

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Luis Fernando Vieira da Silva

**Biocarvão da palha do fruto do cafeeiro na remediação do solo e na
complementação de substratos**

**Monte Carmelo – MG
2018**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Luis Fernando Vieira da Silva

**Biocarvão da palha do fruto do cafeeiro na remediação do solo e na
complementação de substratos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Agronomia,
Campus Monte Carmelo, da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Edmar Isaias de
Melo

**Monte Carmelo – MG
2018**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Luis Fernando Vieira da Silva

**Biocarvão da palha do fruto do cafeeiro na remediação do solo e na
complementação de substratos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Agronomia,
Campus Monte Carmelo, da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do
grau de Engenheiro Agrônomo.

Monte Carmelo, 29 de Junho de 2018.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Edmar Isaías de Melo
Orientador

Profa. Dra. Cinara Xavier de Almeida
Membro da Banca

Prof. Dr. Jair Rocha do Prado
Membro da Banca

**Monte Carmelo – MG
2018**

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Agradeço aos meus pais, Luismar da Silva e Ana Lúcia Vieira da Silva, que sempre foi minha maior fonte de inspiração e força.

Meus agradecimentos aos meus irmãos, sobrinha, tios e avós, que de alguma forma também contribuíram para que o sonho da faculdade se tornasse realidade.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, por me proporcionar um ambiente criativo e amigável para os estudos. Sou grato à cada membro do corpo docente, à direção e a administração dessa instituição de ensino.

Agradeço o meu orientador Prof. Dr. Edmar Isaías de Melo, que teve paciência e que me ajudou bastante a concluir este trabalho.

Aos membros da banca avaliadora, pela disponibilidade em estar presente e sugerirem melhorias ao trabalho.

Meus agradecimentos aos meus amigos, Camila Isabel, Layane Carolina, Pablo Arthur, João Carlos, Gustavo de Paula e Pedro Joel, companheiros de trabalhos que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

A todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização do presente trabalho.

RESUMO

A atrazina em sido um dos herbicidas que têm causado impactos ambientais, seja pelo efeito residual no solo ou pela contaminação da água. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de biorremediação do biocarvão produzido a partir do resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro e sua aplicação como condicionador de substrato para produção de mudas. O biocarvão foi produzido pelo processo de pirólise, utilizando como fonte de biomassa o resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro. O biocarvão e o material *in natura*, foram caracterizados por espectrometria da região do Infravermelho e microscopia eletrônica de varredura e pH do ponto de carga zero. Ensaio de adsorção utilizando azul de metileno e estudos cinéticos e termodinâmicos para o processo de adsorção dessa molécula modelo tendo como material adsorvente o biocarvão foram realizados. O potencial de sorção do biocarvão por herbicida atrazina, foi avaliado por meio de bioensaio utilizando como planta bioindicadora o pepino (*Cucumis sativus* L.). A viabilidade de utilização do biocarvão como condicionador de substrato, para produção de mudas de alface, foi avaliado a partir da mistura de substrato comercial e biocarvão. O biocarvão ($\text{pH}_{\text{pcz}} = 7,17$) adicionado ao solo ($\text{pH} = 6,50$) influenciará na CTA e CTC melhorando a absorção de nutrientes. Os espectros de infravermelho do biocarvão mostraram a presença de grupos funcionais remanescentes do material *in natura*, e a morfologia avaliada por MEV mostrou uma superfície descontínua. Os ensaios de adsorção com azul de metileno, permitiram verificar que o biocarvão apresenta uma capacidade adsorptiva (q_e) que independe da granulometria com adsorção otimizada para o tempo de contato de 15 min, pH acima 4,00 e q_{max} de $61,3 \text{ mg g}^{-1}$. Os resultados do bioensaio, mostraram que 1,8 % m/m de biocarvão, apresentam os maiores valores de relação de sorção (1,370; 2,164). A adição de biocarvão, ao substrato comercial, na concentração de 10% em massa, apresentou viabilidade para ser utilizado como condicionador para produção de mudas de alface. Os resultados permitiram verificar que o biocarvão possui potencial para remediação de solos contaminados por herbicida atrazina, além de contribuir para o desenvolvimento de plantas.

