

ISLEY CRISTIELLEM BICALHO DA SILVA

**ATRIBUTOS DO SOLO E CARACTERÍSTICAS
AGRONÔMICAS DO FEIJOEIRO ADUBADO COM BIOCHAR**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Produção Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Produção Vegetal.

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Colen

Montes Claros-MG
2016

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos ensinamentos, presença e amor.

Aos meus pais, Jerônimo e Dalva, pelo exemplo de humildade, pelo amor, dedicação e por sempre tentarem compreender o verdadeiro sentido da minha caminhada.

Aos meus orientadores, Prof. Luiz Arnaldo Fernandes e Prof. Fernando Colen, que me acompanham desde a graduação. Que mesmo sem a intenção, foram e são os meus exemplos e as minhas inspirações da vida acadêmica e profissional. Deixo aqui meus sinceros agradecimentos e a minha profunda admiração e gratidão.

À minha querida amiga Josy, pela dedicação e empenho sem tamanho na condução do experimento, por compartilhar momentos importantes em minha vida e me ajudar em todas as etapas desta pesquisa.

Aos funcionários do Viveiro e dos setores de obras e de transportes pelo auxílio, atenção e boa vontade para a realização dos trabalhos.

Aos meus colegas e amigos do laboratório de Solos do Instituto de Ciências Agrárias: Manoel, Luís Henrique, Ismael, Kelson, Rodrigo e Laura, pela amizade, pelos momentos de descontração e de risadas e principalmente pelo auxílio nas análises e coletas de dados.

Aos professores do Instituto de Ciências Agrárias, por serem exemplos de profissionais, por todos os conhecimentos transmitidos, amizade e atenção.

A Priscila, secretária da Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela disponibilidade, atenção e auxílios.

Aos amigos da pós-graduação, Shirley, Letícia, Luíz Henrique, Rubens e Gracielle, com os quais compartilhei ótimos momentos, e que fizeram com que os dois anos de mestrado tivessem um gostinho mais doce.

Aos membros da banca examinadora, que gentilmente colaboraram e contribuíram para uma melhor elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ao Instituto de Ciências Agrárias e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade de cursar o mestrado e realizar este estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Enfim, a todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a conclusão desta importante etapa na minha vida e que, embora não citados aqui, não deixam de merecer o meu agradecimento mais sincero.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Com o objetivo de avaliar como as doses crescentes de biocarvões produzidos com materiais filtrantes descartados afetam a fertilidade do solo, as características agronômicas e a nutrição do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), conduziram-se três experimentos em casa de vegetação. Os biocarvões utilizados foram produzidos a partir de resíduos orgânicos (casca de arroz, serragem e restos de silagem de sorgo), utilizados como material filtrante para o biofertilizante suíno. Cada um dos experimentos foi representado pela aplicação de um biochar, e os tratamentos avaliados consistiram na adição de cinco níveis de biocarvão (0, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% v/v). Os tratamentos de cada experimento foram dispostos no delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Foram avaliadas as propriedades químicas do solo, antes e após o cultivo do feijoeiro. O desenvolvimento agronômico da cultura foi avaliado por meio das variáveis: massa seca da parte aérea, massa seca da raiz, massa seca de grãos, número de vagens e número de grãos. Avaliaram-se, ainda, o teor e o acúmulo de nutrientes nos grãos e na massa seca da parte aérea da planta. A aplicação dos três biochars ao solo, refletiu na melhoria da sua qualidade, aumentando o pH, reduzindo a acidez trocável e elevando as concentrações de C orgânico, P disponível, bases trocáveis e dos micronutrientes Mn, Zn e Cu. As doses dos biocarvões aumentaram a produção de grãos, massa seca da parte aérea e massa seca radicular. De modo geral, a adição dos biocarvões elevou os teores e as quantidades acumuladas de nutrientes pelo feijoeiro. Portanto, os biocarvões produzidos com materiais filtrantes orgânicos descartados têm potencial para melhorar as propriedades do solo e aumentar a produção agrícola, com o conseqüente benefício para a agricultura.

Palavras-chave: Resíduos agrícolas. Filtros orgânicos. Biocarvão. Fertilidade do solo. *Phaseolus vulgaris* L.

ABSTRACT

In order to assess how increasing doses of biochar produced with discarded filtering materials affect soil fertility, agronomic characteristics and nutrition of bean (*Phaseolus vulgaris* L.), we conducted three experiments in greenhouse. The used biochar was produced from organic residues (rice husk, sawdust and sorghum silage remains) used as filtering material for swine biofertilizer. Every experiment was represented by the application of biochar, and treatments consisted of the addition of five levels of biochar (0, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% v / v). The treatments of each experiment were arranged in a completely randomized design with four replications. Chemical properties of the soil were evaluated before and after the cultivation of beans. The agronomic crop development was evaluated by means of the variables: dry weight of shoot, root dry mass, grain dry mass, number of pods and number of grains. We also evaluated the content and the accumulation of nutrients in the grain and dry matter of the shoot. The application of the three biochars on the soil improved its quality, increasing the pH, reducing the exchangeable acidity and raising organic carbon concentrations, available P, exchangeable bases and of Mn, Zn and Cu micronutrients. Doses of biochar increased grain production, dry weight of shoot and root dry weight. In general, the addition of biochar increased the concentration and the accumulated amounts of nutrients by the bean. Therefore, biochars produced with discarded organic filter materials have potential to improve soil properties and increase agricultural production, with the consequent benefit to agriculture.

Keywords: agricultural residues. Organic filters. Biochar. Soil fertility. *Phaseolus vulgaris* L.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BFCA–	Biochar de filtro de casca de arroz
BFS–	Biochar de filtro de serragem
BFSS–	Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo
COS–	Carbono orgânico do solo
EMBRAPA–	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
MAPA–	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1–Carbonização da serragem.....	20
FIGURA 2– a) Processo de mistura dos biocarvões com o solo; b) vasos com os tratamentos aplicados e plantio realizado; c) controle de pragas; d) vista geral do experimento com as plantas antes do corte.....	27

LISTA DE TABELAS

1–Rendimentos dos produtos obtidos por diferentes métodos de pirólise de madeira (base seca)	17
2–Principais características dos biochars utilizados no experimento.....	23
3–Quantidades de macronutrientes adicionados ao solo, em decorrência da aplicação de 2,5, 5,0, 7,5 e 10% de BFCA, BFS e BFSS.....	24
4–Quantidades de micronutrientes adicionados ao solo, em decorrência da aplicação de 2,5, 5,0, 7,5 e 10% de BFCA, BFS e BFSS.....	24
5–Análise química de fertilidade do solo utilizado no experimento.....	25
6–Equações de regressão ajustadas entre os componentes da acidez do solo em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões.....	31
7–Equações de regressão ajustadas entre fósforo disponível, cátions trocáveis do solo em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões.....	34
8–Equações de regressão ajustadas entre as concentrações de micronutrientes do solo (Mn, Fe, Cu e Zn) em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões.....	36
9–Equações de regressão ajustadas entre os indicadores de fertilidade do solo (t, T, m, V, COS) em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões.....	39
10–Equações de regressão ajustadas entre as características agronômicas (MSR, MSPA, MSG, NV e NG) em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões.....	43
11–Equações de regressão ajustadas entre os teores e acúmulo de macronutrientes no feijão carioca (N, P, K, Ca, Mg e S) em resposta à adição de doses crescentes do BFCA.....	46
12–Equações de regressão ajustadas entre os teores e acúmulo de macronutrientes no feijão carioca (N, P, K, Ca, Mg e S) em resposta à adição de doses crescentes do BFS.....	47
13–Equações de regressão ajustadas entre os teores e acúmulo de macronutrientes no feijão carioca (N, P, K, Ca, Mg e S) em resposta à adição de doses crescentes do BFSS.....	48

14 –Equações de regressão ajustadas entre os teores de micronutrientes no feijão carioca (Zn, Cu, B, Fe e Mn) em resposta à adição de doses crescentes de BFCA.....	50
15 –Equações de regressão ajustadas entre os teores de micronutrientes no feijão carioca (Zn, Cu, B, Fe e Mn) em resposta à adição de doses crescentes de BFS.....	51
16 –Equações de regressão ajustadas entre os teores de micronutrientes no feijão carioca (Zn, Cu, B, Fe e Mn) em resposta à adição de doses crescentes de BFSS.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 BIOFERTILIZANTE	12
2.2 FILTROS ORGÂNICOS.....	13
2.3 BIOCHAR	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR.....	20
3.2 SOLO	25
3.3 EXPERIMENTOS EM VASOS	25
3.4 ANÁLISES DA PLANTA E DO SOLO.....	27
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO	29
4.1.1 Componentes da acidez do solo	29
4.1.2 Teores de fósforo disponível e cátions trocáveis	32
4.1.3 Teores de manganês, ferro, cobre e zinco	35
4.1.4 CTC efetiva, CTC potencial, Saturação por Al, Saturação por bases e Carbono orgânico do solo (t, T, m, V e COS)	37
4.2 AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO FEIJOEIRO.....	40
4.2.1 Características Agronômicas	40
4.2.2 Teor e acúmulo de nutrientes no feijoeiro.....	44
5 CONCLUSÃO.	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A utilização de filtros orgânicos é uma opção interessante para se tratar e/ou melhor aproveitar efluentes ricos em sólidos, tal como o biofertilizante. Nesses filtros, os materiais filtrantes utilizados são resíduos orgânicos comumente encontrados nos setores agroindustriais, como casca de arroz, serragem e bagaço de cana. Assim, além de melhorar a qualidade física e química dos efluentes a serem tratados, como comprovado nos estudos de Silva (2013), Lo Monaco *et al.* (2011) e Magalhães *et al.* (2006a), a utilização dos filtros orgânicos constitui uma alternativa para a destinação desses resíduos.

Porém, assim como ocorre com os filtros tradicionais de areia, a eficiência do tratamento diminui à medida que ocorre a colmatação do meio filtrante, tornando-se necessário substituí-lo, total ou parcialmente, em intervalos definidos de tempo. A necessidade de substituição do material orgânico dos filtros leva à formação de grandes leiras, que atualmente são usadas diretamente como adubação orgânica superficial ou submetidas ao processo de compostagem. Até o momento, nada se sabe sobre a qualidade e o valor agrônômico do biochar produzido a partir dos materiais filtrantes descartados.

A produção de biochar como uma forma de gestão desses resíduos é interessante por vários aspectos. Primeiramente, a produção do biocarvão é realizada em pouco tempo, cerca de algumas horas, enquanto em técnicas como a compostagem são necessários meses até a obtenção do composto. Em segundo lugar, por ser produzido a partir do processo de pirólise, o carbono do biochar é mais resistente à decomposição química e biológica. Ou seja, em decorrência da sua baixa taxa de decomposição, comparado com o material *in natura*, o biochar auxilia na mitigação da emissão de CO₂ para atmosfera e conseqüentemente aumenta o estoque de C no solo.

E finalmente, o biochar pode potencialmente ser usado como insumo para melhorar a qualidade do solo e a produtividade das culturas. O biochar aumenta o fornecimento de nutrientes ao sistema (ALBUQUERQUE *et al.*, 2014) e, devido ao seu alto teor de matéria orgânica, melhora diversos

atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Desse modo, o biochar produzido a partir dos materiais filtrantes descartados tem potencial para agregar ainda mais valor aos resíduos agrícolas, gerando grandes benefícios econômicos e ambientais.

O presente trabalho teve como objetivos avaliar como as doses crescentes de biocarvões produzidos com materiais filtrantes descartados afetam a fertilidade do solo, as características agronômicas e a nutrição do feijoeiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Biofertilizante

No meio agrônômico o termo 'biofertilizante', frequentemente, se refere ao efluente resultante da fermentação aeróbia ou anaeróbia de produtos orgânicos puros ou complementados com minerais, podendo ser usado na agricultura para vários fins (BENÍCIO *et al.*, 2012). Em seu conteúdo são encontradas células vivas ou latentes de micro-organismos de metabolismo aeróbio, anaeróbio e facultativo; e também metabólitos e quelatos organominerais (COSTA, 2012). De acordo com Medeiros *et al.* (2013), o biofertilizante é um composto potencialmente regulador das propriedades físicas e químicas do solo; é capaz de promover a melhoria física em termos de aeração, infiltração de água e condutividade hidráulica do perfil do solo (RODOLFO JUNIOR; CAVALCANTE; BURITI, 2008). Apresenta substâncias hormonais que estimulam o crescimento do sistema radicular e liberam substâncias húmicas que facilitam a absorção de nutrientes pelas plantas; além disso, estimula a proliferação de micro-organismos benéficos no solo (MEDEIROS; LOPES, 2006).

Wang *et al.* (2014) ressaltam que a formulação física e química do biofertilizante obtido no processo de fermentação dependerá do método de preparo, do tempo de decomposição, da população microbológica, da temperatura e do pH do composto, bem como do material que o origina. Sendo assim, nem sempre se tem o biofertilizante com a mesma composição.

A principal forma de aplicação do biofertilizante é via solo, como forma de fertilizante agrícola. O seu uso ganhou destaque na agricultura irrigada, pois se trata de uma medida estratégica do ponto de vista ambiental e econômico, pelo reaproveitamento de resíduos orgânicos disponíveis em grande parte das propriedades rurais e de baixo custo (FERNANDES; TESTEZLAF, 2002).

