IBI. International Biochar Initiative. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soilinternational biochar initiative**. [S.l.], 2015. 23 p.
- KIM, K. H.; KIM, T.-S.; LEE, S.-M.; CHOI, D.; YEO, H.; CHOI, I.-G.; CHOI, J. W. Comparison of physicochemical features of biooils and biochars produced from various woody biomasses by fast pyrolysis. **Renewable Energy**, v. 50, p. 188-195, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.030>.
- KRAPFL, K. J.; HATTEN, J. A.; ROBERTS, S. D.; BALDWIN, B. S.; ROUSSEAU, R. J.; SHANKLE, M. W. Capacity of biochar application and nitrogen fertilization to mitigate grass competition upon tree seedlings during stand regeneration. **Forest Ecology and Management**, v. 376, p. 298-309, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.030>.
- LAIRD, D. A.; ROGOVSKA, N. P.; GARCIA-PEREZ, M.; COLLINS, H. P.; STREUBEL, J. D.; SMITH, M. Pyrolysis and biochar-opportunities for distributed production and soil quality enhancement. In: SUSTAINABLE alternative fuel feedstock opportunities, challenges and roadmaps for six U.S. regions. [s.l.: s.n.], 2010. p. 257-281.
- LEAL, O. dos A.; DICK, D. P.; LOMBARDI, K. C.; MACIEL, V. G.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A.; KNICKER, H. Soil chemical properties and organic matter composition of a subtropical Cambisol after charcoal fine residues incorporation. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, p. 805-815, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-014-1040-z>.
- LEE, Y.; EUM, P. R. B.; RYU, C.; PARK, Y. K.; JUNG, J. H.; HYUN, S. Characteristics of biochar produced from slow pyrolysis of *Geodae-Uksae* 1. **Bioresource Technology**, v. 130, p. 345-350, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.012>.

LEHMANN, J. Terra preta de índio. **Encyclopedia of Soil Science**, v. 1, p. 1-4, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1081/E-ESS-120045010>.

LI, Y.; ZHANG, F.; YANG, M.; ZHANG, J.; XIE, Y. Impacts of biochar application rates and particle sizes on runoff and soil loss in small cultivated loess plots under simulated rainfall. **Science of the Total Environment**, v. 649, p. 1403-1413, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.415>.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZA, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZÃO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1719-1730, 2006. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>.

LIN, Z.; LIU, Q.; LIU, G.; COWIE, A. L.; BEI, Q.; LIU, B.; WANG, X.; MA, J.; ZHU, J.; XIE, Z. Effects of different biochars on *Pinus elliottii* growth, N use efficiency, soil N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions and C storage in a subtropical area of China. **Pedosphere**, v. 27, p. 248-261, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60314-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60314-X).

LIU, X.; ZHANG, A.; JI, C.; JOSEPH, S.; BIAN, R.; LI, L.; PAN, G.; PAZ-FERREIRO, J. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. **Plant and Soil**, v. 373, p. 583-594, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1806-x>.

LIU, Y.; LONAPPAN, L.; BRAR, S. K.; YANG, S. Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption, desorption, and degradation of pesticides: a review. **Science of the Total Environment**, v. 645, p. 60-70, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.099>.

LIU, Z.; HE, T.; CAO, T.; YANG, T.; MENG, J.; CHEN, W. Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in two distinct soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-95162017005000037>.

LONARDO, S. DI; BARONTI, S.; VACCARI, F. P.; ALBANESE, L.; BATTISTA, P.; MIGLIETTA, F.; BACCI, L. Biochar-based nursery substrates: the effect of peat substitution on reduced salinity. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 23, p. 27-34, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2017.02.007>.

MANGRICH, A. S.; MAIA, C. M. B. F.; NOVOTNY, E. H. Biocarvão: as terras pretas de índios e o sequestro de carbono. **Ciência Hoje**, v. 47, p. 48-52, 2011.

MASEK, O.; BROWNSORT, P. **Research on production of bespoke biochar**. Rothamsted, 2010. Disponível em: <<http://www.biochar.ac.uk/abstract.php?id=32>>. Acesso em: 12 ago. 2103.