Palavras-chave: Resíduo lignocelulósico; pirólise; sorção de herbicida.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
2.1 Produção de biocarvão	9
2.2 Caracterização do resíduo e biocarvão	9
2.2.1 Ponto de Carga Zero	10
2.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	10
2.2.3 Espectroscopia na região do infravermelho.....	10
2.3 Ensaio de adsorção do biocarvão utilizando composto modelo.....	11
2.3.1 Quantificação do azul de metileno.....	12
2.3.2 Efeito da granulometria na capacidade de adsorção.....	12
2.3.3 Efeito do pH.....	13
2.3.4 Estudo cinético	13
2.3.5 Estudo termodinâmico	13
2.4 Avaliação do potencial de sorção do biocarvão por herbicida	14
2.5 Biocarvão como condicionador de substrato	16
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1 Caracterização do resíduo e biocarvão	17
3.2 Avaliação do potencial de adsorção do biocarvão para composto modelo.....	22
3.3 Avaliação do potencial de sorção do biocarvão pela atrazina	25
3.3.1 Efeito da atrazina e do biocarvão na CE, pH e Atividade Microbiana....	31
3.4 Biocarvão como condicionador de substrato	32
4 CONCLUSÃO	35
5 REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como um país com grande potencial para o aproveitamento de biomassa no processo de conversão termoquímica, destacando-se a madeira e resíduos florestais, os resíduos pecuários e os resíduos agrícolas, como os resíduos da cafeicultura (WELFLE, 2017; HOFFMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2012). O Brasil é o maior produtor mundial de café, com uma safra de 44.970 milhões de sacas em 2017, sendo Minas Gerais responsável por mais de 54% da produção do país (CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2017).

O termo *biocarvão* ou *biochar* (do grego *bios*= vida e do inglês *char*= carvão) foi proposto a partir dos estudos da matéria orgânica das Terras Pretas de Índios (NOVOTNY et al., 2015). O biocarvão é utilizado para definir o produto sólido obtido a partir da pirólise de materiais lignocelulósicos com o objetivo de concentrar carbono numa forma mais resistente à degradação, quando comparado com materiais *in natura*, visando obter estoque de carbono no solo e benefícios agrícolas e florestais (ALHO, 2012).

A pirólise é o processo que apresenta maior potencial de aplicação em conversão termoquímica da biomassa (EDUARDO et al., 2016). Após o processo de pirólise podem ser obtidos produtos gasosos, líquidos e sólidos, por exemplo, o biocarvão (YIN; GAO; LI, 2018; DEBIAGI et al., 2016). O processo de pirólise de materiais lignocelulósicos, representa um benefício ambiental, pois gera produtos cuja composição em termos das substâncias presentes, na sua maioria é orgânica, é um derivado de recursos renováveis, apresenta características que permite sua utilização em sistemas agrícolas de produção (PANDIT et al., 2018; SANCHEZ-HERNANDEZ, 2018; DING et al., 2017).

Dentre as características do biocarvão, destaca-se sua elevada capacidade de adsorção, sendo, portanto, um material que pode ser aplicado na remediação de efluentes e também do solo contaminados com espécies químicas inorgânicas e orgânicas (KONG et al., 2018; LIU et al., 2017; SAFAEI KHORRAM et al., 2016; AHMED et al., 2016). O biocarvão apresenta características similares ao carvão ativado, em termos de sua capacidade de adsorção. Geralmente apresenta maior capacidade adsorptiva do que a matéria orgânica presente no solo, devido a sua

maior área superficial e maior densidade de carga negativa, podendo adsorver espécies químicas catiônicas, tais como, o íon amônio e uma variedade de íons metálicos, além de adsorver espécies aniônicas, como por exemplo, fosfato e nitrato (ZHENG et al., 2010). Solos contendo biocarvão, apresentam forte afinidade para contaminantes orgânicos, dentre eles os herbicidas (CEDERLUND; BÖRJESSON; STENSTRÖM, 2017; YAVARI et al., 2016; XIAO; PIGNATELLO, 2015).

No Brasil foram comercializados 551 mil toneladas de agroquímicos em 2016, sendo que 322 mil toneladas são de herbicidas, correspondendo a 58,5 % do mercado de agroquímicos, dentre eles os herbicidas mais comercializados, são glifosato, 2,4-D e a atrazina. Dentre esses herbicidas, a atrazina {2-cloro-4(etilamino)-6-(isopropilamino)-s-triazine} é o terceiro princípio ativo dessa classe comercializado no Brasil (IBAMA, 2016).