O uso de biofertilizantes na fertirrigação requer um criterioso cuidado com a filtragem da solução, pois a alta concentração de sólidos suspensos e

a formação de biofilme podem provocar entupimentos no sistema de irrigação (GROSS *et al.*, 2008). Para reduzir os problemas de entupimentos, deve-se deixar a calda do biofertilizante coada por um período anterior à aplicação que seja suficiente para decantar parte das partículas que persistem após a filtragem; fazer uso de válvulas de final de linha nos dutos laterais e continuar a irrigação após a injeção do biofertilizante por um determinado tempo que seja suficiente para remover o excesso de partículas acumuladas no sistema (MARROCOS, 2011).

2.2 Filtros orgânicos

Os filtros orgânicos são unidades de tratamento de efluente que utilizam subprodutos de atividades agropecuárias e industriais como elemento filtrante. Resíduos como bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira, sabugo de milho, restos de silagem, casca de arroz são exemplos de materiais que podem ser empregados nesse tipo de filtro (BRANDÃO *et al.*, 2003).

O seu princípio de funcionamento é similar ao dos filtros convencionais de areia, ou seja, um meio poroso retém as impurezas de dimensões menores que os poros do meio filtrante. Assim, ao entrar em operação, as partículas vão sendo retidas nos poros do meio filtrante, proporcionando seu acúmulo e, com isso, aumentando a perda de carga na coluna filtrante. À proporção que se desenvolve a filtração, os vazios vão sendo obstruídos pelas partículas, reduzindo o diâmetro dos poros e passando, por conseguinte, a eliminar partículas de diâmetros cada vez menores (POVINELLI; MARTINS, 1973).

Recomenda-se o uso dos filtros orgânicos quando se deseja tratar efluentes ricos em sólidos, pois nesse tipo de situação os filtros de areia apresentam rápida colmatação superficial, o que impede o fluxo normal da água residuária (Lo MONACO *et al.*, 2011). As águas residuárias da suinocultura, da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro ou mesmo o biofertilizante proveniente de biodigestores são bons exemplos de afluentes dos filtros. O uso desses filtros também é interessante quando se objetiva

aproveitar o filtrado na fertirrigação, ou tratá-lo utilizando o sistema solo planta. Nesses casos, o filtro reduz consideravelmente o teor de sólidos, evitando possíveis problemas de entupimento de bombas, tubulações e, sobretudo, dos emissores do sistema de irrigação (MAGALHÃES *et al.*, 2006a).

A eficiência de tratamento dos filtros foi demonstrada em diversos estudos. Silva (2013) mostrou que, usando filtro de bagaço-de-cana, é possível remover 67% dos sólidos totais de esgoto. Na pesquisa de Lo Mônaco (2001), utilizou-se filtro orgânico de serragem de madeira no tratamento da água residuária da lavagem e despolpa de frutos do cafeeiro, e foram alcançadas remoções de sólidos totais da ordem de 60 a 70% e de 100% dos sólidos sedimentáveis. Magalhães (2002) obteve remoções de sólidos suspensos em águas residuárias da suinocultura da ordem de 90 a 99%, empregando filtros de serragem de madeira, e de 81 a 96%, quando utilizou filtros de bagaço de cana-de-açúcar.

Quanto ao funcionamento desses filtros, de tempos em tempos, deve-se remover o material filtrante, pois com a operação do sistema, os poros das camadas superiores do filtro vão sendo obstruídas gradativamente. Essa obstrução leva à diminuição da velocidade de filtração do líquido, o que torna necessária a substituição, total ou parcial, do material filtrante em intervalos definidos de tempo. A frequência das trocas dependerá da taxa de aplicação e da concentração de sólidos presentes na água residuária (MAGALHÃES *et al.*, 2006a).

Além da comprovada eficiência de tratamento, a possibilidade de se empregarem resíduos de agroindústrias como filtro orgânico torna-se muito interessante para o pequeno produtor, uma vez que a obtenção de restos culturais é prática frequente e de baixo custo (BRANDÃO *et al.*, 2003). Contudo, é importante ressaltar que, quando o material filtrante é retirado do filtro, ele pode passar a ser fonte de poluição ambiental, uma vez que não constitui material orgânico estabilizado, podendo tornar-se uma significativa fonte de contaminação química e biológica para o ambiente ou hábitat, contribuindo para a proliferação de pragas e veiculação de doenças (MAGALHÃES, 2002).

Atualmente, a principal destinação dos materiais filtrantes descartados tem sido a produção de adubos orgânicos (FEBRER, 2000). Segundo Magalhães *et al.* (2006b), os materiais filtrantes descartados são compostados, processo que dura aproximadamente três meses. Esse período compreende duas fases: nos dois primeiros meses, ocorre a degradação ativa do material orgânico, e o terceiro mês é destinado para a etapa de maturação. Ao final desse processo, é produzido um adubo orgânico de considerável valor fertilizante.

2.3 Biochar

O termo biochar, ou biocarvão, refere-se a um material sólido, rico em carbono, obtido da transformação termoquímica da biomassa sob baixa atmosfera de oxigênio. Difere do carvão vegetal devido ao uso, uma vez que o biochar não é utilizado como combustível. Este produto normalmente é adicionado ao solo com o intuito de melhorar suas características químicas, físicas e biológicas (KOOKANA *et al.*, 2011). De acordo com Sohi *et al.* (2010), o biocarvão apenas deve ser utilizado quando existir potencial para: melhorar a qualidade do solo, a produtividade agrícola e contribuir para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa a longo prazo.

Ao contrário da matéria orgânica *in natura*, que tende a se decompor rapidamente, o biocarvão é considerado um estoque de carbono estável e de degradação lenta, devido ao elevado grau de aromaticidade. Essas características o tornam uma alternativa eficiente para aumentar o armazenamento de carbono no solo (NOVOTNY, 2012). Por promover a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (BRASIL, 2004), o biochar também atua como um condicionador. Entre outras alterações benéficas que decorrem da aplicação de biochar, Albuquerque *et al.* (2014) destacam o aumento da retenção de água, elevação do pH, da concentração de nutrientes disponíveis, da capacidade de troca catiônica e redução da densidade do solo.

Além disso, outra vantagem resultante da produção de biocarvão é a possibilidade de reciclar grandes quantidades de resíduos agrícolas

(ABDELHAFEZ; LI; ABBAS, 2014), diminuindo a contaminação associada ao descarte para o meio ambiente (AHMAD *et al.*, 2014). A conversão de biomassa de resíduos em biochar também promove a eliminação de todos os patógenos ativos (AHMAD *et al.*, 2014) de dejetos de animais e lodo de esgoto.

A produção de biochar pode ser realizada em diferentes escalas, desde fogões à lenha especialmente projetados para pequenas famílias rurais, como o *Anila Stove*, até às plantas industriais que processam milhares de toneladas de biomassa por ano (PRATT; MORAN, 2010). No interior do Brasil, o processo de pirólise é utilizado de forma rústica nos fornos que produzem carvão vegetal: após uma etapa inicial de queima na presença de ar, para secar a madeira, os fornos são lacrados para a etapa de pirólise.

Dependendo das condições de processamento, outros produtos de carbono também são obtidos, como é o caso do bioóleo e do gás, os quais podem ser usados como combustíveis (MCCARL *et al.*, 2009). A temperatura de pirólise, o tempo que o material permanece no forno e a velocidade da taxa de aquecimento governam os três principais processos de degradação térmica (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). A pirólise lenta é a conversão térmica da biomassa por aquecimento em baixas e médias temperaturas, na ausência de oxigênio. A pirólise rápida é o aquecimento muito rápido da biomassa, resultando na produção de biocarvão, gás e de bioóleo, sendo que a produção do último ocorre em maior proporção em relação aos demais produtos do processo. Já a gaseificação é a pirólise em altas temperaturas e tem o biochar como subproduto (BROWN, 2009; MCCARL *et al.*, 2009). O rendimento da produção de biocarvão e dos produtos gerados no fim do processo é altamente dependente do tipo de pirólise utilizada (TAB. 1).

TABELA 1

Rendimentos dos produtos obtidos por diferentes métodos de pirólise de madeira (base seca)

Método		Rendimentos em:		
		Líquido	Carvão	Gás
Pirólise rápida	Temperatura de processo moderada (450-550°C), curtos tempos de residência dos vapores e biomassa (< 2s) com baixa granulometria.	75%	12%	13%
Carbonização (pirólise lenta)	Baixas temperaturas (400-450°C), tempos muito longos de residência (pode ser de horas ou dias), partículas grandes.	30%	35%	35%
Gaseificação	Alta temperatura (900°C), longos tempos de residência.	5%	10%	85%

Fonte: (BRIDGWATER, 2001).

Segundo Verheijen *et al.* (2009), a exata composição química e estrutural do biocarvão é dependente da combinação da matéria-prima e das condições de pirólise. Dentre as condições de pirólise, a temperatura é o mais importante parâmetro a se considerar no processo de produção do biocarvão, sendo que o teor de C fixo do biochar está diretamente relacionado à temperatura final de pirólise. O mesmo acontece com o teor de cinzas, ou seja, para uma mesma matéria-prima, quanto maior a temperatura de pirólise maior é o teor de cinzas produzido. Já o rendimento da produção de biocarvão é inversamente proporcional à temperatura de pirólise (SOHI *et al.*, 2010).

As características químicas e físicas do biocarvão podem alterar significativamente as propriedades do solo e são, portanto, importantes para consideração antes da sua aplicação no solo. Segundo Novak *et al.* (2014), a variação das propriedades físico-químicas do biochar é dependente principalmente da composição elementar da matéria-prima, do processo de produção e do tamanho das partículas. Yuan e Xu (2012), por exemplo, demonstram as diferenças físico-químicas de biochars produzidos a 350 °C a partir de diferentes resíduos culturais. Os autores encontraram que a

capacidade de troca de cátions do biochar de palha de canola foi duas vezes superior ao do biochar produzido a partir de palha de feijão mungo. Já Cantrell *et al.* (2012), ao avaliarem as características físico-químicas de biochars produzidos a partir de diferentes resíduos de animais, observaram que, quando comparados em uma mesma faixa de temperatura, os biocarvões de esterco de bovino tinham as maiores concentrações de C e valores de pH, e os menores teores de cinzas, N e S. O biocarvão proveniente do esterco de frango foi o que apresentou o mais alto valor de condutividade elétrica. E o biocarvão produzido com esterco de suíno apresentou os teores mais elevados de P e S.

O pH também é outra importante característica dos biocarvões, que dependendo das condições de produção e da matéria-prima, pode variar de levemente ácido até alcalino, (CHAN; XU, 2009). Devido à influência do pH do solo sobre a toxidez de elementos como alumínio, Van Zwieten *et al.*, (2010) demonstraram que a aplicação de 1% de biochar oriundo de resíduos de fábrica de papel resultaram em uma redução de 2 para $<0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al trocável.

Em razão de sua elevada aromaticidade e elevada área superficial, o biocarvão é considerado como um sorvente eficaz para poluentes orgânicos e inorgânicos (TONG *et al.*, 2014), evitando, assim, a passagem desses para água subterrânea (FELLET; MARMIROLI; MARCHIOL, 2014). Spokas *et al.* (2009) notaram que a adição de biocarvão, em quantidades superiores a 60 t ha^{-1} , aumentou a adsorção de atrazina e acetochlor comparado ao solo controle, sem adição de biocarvão, resultando na diminuição da lixiviação destas substâncias dos herbicidas avaliados. Já Beesley e Marmiroli (2011), ao estudarem a retenção de Cd e Zn pelo biochar de madeira em solos contaminados, observaram que esse material foi capaz de reduzir a mobilidade desses elementos, principalmente pelo mecanismo de sorção.

Na agricultura, o uso do biocarvão tem apresentado grande variabilidade nos resultados. Em uma revisão com a utilização de aproximadamente 50 trabalhos publicados, por meio de uma análise quantitativa dos efeitos da aplicação de biochar ao solo na produtividade das culturas, Jeffery *et al.* (2011) observaram que, no geral, a utilização do

biocarvão aumentou, em média, 10% da produtividade agrícola. No entanto, a estatística revelou uma elevada abrangência, podendo variar entre -28 a 39% na produtividade média das culturas avaliadas. Uzoma *et al.* (2011) verificaram que a aplicação de 15 t ha⁻¹ de biochar produzido com esterco bovino duplicou o rendimento de grãos de milho. Van Zwieten *et al.* (2010) observaram um aumento na produtividade de cultivos de trigo, soja e rabanete de 170, 60 e 15%, respectivamente, após a aplicação de biochar, produzido a partir de resíduos da indústria de papel, comparados ao tratamento controle. Chan *et al.* (2007) relataram a importância da utilização de fertilizante nitrogenado juntamente com a aplicação do biocarvão produzido a partir de restos de plantas. Os autores notaram que na ausência de biocarvão a aplicação de 100 kg N ha⁻¹ aumentou a produtividade do rabanete em 95%. Já a aplicação dessa mesma quantidade de fertilizante nitrogenado associada a 50 t ha⁻¹ de biocarvão elevou a produtividade de massa seca em 272%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Preparação e caracterização do biochar

Os biochars utilizados no trabalho foram produzidos a partir de três materiais filtrantes descartados de filtros orgânicos, após a filtração de biofertilizante suíno oriundo de biodigestor anaeróbio modelo indiano. O biofertilizante continha aproximadamente 8% de sólidos totais.

Após a colmatação dos filtros com os sólidos do biofertilizante, os meios filtrantes de casca de arroz, serragem e restos de silagem de sorgo foram retirados e secos ao ar. Em seguida estes foram carbonizados por meio de um carbonizador tradicional simples (FIG.1), que basicamente trata-se de um tubo de aço em que sua extremidade inferior fica a aproximadamente 20 cm de altura do chão, fazendo o papel de uma chaminé. Os biochars resultantes da carbonização dos filtros de casca de arroz, serragem e restos de silagem são denominados como BFCA, BFS e BFSS, respectivamente.