MEYER, S.; GENESIO, L.; VOGEL, I.; SCHMIDT, H.-P.; SOJA, G.; SOMEUS, E.; SHACKLEY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; GLASER, B. Biochar standardization and legislation harmonization. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 25, p. 175-191, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1254640>.

MINX, J. C.; LAMB, W. F.; CALLAGHAN, M. W.; FUSS, S.; HILAIRE, J.; CREUTZIG, F.; AMANN, T.; BERINGER, T.; OLIVEIRA GARCIA, W. de; HARTMANN, J.; KHANNA, T.; LENZI, D.; LUDERER, G.; NEMET, G. F.; ROGELJ, J.; SMITH, P.; VICENTE, J. L.; WILCOX, J.; ZAMORA DOMINGUEZ, M. del. Negative emissions - Part 1: research landscape and synthesis. **Environmental Research Letters**, v. 13, p. 063001, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>.

NEMET, G. F.; CALLAGHAN, M. W.; CREUTZIG, F.; FUSS, S.; HARTMANN, J.; HILAIRE, J.; LAMB, W. F.; MINX, J. C.; ROGERS, S.; SMITH, P. Negative emissions-Part 3: innovation and upscaling. **Environmental Research Letters**, v. 13, p. 63001, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabff4>.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A.; TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 37, p. 611–630, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.01.001>.

NICOLA, V. B.; COSTA, K. N.; SILVA, K. A.; GUIMARÃES, A. T. B.; MAIA, C. M. B. F.; OLIVEIRA, C. M. R. Biochar de eucalipto em solo natural: estudo ecotoxicológico em *Eisenia andrei*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOTOXICOLÓGICO, 15., 2018, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: [s.n.], 2018.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use: a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 321-344, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140818>.

PEIXOTO, R. T. G.; VARGAS, L. M. P.; SILVA, K. da; BOGNOLA, I. A.; SANTOS, L. M. dos; MAIA, C. M. B. D. F. Aspectos dendrométricos de plantio de eucaliptos em solos com biochar. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 4., 2018, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa; Colombo: Embrapa Florestas, 2018. p. 397-400.

PEREIRA, F. B.; SANTOS, R. C.; LOMBARDI, K. C.; DIAS, A. N.; MAIA, C. M. B. F. Soil oxidizable organic carbon fractions under organic management with industrial residue of roasted mate tea. In: FUNCTIONS of natural organic matter in changing environment. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p. 295–299. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5634-2\\_54](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5634-2_54).

PEREIRA, J. C. D.; MATTOS, P. P. de; SCHAITZA, E. G. **Características da madeira de seis espécies de eucalipto plantadas em Colombo-PR**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 17 p. (Embrapa Florestas. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 15). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/281005>>.

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; SHIMIZU, J. **Características físicas, químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 4 p. (Embrapa Florestas. Circular técnica, 50). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/313601>.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 14 p. (Embrapa Florestas. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 15). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/281005>.

RABOIN, L.-M.; RAZAFIMAHAFALY, A. H. D.; RABENJARISOA, M. B.; RABARY, B.; DUSSERRE, J.; BECQUER, T. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar. **Field Crops Research**, v. 199, p. 99-108, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2016.09.005>.

RAMLOW, M.; RHOADES, C. C.; COTRUFO, M. F. Promoting revegetation and soil carbon sequestration on decommissioned forest roads in Colorado, USA: a comparative assessment of organic soil amendments. **Forest Ecology and Management**, v. 427, p. 230-241, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.059>.