O herbicida atrazina é formado por três átomos de nitrogênio intercalados com átomos de carbono, o que caracteriza o anel triazínico, além de um átomo de cloro, um grupo amino-etil e um grupo amino-isopropil. A atrazina é um herbicida que não tem aprovação da União Européia, mas tem sua utilização liberada no Brasil, possui ação seletiva, sistêmica, com atividade residual e foliar, apresenta solubilidade em água (35 mg L^{-1}), é volátil e, com base nas suas propriedades físico-químicas, apresenta mobilidade moderada, com possibilidade de lixiviar para as águas subterrâneas. Geralmente não é persistente no solo e sistemas aquáticos (tempo de degradação de 75 dias), no entanto sua degradação gera metabólitos de maior relevância para a contaminação ambiental e a saúde humana (IUPAC, 2018).

A retenção e mobilidade dos herbicidas no solo estão relacionadas aos processos de adsorção e dessorção cuja extensão depende das propriedades do solo (principalmente do teor de matéria orgânica e de argila) e das características químicas dos herbicidas (DI MARSICO et al., 2018). A baixa sorção proporciona que os herbicidas fiquem disponíveis no solo com maior potencial de lixiviação (OUYANG et al., 2016). Com base no grande impacto ambiental desses poluentes e na melhoria da eficiência de controle, é crescente a tendência de adicionar ao solo resíduos que possam promover a sorção ou auxiliar na sua degradação (MARÍN-BENITO et al., 2018).

A adição de biocarvão pode prover o solo de substâncias orgânicas que pelo processo de adsorção, podem promover a mitigação da lixiviação dos herbicidas no solo (JIN et al., 2016; DECHENE et al., 2014). Estudos do comportamento da

atrazina, com a adição de biocarvão são relevantes, no sentido de promover o desenvolvimento de tecnologias de mitigação da contaminação ambiental nas condições de solo e clima do bioma cerrado do município de Monte Carmelo-MG.

Dessa forma, o trabalho objetivou avaliar o potencial de biorremediação do biocarvão produzido a partir do resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro e sua aplicação como condicionador de substrato para a produção de mudas.

O trabalho apresentou como objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar o biocarvão e o resíduo do fruto do cafeeiro quanto à carga superficial líquida (Ponto de Carga Zero), características morfológicas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), presença de grupos funcionais por espectrometria no infravermelho (IV);
- ✓ Avaliar a capacidade máxima adsortiva do biocarvão, tendo como molécula modelo o corante azul de metileno;
- ✓ Avaliar o potencial de sorção do herbicida atrazina em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico do bioma cerrado por técnica de bioensaio;
- ✓ Avaliar a influência do biocarvão, no crescimento de mudas de alface quando adicionado a substratos comerciais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Produção de biocarvão

O biocarvão foi produzido por meio de combustão incompleta pelo processo de pirólise lenta, em forno térmico com dois cilindros adaptado de um modelo utilizado por agricultores tailandeses (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015a). A fonte de biomassa utilizada para a produção de biocarvão, foi o resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro (exocarpo e endocarpo).

2.2 Caracterização do resíduo e biocarvão

2.2.1 Ponto de Carga Zero

A avaliação do ponto de carga zero (pH_{PCZ}) foi realizada em duplicata adicionando 20 mg dos materiais adsorventes sendo a casca e palha do cafeeiro *in natura* (resíduo) e biocarvão (diâmetro médio de partícula menor que 0,25 mm) em 20 mL de solução aquosa de KCl 0,1 mol L⁻¹ em diferentes valores de pH inicial (1,00; 2,00; 3,00; 4,00; 5,00; 6,00; 8,00; 9,00 10,00; 11,00; 12,00), ajustado com soluções de HCl ou NaOH 0,1 mol L⁻¹. Após 24 h de agitação, em temperatura ambiente, as soluções foram filtradas e o pH final da solução foi avaliado (OH et al., 2012).

2.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que envolve a utilização de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro que exploram a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitem o sinal do detector a uma tela catódica obtendo assim uma ampliação de imagens com alta resolução e com aparência tridimensional obtidas por um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Essa técnica permite caracterizar microestruturalmente diferentes tipos de materiais (DA SILVA; MADURRO; MADURRO, 2017; HONORATO CASTRO et al., 2014). As microfotografias da estrutura física das amostras foram obtidas em MEV (Tescan, modelo Vega 3) e o preparo da amostra foi realizado com Metalizadora (Quorum, QT150R), ambos equipamentos, pertencentes ao Laboratório Multiusuário do Instituto de Química-LAMIQ.