FIGURA 1- Carbonização da serragem



Fonte: Da autora, 2016.

A fim de controlar as condições de carbonização, a temperatura foi medida a cada 10 minutos, utilizando-se um termômetro infravermelho com mira laser. As medições foram realizadas na parte externa inferior do carbonizador. O rendimento do biochar foi determinado empregando-se a seguinte equação (EQ. 1):

$$\text{Rendimento de biochar} = \frac{\text{massa do biochar}}{\text{massa do material filtrante}} \quad (\text{EQ.1})$$

Os biocarvões foram triturados em partículas <0,5 mm antes da aplicação no solo e da amostragem para análises de caracterização. As temperaturas máximas atingidas durante a carbonização estiveram entre 385 e 430 °C e o tempo do processo variou de 2,3 a 3,2 h, dependendo do material filtrante (TAB. 2).

Para caracterização química dos biochars (TAB. 2) foi medido o pH em água e a condutividade elétrica (razão sólido-solução 1:10) (ALBUQUERQUE *et al.*, 2014). A densidade dos biochars foi estimada por pesagem de 10 mL de amostra moída. O teor de cinzas foi determinado através do método ASTM (D-1762-84) modificado, com a medição de perda de peso após a combustão de 10 g de cada biochar num cadinho de cerâmica a 750°C durante 6h (PENG *et al.*, 2011). Os teores de C, N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Zn, Fe e Mn foram determinados conforme o método oficial do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2015) para fertilizantes orgânicos. De acordo com essa metodologia, as amostras foram homogeneizadas, pesadas e uma parte foi reservada para a determinação da umidade, a qual foi realizada em estufa a $65 \pm 5^\circ\text{C}$ de temperatura até a obtenção de massa constante.

Quanto às análises químicas dos biocarvões, o C orgânico total foi determinado por oxidação por via úmida, com dicromato de potássio em excesso e ácido sulfúrico concentrado a quente. A quantificação do C orgânico total foi por titulometria com ácido fosfórico na presença do indicador difenilaminasulfonato de bário. O N total foi determinado pela amonificação de todas as formas não amoniacais de nitrogênio, inclusive as

orgânicas, seguida da destilação alcalina da amônia, que foi recebida em uma quantidade em excesso de ácido bórico. O borato de amônio formado foi titulado com uma solução ácida padronizada. Para a digestão das amostras utilizou-se o pó catalítico de Raney e uma solução de ácido sulfúrico – sulfato de potássio em frascos Kjeldahl, que foi aquecido até a completa digestão das amostras.

Para a o boro, as amostras foram calcinadas em mufla a 500-550°C e em seguida o elemento foi extraído pelo método da azomethina-H e determinado por espectrofotometria de Uv-visível a 410 nm.

Para os demais nutrientes, utilizou-se a extração fortemente ácida de modo a promover a oxidação completa da matéria orgânica. A digestão das amostras foi com ácido nítrico e ácido perclórico (digestão nitroperclórica) a quente, até destruir a matéria orgânica e a solução clarear. A determinação do fósforo total foi pelo método espectrofotométrico do ácido molibdovanadofosfórico. O K foi determinado por fotometria de chama, e os elementos Ca, Mg Cu, Mn, Zn e Fe foram determinados por espectrometria por absorção atômica. O enxofre foi determinado por turbidimetria.

TABELA 2

Principais características dos biochars utilizados no experimento

Parâmetros	BFCA	BFS	BFSS
Rendimento (%)	33	45	38
Temperatura máxima (°C)	430	385	385
Duração da carbonização (h)	2,3	3,0	3,2
pH	6,8	7,1	7,2
Condutividade elétrica (mS cm ⁻¹)	121,8	69,8	97
Densidade	0,37	0,51	0,54
Cinzas (%)	29	15	40
CarbonoTotal (g kg ⁻¹)	314,4	430,4	332,4
Nitrogênio total (g kg ⁻¹)	16,5	12,4	22,8
Relação C/N (C Orgânico Total/ N total)	17/1	32/1	13/1
P (g kg ⁻¹)	34	16,7	29,6
K (g kg ⁻¹)	6,7	3,5	4,75
Ca (g kg ⁻¹)	27,3	17,8	24,44
Mg (g kg ⁻¹)	8	3,9	7,1
S (g kg ⁻¹)	2	1,3	1,5
Cu (mg kg ⁻¹)	230	90	170
Mn (mg kg ⁻¹)	1060	260	560
Zn (mg kg ⁻¹)	1690	660	730
Fe (mg kg ⁻¹)	5080	3270	2280
B (mg kg ⁻¹)	54	48	66

Sendo: BFCA Biocarvão do filtro de casca de arroz; BFS: Biocarvão do filtro de serragem e BFSS: Biocarvão do filtro de restos de silagem de sorgo.

Fonte: Da Autora, 2016.

As quantidades de macro e micronutrientes adicionadas ao solo, em mg dm⁻³, decorrentes da aplicação dos biocarvões e das respectivas doses são apresentados na TAB. 3 e TAB. 4.

TABELA 3
Quantidades de macronutrientes adicionados ao solo, em decorrência da aplicação de 2,5, 5,0, 7,5 e 10% de BFCA, BFS e BFSS

Nível (%)		Macronutrientes (mg dm ⁻³)						
		C	N	P	K	Ca	Mg	S
2,5	BFCA	2908,2	152,6	314,5	61,9	252,5	74,0	18,5
	BFS	5487,6	158,1	212,93	44,6	226,9	49,7	16,6
	BFSS	4487,4	307,8	399,6	64,1	329,9	95,9	20,3
5,0	BFCA	5816,4	305,3	629,0	123,9	505,1	148,0	37
	BFS	10975,2	316,2	425,9	89,2	453,9	99,5	33,2
	BFSS	8974,8	615,6	799,2	128,3	659,9	191,7	40,5
7,5	BFCA	8723,6	457,9	943,5	185,9	757,6	222,0	55,5
	BFS	16462,8	474,3	638,8	133,9	680,9	149,2	49,7
	BFSS	13462,2	923,4	1198,8	192,4	989,8	287,6	60,8
10	BFCA	11632,8	610,5	1258,0	247,9	1010,1	296,0	74,0
	BFS	21950,4	632,4	851,7	178,5	907,8	198,9	66,3
	BFSS	17949,6	1231,2	1598,4	256,5	1319,8	383,4	81,0

Sendo: BFCA Biocarvão do filtro de casca de arroz; BFS: Biocarvão do filtro de serragem e BFSS: Biocarvão do filtro de restos de silagem de sorgo.
Fonte: Da Autora, 2016.

TABELA 4
Quantidades de micronutrientes adicionados ao solo, em decorrência da aplicação de 2,5, 5,0, 7,5 e 10% de BFCA, BFS e BFSS

Nível (%)		Micronutrientes (mg dm ⁻³)				
		Cu	Mn	Zn	Fe	B
2,5	BFCA	2,13	9,80	15,63	46,99	0,50
	BFS	1,15	3,32	8,42	41,69	0,61
	BFSS	2,30	7,56	9,86	30,78	0,89
5,0	BFCA	4,26	19,61	31,27	93,98	1,00
	BFS	2,30	6,63	16,83	83,39	1,22
	BFSS	4,59	15,12	19,71	61,56	1,78
7,5	BFCA	6,38	29,42	46,90	140,97	1,50
	BFS	3,44	9,95	25,25	125,08	1,83
	BFSS	6,89	22,68	29,57	92,34	2,67
10	BFCA	8,51	39,22	62,53	187,96	2,00
	BFS	4,59	13,26	33,66	166,77	2,44
	BFSS	9,18	30,24	39,42	123,12	3,56

Sendo: BFCA Biocarvão do filtro de casca de arroz; BFS: Biocarvão do filtro de serragem e BFSS: Biocarvão do filtro de restos de silagem de sorgo.
Fonte: Da Autora, 2016.

3.2 Solo

O solo utilizado neste estudo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1979). Sua coleta foi realizada na camada superficial do solo (0-0,2 m) em uma área de Cerrado nativo de Montes Claros, cujas coordenadas geográficas eram 16°54'14,99" S e 43°57'41,28" O. O solo é de textura arenosa, com 78% de areia, 10% de silte e 12% de argila; as suas características químicas são apresentadas na TAB. 5.

TABELA 5

Análise química de fertilidade do solo utilizado no experimento

pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	V	COS	Fe	Mn	Zn	Cu
H ₂ O	mg dm ⁻³		-----		cmol _c dm ⁻³	-----			---	%	----	-----	mg dm ⁻³	-----
5,2	18,0	35	0,5	0,2	0,2	2,5	0,8	1,0	24	1,16	7,8	0,6	0,6	0,1

P- Extração com resina de troca aniônica

K, Fe, Mn, Zn e Cu- Extração com solução Mehlich-1

COS-Walkley-Black

3.3 Experimentos em vasos

Foram realizados três experimentos simultaneamente, em casa de vegetação, no período de fevereiro a abril de 2015, no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA – UFMG), cujas coordenadas geográficas são 16° 41' S e 43° 50' W e altitude de 646,29 m.

Cada um dos experimentos foi representado pela aplicação de um biochar (BFCA, BFS ou BFSS), e os tratamentos avaliados consistiram na adição de cinco níveis de biocarvão (0, 2,5%, 5% 7,5% e 10% v/v). Os tratamentos de cada experimento foram dispostos no delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições.

O solo foi peneirado (<4 mm) e adicionado em vasos plásticos com capacidade de quatro litros. O conteúdo de solo de cada vaso foi homogeneizado com cinco gramas de superfosfato simples (22% de P₂O₅) e

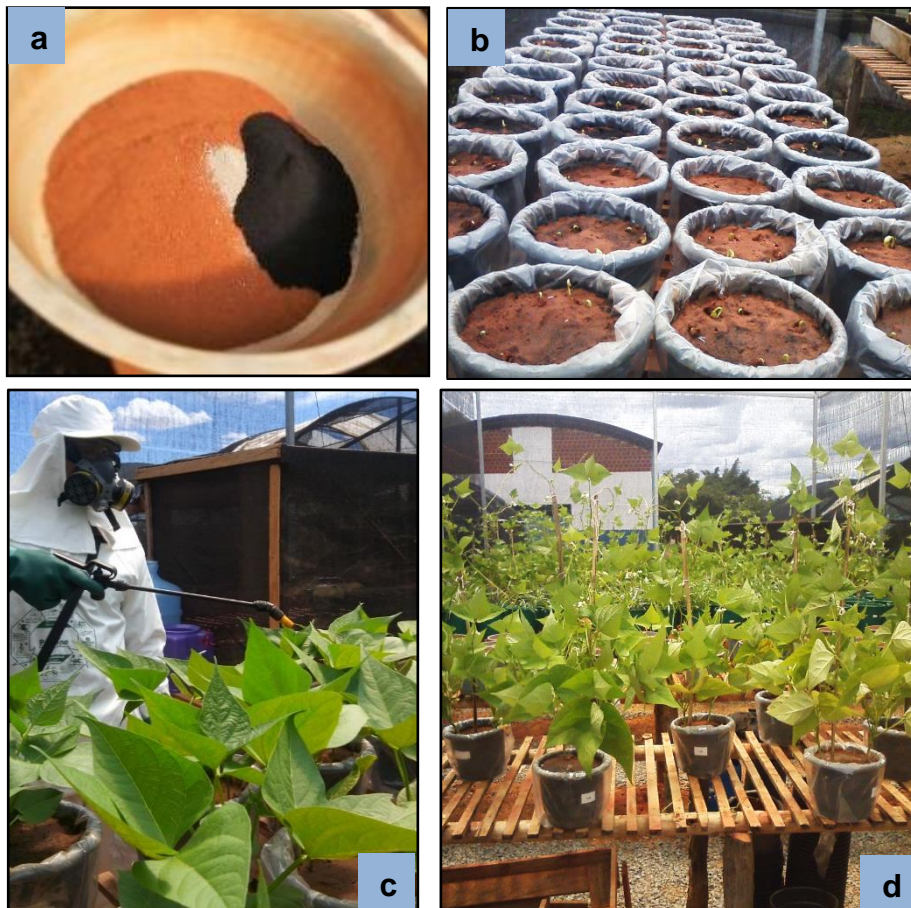
com a quantidade necessária de biochar para cada tratamento (FIG. 2a). Posteriormente todos os vasos foram molhados até a capacidade de campo, utilizando água destilada.

A cultura escolhida para o cultivo em vasos foi o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar BRSMG Talismã, que apresenta ciclo médio de 75 a 85 dias, floração média de 35 dias, hábito de crescimento indeterminado e porte prostrado (ABREU; RAMALHO, 2005). Foram semeadas dez sementes por vaso e, sete dias após o plantio, realizou-se o desbaste, permanecendo 2 plantas por vaso (FIG. 2b). Os vasos foram regularmente irrigados para manter o conteúdo de água próximo da capacidade de campo ao longo do experimento. A disponibilidade de água no solo foi monitorada diariamente por meio da pesagem dos vasos e da reposição de água, quando necessária.