- REZENDE, F. A.; ALEXANDRE, V.; FERREIRA, H.; SANTOS, V. A. H. F. dos; MAIA, C. M. B. de F.; MORALES, M. M. Biochar in substrate composition for production of teak seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1449-1456, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900043>.
- SASS, A. L.; SANTOS, D. E. C. dos; MAEDA, S.; MAIA, C. M. B. de F. Efeito de carvão vegetal em substratos para a produção de mudas de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 4., 2018, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa; Colombo: Embrapa Florestas, 2018. p. 55-59.
- SILVA, K.; BOGNOLA, I. A.; PEIXOTO, R. T. G.; SANTOS, L. M.; VARGAS, L. M. P.; MAIA, C. M. B. F. Atividade da urease em plantio de eucalipto com aplicação de biochar. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 4., 2018, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa; Colombo: Embrapa Florestas, 2018. p.
- SILVA, M. A. S. da; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. de M.; BERNARDES, T. G.; SOUZA, R. de O.; OLIVEIRA, F. B. de. Efeito da aplicação de biochar sobre propriedades químicas do solo e produtividade de feijoeiro comum irrigado. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 10., 2011, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2011.
- SINGH, B.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LEHMANN, J. **Biochar: a guide to analytical methods**. Boca Raton: CRC Press, 2017. 310 p.
- SOARES, T. F. S. N.; LIMA, I. da S.; ALMEIDA, A. Q. de; GONZAGA, M. I. da S.; FIALHO, C. A.; GOMES, I. L. R.; MASSARANDUBA, W. de M. Substrates formulated with biochar for seedling production of *Moringa oleifera* Lam. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 515-524, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n4p515>.
- SOUCHIE, F. F.; MADARI, B. E.; MARIMON JUNIOR, B. H.; PETTER, F. A.; MARIMON, B. S.; LENZA, E.; SILVA, T. L. G.; LIMA, H. C. Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 811-821, 2011.
- SOUZA, L. C. de; LIMA, H. V. de; RODRIGUES, S.; KERN, D. C.; SILVA, Á. P. da; PICCININ, J. L.; SOUZA, L. C. de; LIMA, H. V. de; RODRIGUES, S.; KERN, D. C.; SILVA, Á. P. da; PICCININ, J. L. Chemical and physical properties of an anthropogenic dark earth soil from Bragança, Para, Eastern Amazon. **Acta Amazonica**, v. 46, p. 337-344, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201505663>.
- TEIXEIRA, W. W. G.; KERN, D. C. D.; MADARI, B. E. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. W. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. 420 p.
- TULLUS, A.; MANDRE, M.; SOO, T.; TULLUS, H. Relationships between cellulose, lignin and nutrients in the stemwood of hybrid aspen in estonian plantations. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 44, p. 101-109, 2010.
- VERHEIJEN, F. G. A.; GRABER, E. R.; AMELOOT, N.; BASTOS, A. C.; SOHI, S.; KNICKER, H. Biochars in soils: new insights and emerging research needs. **European Journal of Soil Science**, v. 65, p. 22-27, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12127>.
- WOICIECHOWSKI, T.; LOMBARDI, K. C.; GARCIA, F. A. O.; GOMES, G. S. Nutrientes e umidade do solo após a incorporação de biocarvão em um plantio de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 1455-1464, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509835053>.

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, p. 56, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>.

WROBEL-TOBISZEWSKA, A.; BOERSMA, M.; SARGISON, J.; ADAMS, P.; JARICK, S. An economic analysis of biochar production using residues from Eucalypt plantations. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 177-182, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.06.015>.

ZHANG, H.; CHEN, C.; GRAY, E. M.; BOYD, S. E.; YANG, H.; ZHANG, D. Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: a phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. **Geoderma**, v. 276, p. 1-6, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.020>.

ZHANG, R.; ZHAO, Y.; LIN, J.; HU, Y.; HÄNNINEN, H.; WU, J. Biochar application alleviates unbalanced nutrient uptake caused by N deposition in *Torreya grandis* trees and seedlings. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 319–326, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.040>.

ZHANG, R.; ZHANG, Y.; SONG, L.; SONG, X.; HÄNNINEN, H.; WU, J. Biochar enhances nutrient quality of *Torreya grandis* and soil fertility under simulated nitrogen deposition. **Forest Ecology and Management**, v. 391, p. 321-329, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.036>.

ZHOU, G.; ZHOU, X.; ZHANG, T.; DU, Z.; HE, Y.; WANG, X.; SHAO, J.; CAO, Y.; XUE, S.; WANG, H.; XU, C. Biochar increased soil respiration in temperate forests but had no effects in subtropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 339-349, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.09.038>.