Realizara-se, durante o experimento, quatro adubações de cobertura, que ocorreram respectivamente aos 14, 21, 28 e 35 dias após o plantio (DAP). Nas duas primeiras adubações, cada vaso recebeu 240 mg dm^{-3} de MgNO_3 e 250 mg dm^{-3} de KNO_3 . Nas últimas, aplicaram-se 100 mg dm^{-3} de ureia por vaso. As doses utilizadas na adubação foram definidas em função da exigência das plantas, sendo baseadas nas recomendações de Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

O controle fitossanitário foi realizado mediante duas pulverizações de inseticidas, aos 22 DAP com Decis 25 EC ($0,3 \text{ mL L}^{-1}$ de água) para controle de vaquinha (*Diabrotica speciosa*) e aos 43 DAP com Provado 200 SC (400 mL ha^{-1}) para controle da mosca-branca (*Bemisia tabaci*) (FIG. 2c).

FIGURA 2 – a) Processo de mistura dos biocarvões com o solo; b) vasos com os tratamentos aplicados e plantio realizado; c) controle de pragas; d) vista geral do experimento com as plantas antes do corte.



Fonte: Da autora, 2016.

3.4 Análises da planta e do solo

Após dois meses de condução dos experimentos, as vagens do feijoeiro de cada vaso foram colhidas e contadas. As plantas foram seccionadas na altura do colo, e a parte aérea foi lavada e secada em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até massa constante. Em seguida, o material foi pesado, triturado e as amostras foram submetidas à digestão nitroperclórica, com posterior determinação dos teores de N, P, K, S, Ca, B, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu, seguindo a metodologia proposta por Malavolta, Vitti e

Oliveira (1997). O acúmulo de nutrientes na massa seca da parte aérea e nos grãos foi determinado multiplicando-se os teores destes elementos pelo peso seco da referida fração da planta. Em seguida, foi retirado o solo de cada vaso e as raízes separadas por lavagem em água corrente sobre peneira de 1,0 mm de malha. Posteriormente as raízes foram secadas em estufa de circulação forçada a 60°C até massa constante, de modo a se definir a massa de matéria seca radicular.

O solo de cada vaso foi completamente misturado, passado em uma peneira de 2 mm e caracterizado seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). De acordo com essa metodologia, o pH foi determinado numa mistura 1:2,5 (w/v) de extrato de solo-água. O fósforo foi extraído com resina de troca aniônica e para análise do K, Fe, Mn, Zn e Cu, utilizou-se como extrator a solução Mehlich⁻¹ (0,05 mol L⁻¹ de HCl + 0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄). Determinou-se o Ca e o Mg por volumetria de complexação e o alumínio foi extraído utilizando uma solução de cloreto de potássio. A acidez potencial (H + Al) foi determinada pelo método do acetato de cálcio. Obteve-se a capacidade de troca de cátions através da soma de Ca, Mg, K e Al. O carbono orgânico do solo foi oxidado com dicromato de potássio em meio ácido e determinado pelo método de Walkley-Black.

3.5 Análise estatística

Para cada experimento, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e de regressão, utilizando-se o *software* SAEG (Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas) da Universidade Federal de Viçosa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação das propriedades químicas do solo

4.1.1 Componentes da acidez do solo

Nos três experimentos, os valores de pH do solo aumentaram linearmente após a adição dos biocarvões produzidos com materiais filtrantes descartados. Para a dose mais alta utilizada, 10% do volume de solo, o BFCA, o BFS e o BFSS elevaram o pH do solo em 0,76, 1,17 e 1,68 unidades, respectivamente (TAB.6). Tal fato é coerente, visto que os biocarvões apresentam em sua composição um alto conteúdo de cinzas (TAB. 2). As cinzas são ricas em óxidos e hidróxidos de metais alcalinos, e por serem facilmente dissolvidos reagem rapidamente com o solo, resultando no aumento de pH (STEENARI; KARLSSON; LINDQVIST, 1999).

Pode-se dizer que os biochars atuaram no solo tal como um corretivo de acidez. Essa elevação do pH do solo também foi observada em outros estudos (HOSSAIN *et al.*, 2010; CHAN *et al.*, 2007; ALBUQUERQUE *et al.*, 2014; YUAN; XU, 2012) e é considerada como um efeito positivo, especialmente quando o solo é limitado pela toxicidade de metais ou deficiências de nutrientes. No caso dos solos brasileiros, que geralmente são ácidos, essa alteração no pH é necessária para obtenção de maiores produtividades agrícolas. No entanto, segundo Albuquerque *et al.* (2014), é preciso considerar seriamente o fato de que grandes elevações do pH do solo, normalmente acima de 7,0, ocasionadas pelo biochar podem ter efeitos negativos sobre a produção das culturas.

A concentração de alumínio trocável (Al^{+3}) no solo não foi influenciada pela aplicação dos biocarvões (TAB. 6). Contrariando os resultados aqui encontrados, Yuan e Xu (2012) verificaram que, com a adição de 1% de biochar de restos culturais de feijão mungo (*Vigna radiata* L.), a concentração de Al^{+3} na solução do solo é reduzida em 59%. A diminuição do teor de Al^{+3} é esperada quando ocorre a elevação do pH do solo, pois nessa condição o

Al^{+3} precipita-se na forma de oxihidróxidos de Al, restando os cátions básicos na solução do solo na forma trocável (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Em função da baixa concentração de Al^{+3} no solo utilizado nos experimentos, $0,24\text{cmol}_c\text{ dm}^{-3}$, não foi possível verificar efeito dos biocarvões sobre essa variável. Segundo Alvarez *et al.* (1999), concentrações relativamente altas de Al^{+3} do solo estão acima $1,01\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$

Com relação à acidez potencial, houve alteração da sua concentração somente nos experimentos que receberam BFS e BFSS. Com a aplicação de doses crescentes de BFSS, a acidez potencial reduziu linearmente. Já quando o BFS foi empregado, verificou-se um comportamento quadrático da acidez potencial (TAB. 6).

Os maiores valores de H+Al, com aplicação dos primeiros níveis de BFS em relação ao tratamento controle, são explicados pelo maior crescimento das plantas. O próprio processo de absorção iônica radicular gera acidez ao solo, assim como a extração de cátions básicos. Por outro lado, com o aumento das doses de biochar, houve redução da acidez potencial, evidenciando o potencial corretivo do biocarvão.

TABELA 6

Equações de regressão ajustadas entre os componentes da acidez do solo em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões

Biochar	Atributo	Equação	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar para o valor máximo da variável
BFCA	pH	$y = 5,243 + 0,0756^{**}x$	0,98	6,0	10
	Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³)	$y = 0,042$	ns	-	-
	H+Al(cmol _c dm ⁻³)	$y = 1,81$	ns	-	-
BFS	pH	$y = 5,093 + 0,1166^{**}x$	0,99	6,26	10
	Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³)	$y = 0,042$	ns	-	-
	H+Al(cmol _c dm ⁻³)	$y = 1,801 + 0,103^{**}x - 0,0146^{**}x^2$	0,94	1,98	3,53
BFSS	pH	$y = 5,173 + 0,1676^{**}x$	0,98	6,85	10
	Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³)	$y = 0,025$	ns	-	-
	H+Al(cmol _c dm ⁻³)	$y = 1,847 - 0,073^{**}x$	0,90	1,12	10

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFCA – Biochar de filtro de casca de arroz; BFS – Biochar de filtro de serragem; BFSS – Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo; ** Significativo a 1%.

4.1.2 Teores de fósforo disponível e cátions trocáveis

O teor de fósforo disponível no solo aumentou linearmente nos experimentos (TAB. 7). A utilização da maior dose dos biocarvões, 10% do volume de solo, elevou a concentração de P no solo do nível considerado médio para muito alto, ou seja, acima de 80 mg dm^{-3} (RAIJ *et al.*, 1996). O aumento decorre, primeiramente, da elevada concentração desse elemento nos biochars (TAB. 2), já que as perdas de fósforo por volatilização só ocorrem com temperaturas de pirólise acima de 760°C (KNICKER, 2007). Outro importante fator que justifica o aumento da concentração de P é a elevação do pH. A disponibilidade do P está relacionada, entre outros fatores, com a acidez ou a alcalinidade do solo. Quando o pH deste é inferior a 5,7, o P está predominantemente na forma de íons de H_2PO_4^- que frequentemente reage ou é adsorvido por compostos de ferro ou alumínio, e por sua vez apresentam baixa solubilidade (TROEH; THOMPSON, 2007).

Além disso, Andrade, Fernandes e Faquin (2002) mostram que a adição de material orgânico ao solo aumenta a disponibilidade de P. Segundo os autores, as cargas negativas presentes nos grupos funcionais da matéria orgânica competem com o P pelos sítios de adsorção, bem como complexam os íons Fe e Al, elevando, portanto, a atividade do fósforo na solução do solo. Assim, é possível que as cargas elétricas negativas dos biocarvões tenham bloqueado os sítios de carga positiva, evitando a fixação do P no solo; e/ou complexado com Fe e Al. O P adicional fornecido pelos biochars é uma importante contribuição, visto que os solos tropicais, como é o caso dos latossolos que predominam no cerrado, são caracterizados pelos baixos teores de P na forma disponível às plantas. Nesses solos, o P é o nutriente que mais limita a produção agrícola.

Com relação aos cátions trocáveis, o comportamento crescente nas suas concentrações após a aplicação dos biocarvões está em concordância com outros trabalhos (CHAN *et al.*, 2007; RONDON *et al.*, 2007; HOUBEN *et al.*, 2013) (TAB. 6) e resulta da presença desses nutrientes nos próprios biocarvões e especialmente nas cinzas, que inevitavelmente os contêm (TAB. 2). De acordo com Glaser; Lehmann e Zech (2002), as cinzas de biochar

liberam rapidamente bases livres, tais como K, Ca, Mg e íons na solução do solo, aumentando assim o valor do pH do solo e fornecendo nutrientes prontamente disponíveis para o crescimento das plantas.

É importante observar que, diferentemente do BFSS, a adição de doses crescentes de BFCA e BFS resultou em aumentos quadráticos nas concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} do solo (TAB. 7). Essas respostas indicam que, após cultivar o feijoeiro, empregando-se os níveis mais baixos desses biocarvões, os teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} do solo reduzem. A redução inicial nos teores desses elementos determinada pelo aumento das doses de BFCA e BFS está relacionada a uma maior absorção dos nutrientes pelas plantas em relação ao tratamento controle, que não recebeu biochar. Possivelmente, para obter tal aumento de absorção, a planta tenha utilizado nutrientes provenientes dos biocarvões, além de parte dos nutrientes contidos no solo, resultando, portanto na diminuição dos teores de Ca e Mg no solo. Em contrapartida, quando as maiores doses foram aplicadas, as concentrações desses elementos aumentaram, fato que demonstra que as quantidades de Ca e Mg fornecidas por esses biocarvões foram superiores àquelas demandadas pelas plantas, resultando com isso na elevação dos níveis dos nutrientes no solo.

Segundo Alvarez *et al.* (1999), as concentrações de K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} são consideradas adequadas quando seus valores superam respectivamente 71 mg dm^{-3} , $2,4$ e $0,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Portanto, embora os teores de cátions trocáveis no solo sejam significativamente aumentados com a adição dos biochars, após o cultivo do feijoeiro, somente a concentração de K é mantida em níveis aceitáveis com a aplicação de doses iguais ou superiores a 3,6% de BFSS.

TABELA 7

Equações de regressão ajustadas entre fósforo disponível, cátions trocáveis do solo em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões

Biochar	Atributo	Equação	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar para o valor máximo da variável
BFCA	P (mg dm ⁻³)	$y = 20,442+7,199^{**}x$	0,97	92,43	10
	K ⁺ (mg dm ⁻³)	$y = 29,584+1,539^{**}x$	0,96	44,97	10
	Ca ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	$y = 1,220- 0,021^{**}x +0,0087^{**}x^2$	0,95	1,88	10
	Mg ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	$y = 0,593+0,007^{**}x +0,0017^{**}x^2$	0,84	0,83	10
BFS	P (mg dm ⁻³)	$y = 19,92+6,500^{**}x$	0,96	84,92	10
	K ⁺ (mg dm ⁻³)	$y = 23,254+4,047^{**}x$	0,91	63,72	10
	Ca ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	$y = 1,228- 0,019^{**}x+0,0097^{**}x^2$	0,99	2,01	10
	Mg ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	$y = 0,598- 0,0163^{**}x +0,005^{**}x^2$	1,00	0,90	10
BFSS	P(mg dm ⁻³)	$y = 19,838+7,272^{**}x$	0,96	92,56	10
	K ⁺ (mg dm ⁻³)	$y = 22,259+13,649^{**}x$	0,98	158,75	10
	Ca ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	$y = 1,195+0,08^{**}x$	0,99	1,99	10
	Mg ⁺² (cmol _c dm ⁻³)	$y = 0,57+0,032^{**}x$	0,96	0,89	10

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFCA – Biochar de filtro de casca de arroz; BFS – Biochar de filtro de serragem; BFSS – Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo; ** Significativo a 1%.

4.1.3 Teores de manganês, ferro, cobre e zinco

A adição de doses crescentes dos biocarvões elevou linearmente as concentrações de Mn e Zn do solo (TAB. 8), fato que possivelmente está associado à presença destes elementos nos próprios biochars (TAB. 2). Segundo Alvarez *et al.* (1999), teores de Mn no solo variando de 0-2,0 mg dm⁻³ são classificados como muito baixos. Antes da instalação do experimento, o teor de Mn era de 0,63 mg dm⁻³ e com a aplicação da menor dose de BFCA, BFS e BFSS (2,5%), foram adicionadas quantidades respectivas de 9,80, 3,31 e 7,56 mg dm⁻³ de Mn ao solo (TAB.8). Entretanto, os teores máximos alcançados ainda foram classificados como baixos, o que sugere que houve grande extração do elemento ou que nem todo Mn adicionado estava disponível para as plantas. Quanto ao Zn, os biocarvões elevaram as suas concentrações no solo de 0,37 mg dm⁻³ para 2,56, 2,66 e 2,98 mg dm⁻³ após a aplicação da maior dose de BFCA, BFS e BFSS respectivamente, com alteração na classificação agrônômica de muito baixo para alto (ALVAREZ *et al.*, 1999).

O teor de Cu também aumentou linearmente com a aplicação de doses crescentes de BFS e BFSS. Já com a adição de BFCA, essa variável comportou-se de maneira quadrática, ou seja, aumentou com aplicação de doses de até 8,4%, e, a partir dessa dose, a concentração de Cu tende a diminuir.

Embora o Fe também apareça em altas concentrações nos três biochars (TAB. 2), observou-se que, no solo, os seus valores reduziram linearmente com a adição de BFSS. Já com a aplicação dos demais biochars, o teor de Fe no solo reduziu de maneira quadrática, atingindo seus valores máximos com a aplicação de 3,57% de BFCA e 2,36% de BFS (TAB. 8). A diminuição da concentração de Fe no solo, com a adição dos biocarvões, pode ser explicada pela extração do nutriente pelas plantas ou ainda devido à maior sensibilidade desse elemento ao aumento de pH que os demais nutrientes. Segundo Abreu, Lopes e Santos (2007), a maior disponibilidade de Fe ocorre com pH do solo na faixa de 4 a 6. Já os demais micronutrientes estão mais disponíveis na faixa de pH de 5 a 6,5.

TABELA 8

Equações de regressão ajustadas entre as concentrações de micronutrientes do solo (Mn, Fe, Cu e Zn) em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões

Biochar	Atributo	Equação	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar para o valor máximo da variável
BFCA	Mn(mg dm ⁻³)	$y = 0,5036+0,0778^{**}x$	0,97	1,28	10
	Fe(mg dm ⁻³)	$y = 5,644+ 0,607^{**}x -0,0851^{**}x^2$	1,00	6,73	3,57
	Cu(mg dm ⁻³)	$y =0,0707+0,0506^{**}x -0,003^{**}x^2$	0,98	0,28	8,4
	Zn(mg dm ⁻³)	$y= 0,449+0,211^{**}x$	0,95	2,56	10
BFS	Mn(mg dm ⁻³)	$y = 0,44+0,0373^{**}x$	0,92	0,81	10
	Fe(mg dm ⁻³)	$y = 5,544+ 0,142^{**}x -0,0301^{**}x^2$	0,98	5,71	2,36
	Cu(mg dm ⁻³)	$y = 0,0856+0,026^{**}x$	0,98	0,35	10
	Zn(mg dm ⁻³)	$y= 0,330+0,233^{**}x$	0,98	2,66	10
BFSS	Mn(mg dm ⁻³)	$y = 0,4172+0,0706^{**}x$	0,95	1,12	10
	Fe(mg dm ⁻³)	$y = 5,755-0,1349^{**}x$	0,97	5,75	0
	Cu(mg dm ⁻³)	$y= 0,083+0,019^{**}x$	0,95	0,27	10
	Zn(mg dm ⁻³)	$y= 0,295+0,269^{**}x$	0,99	2.98	10

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFCA – Biochar de filtro de casca de arroz; BFS – Biochar de filtro de serragem; BFSS – Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo; ** Significativo a 1%.

4.1.4 CTC efetiva, CTC potencial, Saturação por Al, Saturação por bases e Carbono orgânico do solo (t, T, m, V e COS)

A análise de regressão mostra que a CTC efetiva aumentou linearmente no solo em resposta às doses dos biocarvões aplicados no cultivo de feijoeiro, sendo que a utilização da dose máxima de BFCA, BFS e BFSS foram suficientes para elevar a CTC efetiva do solo em 60, 78 e 80%, respectivamente (TAB. 9). O aumento dessa variável é resultado da elevação da concentração de cátions trocáveis de caráter básico, como K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} . Uzoma *et al.* (2011), Houben *et al.*, (2013) e Sousa (2015) também verificaram alterações positivas na CTC efetiva do solo com a aplicação de biochar.

Em relação aos valores de CTC potencial (T), ocorreu aumento linear de seus valores com aplicação de BFS e BFSS, e quadrático com a utilização de doses crescentes de BFCA (TAB. 9). Esses resultados mostram que a adição dos biocarvão alteraram a densidade de cargas negativas dependentes do pH. Vale ressaltar ainda que, devido à oxidação contínua das superfícies e à adsorção de ácidos orgânicos pelo biochar, o aumento da CTC potencial torna-se ainda mais expressivo com tempo (CHENG; LEHMANN; ENGELHARD, 2008). No estudo desses autores, comparou-se a CTC potencial de biocarvões de diferentes idades, porém produzidos com a mesma matéria-prima e em condições semelhantes; e verificou-se que a incubação do biochar durante um ano, a uma temperatura de 30 °C, elevou a CTC potencial de 0,17 para 7,1 $cmol_c kg^{-1} C$. Já em um biochar histórico, com cerca de 130 anos, esse valor aumentou para 164,4 $cmol_c kg^{-1} C$.

A saturação por alumínio (m) não foi alterada com a adição dos biocarvões (TAB. 9), o que se deve à baixa concentração Al^{+3} no solo e consequentemente baixa participação na CTC efetiva.

A saturação por bases (V) aumentou de forma quadrática com a aplicação de BFCA e BFS; e linearmente ao utilizar doses crescentes de BFSS (TAB. 9). A aplicação de 10% de BFCA, BFS e BFSS elevou a saturação por bases em 20, 36 e 45% respectivamente, o que seguindo a classificação de Alvarez *et al.* (1999), é suficiente para alterar o nível de

saturação por bases de médio para bom. Em regra, pode-se concluir que os valores de V% obtidos nos tratamentos, nos três experimentos, estão relacionados aos que apresentaram valor superior de pH e, ao mesmo tempo, valor superior de K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} . Esse aumento da saturação por bases com a aplicação de biochar, também foi relatado por SOUSA (2015) ao adicionar biochar produzido com lodo de esgoto no solo.

O carbono orgânico do solo aumentou linearmente com as doses dos biocarvões (TAB. 9). Notou-se, porém, que as alterações nessa variável foram baixas em relação ao tratamento controle, levando-se em consideração que os biocarvões apresentam altas concentrações de carbono. A adição da maior dose (10%) de BFCA, BFS e BFSS, por exemplo, deveria ter aumentado aproximadamente 12, 22 e 18 $g\ dm^{-3}$ respectivamente (TAB. 3). Porém o maior aumento observado foi de 8,5 $g\ dm^{-3}$ com a aplicação de 10% de BFSS. Segundo Madari *et al.* (2006), o biocarvão, embora possa ser considerado estável no sistema solo, também sofre biodegradação. Em solos sob clima subtropical, o biochar pode ser significativamente degradado dentro da escala de tempo de décadas ou séculos. Bird *et al.* (1999) relacionam o tempo de degradação de partículas carbonizadas à granulometria destas. De acordo com esses autores, a meia-vida das partículas carbonizadas com tamanho $<2\ mm$ foi estimada em menos de 50 anos, e a de partículas com tamanho $>2\ mm$, em menos de 100 anos.

A alteração do COS abaixo do esperado também pode estar ligada à estabilidade do carbono pirogênico, significando que a adição de carvão, em curto prazo, altera pouco o teor de carbono oxidável do solo, determinável pela oxidação com dicromato de potássio em meio ácido. Segundo Petter *et al.* (2012), a elevada estabilidade molecular do carbono pirogênico do biochar, faz com que esse método não consiga oxidar todo o material oriundo da pirólise.

TABELA 9

Equações de regressão ajustadas entre os indicadores de fertilidade do solo (t, T, m, V, COS) em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões

Biochar	Atributo	Equação	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar para o valor máximo da variável
BFCA	t (cmol _c dm ⁻³)	y= 1,677+0,104**x	0,91	2,72	10
	T (cmol _c dm ⁻³)	y=3,673-0,0726**x+0,018**x ²	0,92	4,75	10
	m (%)	y= 2,42	ns	-	-
	V (%)	y= 50,868-0,563**x+0,159** x ²	0,84	61,14	10
	COS (dag kg ⁻¹)	y= 1,058+0,064x	0,98	1,70	10
BFS	t (cmol _c dm ⁻³)	y= 1,641+0,129**x	0,94	2,93	10
	T (cmol _c dm ⁻³)	y=3,673+0,078**x	0,92	4,45	10
	m (%)	y= 2,21	ns	-	-
	V (%)	y= 51,201-1,921**x+0,379**x ²	0,96	69,89	10
	COS (dag kg ⁻¹)	y= 1,027+0,060**x	0,99	1,63	10
BFSS	t (cmol _c dm ⁻³)	y= 1,801+0,150**x	0,99	3,30	10
	T (cmol _c dm ⁻³)	y=3,723+0,067**x	0,90	4,39	10
	m (%)	y=1,25	ns	-	-
	V (%)	y= 50,886+2,404**x	0,96	74,93	10
	COS (dag kg ⁻¹)	y=0,935+0,085**x	0,94	1,78	10

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFCA – Biochar de filtro de casca de arroz; BFS – Biochar de filtro de serragem; BFSS – Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo; ** Significativo a 1%.

4.2 Avaliação do crescimento e nutrição do feijoeiro

4.2.1 Características Agronômicas

A massa seca da raiz (MSR), a massa seca da parte aérea (MSPA), a massa seca dos grãos (MSG), o número de vagens (NV) e o número de grãos (NG) foram positivamente influenciados pelo incremento nas doses dos biocarvões (TAB. 10).

Os resultados demonstram que a adição dos biochars ao solo exerceu uma clara influência sobre o crescimento radicular das plantas. As doses de 5,9% de BFCA, 5,83% de BFS e 7,12% de BFSS proporcionaram os valores máximos na MSR, o que representou aumentos de 204, 200 e 141% respectivamente, em relação ao tratamento controle. A elevação da MSR em função das doses dos biocarvões pode ter sido determinada principalmente em virtude do aumento de pH do solo para níveis considerados ótimos para a cultura do feijoeiro, bem como em razão da maior concentração de nutrientes disponíveis (TAB. 7 e TAB. 8). O maior desenvolvimento radicular também pode ser decorrente de alterações de alguns atributos físicos do solo, como capacidade de campo e densidade. Segundo Olmo *et al.* (2016), a adição de biochar leva à melhora nesses atributos do solo, favorecendo o crescimento de raízes e conseqüentemente promovendo o maior desenvolvimento das culturas. Contudo, vale ressaltar que a alteração desses atributos é altamente dependente do tipo de biochar empregado. No estudo dos pesquisadores supracitados, foi verificado que a adição de biochar de palha de trigo elevou a capacidade de campo e reduziu a densidade de um solo arenoso, enquanto o biochar de restos culturais de oliva não afetou nenhuma dessas propriedades.

Nos três experimentos, a MSPA apresentou resposta quadrática às doses de biochar (TAB. 10), sendo que com a aplicação de 7,32% de BFCA, 8,17% de BFS e 7,02% de BFSS, a MSPA atingiu os valores máximos de 16,98, 18,34 e 17,32 g planta⁻¹, respectivamente. Efeito positivo da aplicação de biochar sobre a massa seca da parte aérea das plantas tem sido relatado por vários pesquisadores (GLASER *et al.*, 2001; RONDON *et al.*, 2007;

CHAN *et al.*, 2007; ALBUQUERQUE *et al.*, 2014). A maior produção de biomassa da planta mostra que, além da produção de grãos, com a aplicação dos biocarvões ao solo, pode-se produzir leguminosas, semelhantes ao feijoeiro, para serem usadas como adubos verdes. De acordo com Alvarenga *et al.* (1995), a produção de biomassa é uma das características mais importantes das leguminosas utilizadas como adubos verdes. Entretanto, existe uma grande variação de produção entre as espécies, em função das condições edafoclimáticas nas quais são cultivadas, podendo ser resultado de um comportamento nutricional diferenciado. Os resultados aqui encontrados mostram que a produção de MSPA do feijoeiro superou a de outras leguminosas comumente utilizadas na adubação verde. Farias (2012) utilizou feijão guandu como adubo verde para o milho e verificou que a MSPA da leguminosa foi de 12,0 g planta⁻¹. Alvarenga *et al.* (1997), trabalhando com feijão de porco sob cultivo convencional, obtiveram valor de MSPA correspondente a 7,0 g planta⁻¹.

Assim como aconteceu para MSR e MSPA, a aplicação de doses crescentes dos biochars alterou positivamente as demais características agronômicas. O BFCA elevou linearmente o valor da MSG, NV e NG (TAB. 10) o que sugere que ainda há potencial de aumento para essas características com o fornecimento de doses mais elevadas. Com a adição de 10% desse biochar, a MSG passou de 3,39 g planta⁻¹, no tratamento controle, para 18,73 g planta⁻¹. Ainda com relação à MSG, NV e NG, os seus valores foram alterados de forma quadrática com a incorporação de BFS e BFSS. A MSG atingiu o máximo de 17,57 g planta⁻¹ com aplicação de 6,80% de BFS, e de 18,60 g planta⁻¹ quando se adicionou 7,12% de BFSS.

A maior produtividade de grãos de feijão ao empregar os biocarvões confirma o potencial de utilização agrícola dos biochars produzidos com materiais filtrantes descartados. A aplicação de 10% de BFCA, 6,8% de BFS e 7,12% de BFSS resultou em produtividades médias de 2,65, 2,5 e 2,63 t ha⁻¹, respectivamente. Esses valores foram superiores à produtividade média nacional em 2014 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2015), que foi de 1,0 t ha⁻¹. Uzoma *et al.* (2011),

usando biochar produzido com esterco bovino, também constataram aumento na produtividade na cultura do milho.

De forma geral, observou-se que os efeitos positivos dos biochars sobre as características agronômicas avaliadas estão relacionados principalmente a uma maior concentração de nutrientes disponíveis no solo. A maior disponibilidade de nutrientes ocorreu devido ao efeito corretivo dos biochars ou ainda devido ao incremento de nutrientes advindos dos próprios biochars. Lehmann *et al.* (2003), Albuquerque *et al.* (2014) e Uzoma *et al.* (2011) também relataram incremento na produtividade da planta após a aplicação de biochar e atribuíram esse aumento à maior disponibilidade de nutrientes no solo.

TABELA 10

Equações de regressão ajustadas entre as características agrônômicas (MSR, MSPA, MSG, NV e NG) em resposta à adição de doses crescentes de três biocarvões.

Biochar	Atributo	Equação	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar para o valor máximo da variável
BFCA	MSR (g planta ⁻¹)	$y=2,1412+1,1539^{**}x-0,0884^{**}x^2$	0,83	6,52	5,90
	MSPA (g planta ⁻¹)	$y=6,5201+2,8598^{**}x-0,1954^{**}x^2$	0,94	16,98	7,32
	MSG (g planta ⁻¹)	$y=3,9305+1,4801^{**}x$	0,94	18,73	10
	NV	$y=9,81+1,164^{**}x$	0,97	21,45	10
	NG	$y=18,45+6,26^{**}x$	0,95	81,05	10
BFS	MSR (g planta ⁻¹)	$y=2,143+1,4684^{**}x-0,1259^{**}x^2$	0,87	6,42	5,83
	MSPA (g planta ⁻¹)	$y=6,6821+2,8532^{**}x-0,1742^{**}x^2$	0,94	18,34	8,17
	MSG (g planta ⁻¹)	$y=3,1153+4,2542^{**}x-0,313^{**}x^2$	0,97	17,57	6,80
	NV	$y=9,6529+3,3744^{**}x-0,2139^{**}x^2$	0,95	22,96	7,89
	NG	$y=16,275+19,102^{**}x-1,4233^{**}x^2$	0,96	79,82	6,68
BFSS	MSR (g planta ⁻¹)	$y=1,8944+0,7531^{**}x-0,0529^{**}x^2$	0,87	4,57	7,12
	MSPA (g planta ⁻¹)	$y=6,4806+3,088^{**}x-0,22^{**}x^2$	0,92	17,32	7,02
	MSG (g planta ⁻¹)	$y=4,0061+3,5471^{**}x-0,2163^{**}x^2$	0,90	18,60	7,12
	NV	$y=9,5386+3,6591^{**}x-0,2577^{**}x^2$	0,98	22,53	7,10
	NG	$y=18,243+16,866^{**}x-1,1286^{**}x^2$	0,91	81,25	7,47

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFCA – Biochar de filtro de casca de arroz; BFS – Biochar de filtro de serragem; BFSS – Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo; **: Significativo a 1%.

4.2.2 Teor e acúmulo de nutrientes no feijoeiro

Nas TAB. 11, 12 e 13, são apresentados os teores e acúmulos de macronutrientes na massa seca da parte aérea (MSPA) e nos grãos do feijoeiro, adubado com BFCA, BFS e BFSS, respectivamente. Independentemente do biocarvão utilizado, os teores e acúmulos de macronutrientes aumentaram com a aplicação dos biocarvões. A maior disponibilidade de nutrientes no solo, como indicado na TAB. 7 e TAB. 8, e a melhoria nas condições de crescimento após a adição dos biocarvões parece ter refletido na maior concentração e acúmulo de nutrientes no feijoeiro. Segundo Chan *et al.* (2007), a adição de biochar ao solo leva a uma série de alterações positivas na sua qualidade. Ainda segundo esses autores, melhorias, como aumento da capacidade de campo e do pH do solo e a redução da densidade e da acidez potencial trocável, tornam o solo um ambiente mais favorável para o crescimento da raiz e, por conseguinte, aumentam a capacidade das plantas em absorver e utilizar os nutrientes aplicados.

Além dos fatores já citados, o aumento nos teores e acúmulos de N, tanto na MSPA quanto nos grãos, pode ter relação com a fixação biológica de nitrogênio (FBN). Apesar de ainda serem necessários mais estudos de campo a longo prazo para compreender os efeitos do biochar sobre a FBN, pesquisas como a de Rondon *et al.* (2007), apontam que a adição de biochar ao solo aumenta a disponibilidade de B, Mo, K, Ca e P, bem como eleva o pH de modo a favorecer a maior FBN. No estudo desses autores, foi verificado que a proporção de N fixado pelo feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) aumentou de 50%, sem adição de biochar, para 72%, com a incorporação de 90 g kg⁻¹ de biochar.

No presente estudo, o nutriente acumulado em maiores quantidades, independentemente do biocarvão utilizado, foi o nitrogênio (TAB. 11, 12 e 13). Segundo Arf (1999), o N é o nutriente exportado em maiores quantidades; além disso, juntamente com o P, tem proporcionado as maiores respostas em produção na cultura do feijoeiro. Uzoma *et al.* (2011) ressaltam que aumentar o acúmulo de nitrogênio nas plantas através da adição de

biochar é uma das maneiras de melhorar a eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados, sobretudo em solos arenosos nos quais a perda de N é um grande problema agrônômico e ambiental. Os autores ainda relataram que a adição de 15 t ha^{-1} de biochar de dejetos bovinos dobrou o acúmulo de N nos grãos de milho em relação ao tratamento controle.

Nos três experimentos, as maiores produções, tanto de MSPA quanto de grãos, ocorreu quando se utilizaram níveis de biochar superiores a 5% do volume de solo (TAB. 10). Esses resultados indicam que o feijoeiro responde à aplicação de biocarvão, possivelmente pela melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Em relação ao fósforo, nutriente mais limitante em solos do Bioma Cerrado, o aumento da concentração e do acúmulo, tanto na MSPA quanto na MSG, pode ser atribuído, além das melhorias nos atributos físico e químicos do solo após a adição dos biocarvões, à maior absorção de N pelas plantas, como discutido anteriormente, uma vez que o N influencia de maneira positiva a absorção de P (CANTARELLA, 2007). Além disso, estudos como o de Hammer *et al.* (2014) têm demonstrado que o biochar favorece as associações micorrízicas e com isso o aumento da absorção de P. Lehmann *et al.* (2003) também observaram um aumento no acúmulo de fósforo na parte aérea do feijão caupi após incorporação de carvão vegetal ao solo. Segundo Arf (1994), o fósforo é o nutriente que mais influi na produtividade do feijoeiro; entretanto, é um dos nutrientes menos exportados da área de cultivo.

O aumento da concentração e acúmulo de K, Ca, Mg e S no feijoeiro pode estar relacionados ao favorecimento da disponibilidade não somente desses nutrientes pelo biocarvões estudados, como pelo aumento da disponibilidade de outros nutrientes, como N e P, discutidos anteriormente. Diferentemente dos resultados aqui obtidos, SOUSA (2015) relatou que a incorporação do biochar produzido a partir de lodo de esgoto reduziu a concentração de K nas folhas de rabanete. De acordo com o autor, esse resultado ocorreu em função dos baixos teores do elemento no biochar e dos possíveis efeitos antagônicos do K com outros cátions, como cálcio e amônio, que foram fornecidos em grande quantidade pelo biocarvão.

TABELA 11
Equações de regressão ajustadas entre os teores e acúmulo de macronutrientes no feijão carioca (N, P, K, Ca, Mg e S) em resposta à adição de doses crescentes do BFCA

		Equações	R ²	Valor máximo da variável (g planta ⁻¹)	Nível de biochar (%)
Teores					
N	MSPA	$y = 23,52 + 2,862^{**}x - 0,165^{**}x^2$	0,94	35,96	8,69
	Grãos	$y = 36,003 + 2,934^{**}x - 0,197^{**}x^2$	0,95	46,95	7,46
P	MSPA	$y = 2,84 + 0,152^{**}x$	0,90	4,36	10
	Grãos	$y = 3,42 + 0,072^{**}x$	0,91	4,14	10
K	MSPA	$y = 23,24 + 0,532^{**}x$	0,92	28,56	10
	Grãos	$y = 11,691 + 1,011^{**}x - 0,074^{**}x^2$	0,92	15,13	6,80
Ca	MSPA	$y = 22,84 + 0,984^{**}x$	0,95	32,68	10
	Grãos	$y = 5,617 + 0,294^{**}x - 0,019^{**}x^2$	0,99	6,73	7,59
Mg	MSPA	$y = 1,997 + 0,482^{**}x - 0,027^{**}x^2$	0,95	4,12	8,80
	Grãos	$y = 8,709 + 0,889^{**}x - 0,062^{**}x^2$	0,98	11,91	7,21
S	MSPA	$y = 1,1 + 0,072^{**}x$	0,99	1,82	10
	Grãos	$y = 10,749 + 1,225^{**}x - 0,094^{**}x^2$	0,87	14,75	6,54
Acúmulo					
N	MSPA	$y = 0,161 + 0,106^{**}x - 0,007^{**}x^2$	0,95	0,59	8,05
	Grãos	$y = 0,1567 + 0,0712^{**}x$	0,94	0,87	10
P	MSPA	$y = 0,015 + 0,013^{**}x - 0,0007^{**}x^2$	0,94	0,071	8,93
	Grãos	$y = 0,0146 + 0,006^{**}x$	0,96	0,075	10
K	MSPA	$y = 0,152 + 0,068^{**}x - 0,0037^{**}x^2$	0,97	0,46	9,19
	Grãos	$y = 0,051 + 0,0225^{**}x$	0,94	0,28	10
Ca	MSPA	$y = 0,148 + 0,086^{**}x - 0,005^{**}x^2$	0,96	0,51	8,46
	Grãos	$y = 0,0223 + 0,0103^{**}x$	0,95	0,13	10
Mg	MSPA	$y = 0,015 + 0,012^{**}x - 0,0007^{**}x^2$	0,96	0,066	8,57
	Grãos	$y = 0,0403 + 0,0178^{**}x$	0,94	0,22	10
S	MSPA	$y = 0,012 + 0,0019^{**}x$	0,97	0,031	10
	Grãos	$y = 0,0515 + 0,0214^{**}x$	0,92	0,26	10

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFCA – Biochar de filtro de casca de arroz; **: Significativo a 1%.

TABELA 12
Equações de regressão ajustadas entre os teores e acúmulo de macronutrientes no feijão carioca (N, P, K, Ca, Mg e S) em resposta à adição de doses crescentes do BFS.

		Equações	R ²	Valor máximo da variável (g planta ⁻¹)	Nível de biochar
Teores					
N	MSPA	$y = 23,17 + 3,391^{**}x - 0,194^{**}x^2$	0,98	37,96	8,72
	Grãos	$y = 36,889 + 3,193^{**}x - 0,234^{**}x^2$	0,86	47,61	6,72
P	MSPA	$y = 2,86 + 0,2^{**}x$	0,92	4,86	10
	Grãos	$y = 3,517 + 0,194^{**}x - 0,011^{**}x^2$	0,89	4,35	8,52
K	MSPA	$y = 23,7 + 0,772^{**}x$	0,97	31,42	10
	Grãos	$y = 11,74 + 0,972^{**}x - 0,072^{**}x^2$	0,90	15,02	6,75
Ca	MSPA	$y = 23,64 + 1,38^{**}x$	0,94	37,44	10
	Grãos	$y = 5,711 + 0,347^{**}x - 0,026^{**}x^2$	0,93	6,86	6,60
Mg	MSPA	$y = 1,934 + 0,645^{**}x - 0,039^{**}x^2$	0,98	4,60	8,28
	Grãos	$y = 8,963 + 0,898^{**}x - 0,061^{**}x^2$	0,93	12,29	7,41
S	MSPA	$y = 1,22 + 0,12^{**}x$	0,97	2,42	10
	Grãos	$y = 10,714 + 1,321^{**}x - 0,095^{**}x^2$	0,92	15,31	6,96
Acúmulo					
N	MSPA	$y = 0,161 + 0,113^{**}x - 0,0061^{**}x^2$	0,96	0,68	9,29
	Grãos	$y = 0,130 + 0,200^{**}x - 0,0147^{**}x^2$	0,95	0,81	6,81
P	MSPA	$y = 0,016 + 0,014^{**}x - 0,0007^{**}x^2$	0,96	0,082	9,71
	Grãos	$y = 0,015 + 0,017^{**}x - 0,0012^{**}x^2$	0,96	0,073	6,96
K	MSPA	$y = 0,1987 + 0,0414^{**}x$	0,94	0,61	10
	Grãos	$y = 0,037 + 0,0646^{**}x - 0,005^{**}x^2$	0,96	0,25	6,73
Ca	MSPA	$y = 0,2168 + 0,0493^{**}x$	0,93	0,71	10
	Grãos	$y = 0,017 + 0,0299^{**}x - 0,002^{**}x^2$	0,97	0,12	6,79
Mg	MSPA	$y = 0,014 + 0,014^{**}x - 0,0008^{**}x^2$	0,96	0,079	9,00
	Grãos	$y = 0,0327 + 0,05^{**}x - 0,0036^{**}x^2$	0,97	0,21	6,99
S	MSPA	$y = 0,0132 + 0,0031^{**}x$	0,97	0,044	10
	Grãos	$y = 0,036 + 0,065^{**}x - 0,0047^{**}x^2$	0,96	0,26	6,89

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFS – Biochar de filtro de serragem; **: Significativo a 1%.

TABELA 13
Equações de regressão ajustadas entre os teores e acúmulo de macronutrientes no feijão carioca (N, P, K, Ca, Mg e S) em resposta à adição de doses crescentes do BFSS.

		Equações	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar
Teores					
N	MSPA	$y=23,55+3,801^{**}x-0,238^{**}x^2$	0,92	38,76	8,00
	Grãos	$y=36,323+3,899^{**}x-0,253^{**}x^2$	0,96	51,30	7,70
P	MSPA	$y = 2,86+ 0,212^{**}x$	0,94	4,98	10
	Grãos	$y = 3,494+0,281^{**}x -0,015^{**}x^2$	0,97	4,81	9,42
K	MSPA	$y = 25,2+1,248^{**}x$	0,98	37,68	10
	Grãos	$y=11,691+1,043^{**}x-0,074^{**}x^2$	0,93	15,35	7,02
Ca	MSPA	$y = 23,58+ 1,668^{**}x$	0,96	40,26	10
	Grãos	$y = 5,771+0,355^{**}x -0,026^{**}x^2$	0,88	6,97	6,75
Mg	MSPA	$y = 1,97+0,783^{**}x -0,0503^{**}x^2$	0,98	5,02	7,78
	Grãos	$y = 9,034+0,945^{**}x-0,063^{**}x^2$	0,91	12,58	7,51
S	MSPA	$y = 1,36+ 0,164^{**}x$	0,95	3,00	10
	Grãos	$y = 10,66+1,444^{**}x -0,104^{**}x^2$	0,95	15,67	6,94
Acúmulo					
N	MSPA	$y = 0,160+0,128^{**}x -0,008^{**}x^2$	0,94	0,65	7,61
	Grãos	$y = 0,164+0,176^{**}x-0,0101^{**}x^2$	0,91	0,93	8,70
P	MSPA	$y = 0,014+0,016^{**}x-0,0009^{**}x^2$	0,95	0,081	8,61
	Grãos	$y = 0,018+0,015^{**}x-0,0008^{**}x^2$	0,91	0,085	9,13
K	MSPA	$y = 0,161+ 0,1^{**}x -0,006^{**}x^2$	0,94	0,59	8,62
	Grãos	$y = 0,049+0,055x-0,0033x^2$	0,90	0,28	8,36
Ca	MSPA	$y = 0,15+0,110^{**}x-0,0064^{**}x^2$	0,96	0,62	8,57
	Grãos	$y = 0,024+0,025^{**}x-0,0015^{**}x^2$	0,89	0,13	8,4
Mg	MSPA	$y = 0,0141+0,018^{**}x-0,001^{**}x^2$	0,96	0,084	8,00
	Grãos	$y = 0,045+0,042^{**}x-0,0024^{**}x^2$	0,89	0,23	8,79
S	MSPA	$y = 0,0161+0,0033^{**}x$	0,93	0,049	10
	Grãos	$y = 0,049+0,056^{**}x-0,0034^{**}x^2$	0,91	0,28	8,25

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFSS – Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo;

** : Significativo a 1%.

Em relação aos micronutrientes, semelhantemente ao verificado para os macronutrientes, independentemente do biocarvão utilizado, houve um aumento tanto da concentração quanto do acúmulo na MSPA e nos grãos do feijoeiro (TAB. 14, 15 e 16). Os níveis de biocarvão correspondentes à máxima produção de MSPA e de grão foram superiores a 5%, indicando a resposta positiva dos biocarvões no aumento da disponibilidade de micronutrientes. Além disso, alguns elementos, como ferro, molibdênio e cobalto são essenciais no processo de fixação simbiótica do nitrogênio (ARF, 1994).

No entanto, na literatura há diferentes respostas à absorção de nutrientes em função da matéria-prima utilizada para a produção de biocarvão e da cultura utilizada nos estudos. Albuquerque *et al.* (2013), cultivando trigo, observaram que a adição de biochar produzido com a palha de trigo elevou a concentração de Zn e reduziu a concentração de Fe na MSPA. Também Lehmann *et al.* (2003) verificaram que a aplicação de 20% de biochar aumentou a absorção de Zn e de Cu na MSPA do feijão caupi e reduziu a absorção de Mn. Por outro lado, Sousa (2015) verificou que a aplicação de 60 Mg ha⁻¹ de biochar de lodo de esgoto elevou a concentração de Mn nas folhas de rabanete de 70,25 mg kg⁻¹ para 118 mg kg⁻¹. Rondon *et al.* (2007) observaram que doses crescentes de biochar produzido com toras de eucalipto, aumentaram a absorção de B e reduziram a de Fe na MSPA do feijoeiro.

TABELA 14
Equações de regressão ajustadas entre os teores de micronutrientes no feijão carioca (Zn, Cu, B, Fe e Mn) em resposta à adição de doses crescentes de BFCA

		Equações	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar
Teores					
Zn	MSPA	$y=38,026+3,099^{**}x-0,185^{**}x^2$	0,91	51,00	8,37
	Grãos	$y=51,226+1,523^{**}x-0,105^{**}x^2$	0,85	56,75	7,25
Cu	MSPA	$y=5,82+0,704^{**}x-0,048^{**}x^2$	0,95	8,40	7,33
	Grãos	$y=16,76+0,304^{**}x$	0,92	19,8	10
B	MSPA	$y=67,443+7,334^{**}x-0,517^{**}x^2$	0,94	93,47	7,10
	Grãos	$y=20,163+1,094^{**}x-0,101^{**}x^2$	0,98	23,14	5,44
Mn	MSPA	$y=335,77+31,07^{**}x-1,98^{**}x^2$	0,96	457,74	7,85
	Grãos	$y=65,869+1,681^{**}x-0,110^{**}x^2$	0,97	72,31	7,66
Fe	MSPA	$y=141,99+33,485^{**}x-2,50^{**}x^2$	0,89	253,98	6,69
	Grãos	$y=17,50$	ns	-	-
Acúmulo					
Zn	MSPA	$y=0,259+0,150^{**}x-0,0096^{**}x^2$	0,94	0,84	7,81
	Grãos	$y=0,2139+0,084^{**}x$	0,94	0,18	10
Cu	MSPA	$y=0,039+0,027^{**}x-0,0018^{**}x^2$	0,95	0,14	7,42
	Grãos	$y=0,0618+0,0302^{**}x$	0,95	0,36	10
B	MSPA	$y=0,462+0,293^{**}x-0,0198^{**}x^2$	0,95	1,54	7,39
	Grãos	$y=0,0909+0,0319^{**}x$	0,92	0,41	10
Mn	MSPA	$y=2,269+1,387^{**}x-0,0905^{**}x^2$	0,95	7,58	7,66
	Grãos	$y=0,2686+0,1079^{**}x$	0,95	1,35	10
Fe	MSPA	$y=1,0454+0,8575^{**}x-0,06^{**}x^2$	0,92	4,11	7,14
	Grãos	$y=0,0753+0,0246^{**}x$	0,93	0,32	10

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFCA – Biochar de filtro de casca de arroz; **: Significativo a 1%.

TABELA 15

Equações de regressão ajustadas entre os teores de micronutrientes no feijão carioca (Zn, Cu, B, Fe e Mn) em resposta à adição de doses crescentes de BFS.

		Equações	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar
Teores					
Zn	MSPA	$y = 36,803 - 3,914^{**}x + 0,253^{**}x^2$	1,00	51,96	7,75
	Grãos	$y = 50,397 + 3,622^{**}x - 0,275^{**}x^2$	0,99	62,31	6,58
Cu	MSPA	$y = 5,874 + 0,761^{**}x - 0,047^{**}x^2$	0,95	8,96	8,11
	Grãos	$y = 20,00$	ns	-	-
B	MSPA	$y = 67,294 + 9,437^{**}x - 0,631^{**}x^2$	0,97	102,58	7,48
	Grãos	$y = 22,90$	ns	-	-
Mn	MSPA	$y = 337,71 + 32,82^{**}x - 2,127^{**}x^2$	0,95	464,30	7,71
	Grãos	$y = 66,103 + 2,090^{**}x - 0,141^{**}x^2$	0,94	73,87	7,43
Fe	MSPA	$y = 139,96 + 35,62^{**}x - 2,501^{**}x^2$	0,93	266,82	7,12
	Grãos	$y = 18,90$	ns	-	-
Acúmulo					
Zn	MSPA	$y = 0,248 + 0,162^{**}x - 0,0096^{**}x^2$	0,97	0,93	8,44
	Grãos	$y = 0,158 + 0,270^{**}x - 0,02^{**}x^2$	0,98	1,07	6,75
Cu	MSPA	$y = 0,041 + 0,027^{**}x - 0,0015^{**}x^2$	0,95	0,16	9,07
	Grãos	$y = 0,056 + 0,082^{**}x - 0,0058^{**}x^2$	0,95	0,35	7,07
B	MSPA	$y = 0,475 + 0,322^{**}x - 0,0191^{**}x^2$	0,96	1,83	8,43
	Grãos	$y = 0,071 + 0,093^{**}x - 0,0066^{**}x^2$	0,94	0,40	7,02
Mn	MSPA	$y = 2,372 + 1,402^{**}x - 0,0821^{**}x^2$	0,95	8,36	8,54
	Grãos	$y = 0,214 + 0,311^{**}x - 0,0226^{**}x^2$	0,97	1,28	6,87
Fe	MSPA	$y = 1,0555 + 0,884^{**}x - 0,054^{**}x^2$	0,94	4,68	8,20
	Grãos	$y = 0,0555 + 0,0805^{**}x - 0,006x^2$	0,98	0,33	6,94

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFS – Biochar de filtro de serragem; **: Significativo a 1%.

TABELA 16

Equações de regressão ajustadas entre os teores de micronutrientes no feijão carioca (Zn, Cu, B, Fe e Mn) em resposta à adição de doses crescentes de BFSS.

		Equações	R ²	Valor máximo da variável	Nível de biochar
Teores					
Zn	MSPA	$y = 38,82 + 5,456^{**}x - 0,352^{**}x^2$	0,93	60,00	7,75
	Grãos	$y = 50,1 + 2,54^{**}x - 0,136^{**}x^2$	0,97	61,96	9,34
Cu	MSPA	$y = 6,034 + 1,089^{**}x - 0,079^{**}x^2$	0,92	9,79	6,90
	Grãos	$y = 17,38 + 0,696^{**}x$	0,91	24,34	10
B	MSPA	$y = 68,51 + 11,425^{**}x - 0,719^{**}x^2$	0,96	113,91	7,95
	Grãos	$y = 20,56 + 0,7^{**}x$	0,96	27,56	10
Mn	MSPA	$y = 339,33 + 39,461^{**}x - 2,79^{**}x^2$	0,94	478,88	7,07
	Grãos	$y = 67,06 + 0,88^{**}x$	0,92	75,86	10
Fe	MSPA	$y = 140,66 + 41,602^{**}x - 2,97^{**}x^2$	0,94	286,22	7,00
	Grãos	$y = 17,72 + 0,244^{**}x$	0,84	20,16	10
Acúmulo					
Zn	MSPA	$y = 0,268 + 0,197^{**}x - 0,013^{**}x^2$	0,92	1,00	7,42
	Grãos	$y = 0,207 + 0,209^{**}x - 0,0118^{**}x^2$	0,93	1,14	8,87
Cu	MSPA	$y = 0,042 + 0,034^{**}x - 0,0024^{**}x^2$	0,92	0,17	7,19
	Grãos	$y = 0,071 + 0,074^{**}x - 0,0038^{**}x^2$	0,91	0,43	9,72
B	MSPA	$y = 0,475 + 0,374^{**}x - 0,0247^{**}x^2$	0,94	1,89	7,57
	Grãos	$y = 0,1347 + 0,0413^{**}x$	0,89	0,55	10
Mn	MSPA	$y = 2,304 + 1,616^{**}x - 0,1135^{**}x^2$	0,93	8,05	7,12
	Grãos	$y = 0,281 + 0,249^{**}x - 0,0142^{**}x^2$	0,90	1,37	8,77
Fe	MSPA	$y = 1,015 + 1,037^{**}x - 0,0728^{**}x^2$	0,93	4,71	7,12
	Grãos	$y = 0,077 + 0,064^{**}x - 0,0035^{**}x^2$	0,90	0,37	9,09

Fonte: Da autora, 2016.

Notas: BFS – Biochar de filtro de restos de silagem de sorgo; **: Significativo a 1%.

5 CONCLUSÃO

- 1) Os valores de pH e os teores de carbono orgânico, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, manganês, cobre e zinco do solo aumentaram com aplicação de doses crescentes dos biocarvões produzidos a partir de materiais filtrantes descartados.
- 2) Os biocarvões promoveram o maior desenvolvimento da planta com aumento nos valores de MSR, MSPA, NV, NG e MSG.
- 3) O aumento das concentrações de nutrientes e a redução da acidez do solo, promovidos pelos biocarvões, teve reflexo na maior concentração e acúmulo de nutriente no feijoeiro.
- 4) Para o cultivo do feijoeiro, o nível de 2,5% dos biocarvões mostra-se suficiente para obtenção de características agronômicas satisfatórias. No entanto, no que se refere à fertilidade do solo, a aplicação de doses superiores reflete em um maior efeito residual para os cultivos seguintes.
- 5) A produção de biocarvão representa uma alternativa viável para a destinação ambientalmente correta dos materiais filtrantes.

REFERÊNCIAS

ABDELHAFEZ, A. A.; LI, J.; ABBAS, M. H. H. Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. **Chemosphere**, v.117, p.66-71, 2014.

ABREU, A. F. B., RAMALHO, M. A. P. **Cultivo do Feijão Irrigado na Região Noroeste de Minas Gerais, 2005**. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoIrrigadoNoroesteMG/cultivares.htm>>. Acesso em: 01 de fev. 2016.

ABREU, C. A., LOPES, A. S., SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., BARROS, N. F. FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 645-736.

AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A.U.; LIM, J.E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN,D.; VITHANAGE, M.; LEE, S.S. OK, Y.S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, v.99, p.19-33, 2014.

ALBURQUERQUE, J. A., CALERO, J. M., BARRÓN, V., TORRENT, J., CAMPILLO, M. C., GALLARDO, A., VILLAR, R. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, p. 16-25, 2014.

ALBURQUERQUE, J. A., SALAZAR, P., BARRÓN, V., TORRENT, J., del CAMPILLO, M. C., GALLARDO, A., VILLAR, R. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. **Agron. Sustain.**, v. 33, 475-484, 2013.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 175-185, 1995.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Produção de Matéria seca e absorção de nutrientes por leguminosas, em resposta a compactação do solo. **Revista Ceres**, v. 44, p. 421-431, 1997.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999, p. 25-32.

ANDRADE, A. T.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Organic residue, limestone gypsum and phosphorus adsorption by lowland soils. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 349-355, 2002.

ARF, O. Efeitos na cultura do trigo da rotação com milho e adubos verdes, na presença e na ausência de adubação nitrogenada. **Bragantia**, v. 58, n. 2, p. 323-334, 1999.

ARF, O. Importância da adubação na qualidade do feijão. In: SÁ, M. E. de; BUZZETI, S. **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994, p. 233-255.

BEESELEY, L.; MARMIROLI, M. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. **Environmental Pollution**, v.159, p.474-480, 2011.

BIRD, M. I., MOYO, C., VEENENDAAL, E. M., LLOYD, J., FROST, P. Stability of elemental carbon in savanna soil. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 13, n. 4, p. 923-932, 1999.

BRANDÃO, V. S, MATOS, A.T, FONTES, M. P. F., MARTINEZ, M. A. Retenção de poluentes em filtros orgânicos operando com águas residuárias da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n. 2, p. 329-334, 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 02 de 05 de ago. de 2004. Definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos corretivos de acidez, corretivos de alcalinidade, corretivos de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 05 ago. 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 03, de 26 de janeiro de 2015. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 27 jan. 2015.

BENÍCIO, L. P. F., OLIVEIRA, V. A., REIS, A. F. DE B., CHAGAS JR, A. F., LIMA, S. DE O. Efeitos de diferentes biofertilizantes e modos de aplicação na nodulação do feijão caupi. **Revista Tropic: Ciências Agrárias e Biológicas**. v. 6, n. 3, p. 111-119, 2012.

BROWN, R. Biochar production technology. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds). **Biochar for environmental management: Science and Technology**. London: Earthscan, 2009, p. 127-148.

BRIDGWATER, A.V. Towards the “bio-refinery” fast pyrolysis of biomass. **Renewable Energy World**, v. 4, p. 66-83, 2001.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., BARROS, N. F. FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G.; UCHIMIYA, M.; NOVAK, J. M.; RO, K. S. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 419-428, 2012.

CHAN, K. Y., VAN ZWIETEN, L., MESZAROS, I., DOWNIE, A., JOSEPH, S. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, p. 629-634, 2007.

CHAN, K. Y.; XU, K. Biochar: nutriente properties and their enhancement. In LEHMANN, J.; JOSEPH, S (Ed.). **Biochar for environmental management: science and technology**. London: Earthscan, 2009, p. 13-323.

CHENG C-H., LEHMANN J., ENGELHARD M.H. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 72, p. 1598-1610, 2008.

CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. Unicamp, 2008. 736p.

COSTA, L. V.C. **Produção de biogás utilizando cama de frango diluída em água e em biofertilizante de dejetos de suínos**. 2012. 90 p. Tese (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, 2012.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997, 212 p.

EMBRAPA . Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento exploratório: Reconhecimento de solos do Norte de Minas Gerais: Área de atuação da SUDENE**. Recife: Embrapa SNLCS, 1979. 407p. Boletim Técnico, 60; SUDENE – DRN. Série Recursos de Solos, 12).

FARIAS. L. N. **Feijão guandu adubado com fosfato natural e utilizado como adubo verde para o cultivo de milho em latossolo de cerrado**. 2012. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Mato Grosso – Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas. Rondonópolis, 2012.

FEBRER, M. C. A. **Aproveitamento agrícola de material orgânico utilizado como filtro no tratamento de águas residuárias da suinocultura**. 2000. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2000.

FELLET, G.; MARMIROLI, M.; MARCHIOL, L. Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. **Science of the Total Environment**, v. 468, p. 598-608, 2014.

FERNANDES, A. L. T.; TESTEZLAF, R. Fertirrigação na cultura do melão em ambiente protegido, utilizando-se fertilizantes organominerais e químicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n.1, p. 45-50, 2002.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The ‘Terra Preta’ phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, p. 37-41, 2001.

GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal e a review. **BioFertil Soils**, v. 35, p. 219-230, 2002.

GROSS, A., ARUSI, R., FINE, P., NEJIDAT, A. Assessment of extraction methods with fowl manure for the production of liquid organic fertilizers, **Bioresource Technology**, v. 99, p. 327-334, 2008.

HAMMER, E. C.; BALOGH-BRUNSTAD, Z.; JAKOBSEN, I.; OLSSON, P. A.; STIPP, S. L. S.; RILLIG, M. C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 77, p. 252-260, 2014.

HOSSAIN, M. K., STREZOV, V., CHAN, K. Y., NELSON, P. F. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). **Chemosphere**, v. 78, p. 1167-1171, 2010.

HOUBEN, D., EVRARD, L., SONNET, P. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). **Biomass and bioenergy**, v. 57, p. 196-204, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: Confronto das Safras de 2014 e 2015: novembro, 2015. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 de jan. 2016.

JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VAN DER VELDE, M.; BASTOS, A. C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 144, p. 175-187, 2011.

KNICKER, H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. **Biogeochem**, v. 85, n.1, p. 91-118, 2007.

KOOKANA, R.S., SARMAH, A.K., ZWIETEN, L., VAN KRULL, E., SINGH, B. Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 112, p. 103-143, 2011.

LEHMANN, J. SILVA JUNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343-357, 2003.

Lo MONACO, P.A.V.; MATOS, A.T. JUNIOR, V.E.; SARMENTO, A.P.; MOREIRA, R.M.G. Desempenho de filtros constituídos por pergaminho de grãos de café (*Coffea* sp.) no tratamento de águas residuárias. **Coffee Science**, Lavras, v.6, n.2, p.120-127, 2011.

Lo MONACO, P.A. **Influência da granulometria do material orgânico filtrante na eficiência de tratamento de águas residuárias**. 2001. 115 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

MADARI, B. E., COSTA, A. R., CASTRO, L. M., SANTOS, J. L. S., BENITES, V. M., ROCHA, A. O., MACHADO, P. L. O. A. **Carvão vegetal como condicionador do solo para arroz de terras altas (cultivar Primavera): um estudo prospectivo**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 2006. 6 p. (Comunicado técnico, 125).

MAGALHÃES, M. A. **Parâmetros para projeto e operação de filtros orgânicos utilizados no tratamento de águas residuárias de suinocultura**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

MAGALHÃES, M. A., MATOS, A. T., DENÍCULI, W., TINOCO, I. F. F. Operação de filtros orgânicos utilizados no tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, n.2, p. 472-478, 2006a.

MAGALHÃES, M. A., MATOS, A. T., DENÍCULI, W., TINOCO, I. F. F. Compostagem de bagaço de cana-de-açúcar triturado utilizado como material filtrante de águas residuárias da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, n.2, p.466-471, 2006b.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARROCOS, S. DE T. P. **Composição de biofertilizante e sua utilização via fertirrigação em meloeiro**. 2011. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2011.

MCCARL, B. A.; PEACOCKE, C.; CHRISMAN, R.; KUNG, C.; SANDS, R. D. Economics of biochar production, utilization and gas offsets In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds). **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. London: Earthscan, 2009. p. 341-356.

MEDEIROS, M.B.; LOPES, J.S. Biofertilizantes líquidos e sustentabilidade agrícola. **Bahia Agrícola**, v. 7, n. 3, 2006.

MEDEIROS, R. F.; CAVALCANTE, L. F.; RODRIGUES, R. M.; MESQUITA, F. O.; BRUNO, R. L. A.; FERREIRA NETO, M. Uso de biofertilizantes e águas salinas em plantas de *Lycopersicon pimpinellifolium* L. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 1, p. 156-162, 2013.

NOVOTNY, E. H. **Properties of pyrolysis residues produced and utility as Biochars**. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/942896/1/15embrapa_propertiesofpyrolysisresiduesandtheirutilityasbiochars.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2015.

NOVAK, J. M.; CANTRELL, K. B.; WATTS, D. W.; BUSSCHER, W. J.; JOHNSON, M. G. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 330-343, 2014.

OLMO, M., VILLAR, R., SALAZAR, P., ALBURQUERQUE, J. A. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. **Plant Soil**, v. 399, p. 333-343, 2016.

PENG, X., Y.E, L.L., WANG, C.H., ZHOU, H., SUN, B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. **Soil & Tillage Research**, v. 112, p. 159-166, 2011.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; CARNEIRO, M. A. C.; MARIMON JUNIOR, B. H.; CARVALHO, M. T. M.; PACHECO, L. P. Soil fertility and agronomic response of rice to biochar application in the Brazilian savannah. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 5, p. 699-706, 2012.

PRATT, K., MORAN, D. Evaluating the cost-effectiveness of global biochar mitigation potential. **Biomass and bioenergy**, v. 34, p. 1149 -1158, 2010.

POVINELLI, J. e MARTINS, F. Pesquisa sobre a eficiência de filtros lentos em unidades piloto. In: 7o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, Salvador, 1973, **Anais ...**, Salvador: Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Carlos, USP, 1973. 20 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, A.J.; CANTARELLA, H.; ABREU, C.A. Interpretação de análise de solo. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, A.J.; FURLANI, A.M.C. (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1996. p. 8-13. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RODOLFO JÚNIOR, F.; CAVALCANTE, L. F.; BURITI, E. S. Crescimento e produção do maracujazeiro-amarelo em solo com biofertilizantes e adubação mineral com NPK. **Revista Caatinga**, v. 21, p.134-145, 2008.

RONDON, M. A.; LEHMANN, J.; RAMIREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, p. 699-780, 2007.

SILVA, I. C. B. **Filtros de areia e filtros orgânicos aplicados à remoção de poluentes de esgoto**. 2013. 44 f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2013.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, R.; BOL, A. Review of biochar and its use and function in soil. In: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in Agronomy**. Burlington: Academic Press, 2010, p. 47-82.

SOUSA, A. A. T. C. **Biochar de lodo de esgoto: efeitos no solo e na planta no cultivo de rabanete**. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., BARROS, N. F. FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 204-274.

SPOKAS, K. A.; KOSKINEN, W. C.; BAKER, J. M.; REICOSKY, D. C. Impacts of wood chip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. **Chemosphere**, v. 77, p. 574-58, 2009.

STEENARI, B-M., KARLSSON, L.G., LINDQVIST, O. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. **Biomass and Bioenergy**, v. 16, p. 119-136, 1999.

TONG, H.; HU, M.; LI, F.B.; LIU, C.S.; CHEN, M.J. Biochar enhances the microbial and chemical transformation of pentachlorophenol in paddy soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.70, p.142-150, 2014.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. Fósforo. In: TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M: **Solos e fertilidade do solo**. 6 ed. 2007, p. 342-371.

UZOMA, K. C., INOUE, M., ANDRY, H., FUJIMAKI, H., ZAHOOR, A., NISHIHARA, E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil Use and Management**, v.27, p. 205-212, 2011.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, p. 235-246, 2010.

VERHEIJEN, F. G. A.; JEFFERY, S.; BASTOS, A. C.; VAN DER VELDE, M.; DIAFAS, I. **Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions**. Luxembourg: EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, 2009, 149p.

WANG X., CHEN Y., SUI P., GAO W., QIN F., WU X., XIONG J. Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: an emergy evaluation based on LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 234-245, 2014.

YUAN, J.H., XU, R.K. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China. **Soil Research**, v. 50, p. 570-78, 2012.

Silva, Isley Cristielllem Bicalho.

S586a 2016 Atributos do solo e características agronômicas do feijoeiro adubado com biochar / Isley Cristielllem Bicalho da Silva. Montes Claros, MG: Instituto de Ciências Agrárias/UFMG, 2016.
62 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

Orientador: Prof. Luiz Arnaldo Fernandes.

Banca examinadora: Enilson de Barros Silva, Regynaldo Arruda Sampaio, Luiz Arnaldo Fernandes.

Referências: f: 54-62.

1. Biochar – Filtros orgânicos. 2. Adubação - Feijão. I. Fernandes, Luiz Arnaldo. II. Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais. III. Título.

CDU: 631.4