2.2.3 Espectroscopia na região do infravermelho

O espectro na região do infravermelho médio do resíduo e do biocarvão (diâmetro médio de partícula menor que 0,25 mm), foi obtido empregando um espectrofotômetro de infravermelho por transformada Fourier, Marca Shimadzu, Modelo FTIR Prestige-21(Laboratório Multiusuário do Instituto de Química-LAMIQ).

As amostras foram prensadas (pressão 20 kN) na forma de pastilha de KBr na proporção de 100:1 (m/m) KBr/amostra. A análise foi realizada na faixa de números de onda entre 4000 e 500 cm^{-1} , com resolução de 2 cm^{-1} e 32 varreduras por amostra.

2.3 Ensaios de adsorção do biocarvão utilizando composto modelo

Ensaios de adsorção foram realizados utilizando o corante azul de metileno (adsorvato) e o biocarvão (material adsorvente) sob agitação à temperatura ambiente. A separação do adsorvente foi realizada por filtração utilizando como material filtrante, fibra de poliéster. O azul de metileno, no filtrado, foi quantificado por espectrometria de absorção molecular no ultravioleta-visível (UV-Vis) a 665 nm (Figura 1).



Figura 1. Procedimento para ensaios de adsorção. Fonte: LUIS FERNANDO.

A quantidade de azul de metileno adsorvida por grama de adsorvente (biocarvão) no equilíbrio (capacidade adsortiva q_e) foi calculada utilizando a Equação (1) abaixo:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V_L}{m_{ads}} \quad \text{Equação (1)}$$

onde q_e é capacidade adsortiva, dada em mg de adsorvato g^{-1} de adsorvente; C_0 é concentração inicial de corante (mg L^{-1}); C_e é concentração de corante no equilíbrio (mg L^{-1}); V_L = volume da solução (L) e m_{ads} é massa de adsorvente (g).

2.3.1 Quantificação do azul de metileno

Espectros de absorção molecular UV-Vis da solução de azul de metileno na concentração de $6,0 \text{ mg L}^{-1}$ foram obtidos em espectrômetro de absorção molecular UV-Vis HACH DR/4000 UV-VIS, na faixa de 300 a 800 nm, com uma cubeta de caminho ótico de 1 cm. A curva de calibração foi construída a partir de solução estoque de azul de metileno a 100 mg L^{-1} , nas concentrações de 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0; e 10 mg L^{-1} , com pH igual a 8,00. A absorção de luz das soluções padrões foram determinadas a 665 nm em cubeta de quartzo com caminho óptico de 1 cm utilizando como branco água deionizada.

2.3.2 Efeito da granulometria na capacidade de adsorção

O método utilizado para separação granulométrica foi peneiramento, que consistiu na passagem do material sólido por uma série de peneiras padrões (ABNT), em ordem crescente de malha. Foram utilizadas as peneiras da série TYLER de malhas 10, 20, 35 e 60 mesh (com aberturas de 2,0 mm; 0,84 mm; 0,50 mm; 0,25 mm, respectivamente) dispostas em forma de uma pilha nessa ordem de modo que cada uma das peneiras inferiores tenha abertura menor que as superiores. O recipiente colocado no fundo da pilha de peneiras consiste no coletor de finos, sem perfurações. O biocarvão obtido pelo processo de pirólise foi colocado na peneira superior. O conjunto de peneiras, foi agitados por 20 minutos em agitador de peneiras eletromagnético (BERTEL), para peneiras circulares. Após a separação granulométrica, as frações foram catalogadas e acondicionadas em recipientes plásticos, dentro de um dessecador, para posterior utilização.

Ensaio de adsorção foram realizados em triplicata, para o biocarvão em diferentes granulometrias, utilizando $20,0 \text{ mg}$ de material adsorvente em contato com uma solução de $25,0 \text{ mL}$ de azul e metileno ($6,0 \text{ mg L}^{-1}$), sob agitação durante 20 minutos, conforme procedimento ilustrado na Figura 1.

2.3.3 Efeito do pH

Ensaio de adsorção com o material adsorvente (biocarvão com diâmetro médio de partícula menor que 1,42 mm) e valores de pH inicial da solução de azul de metileno iguais a 2,00; 4,00; 6,00; 8,00; 10,00 e 12,00 foram realizados com 20,0 mg de material adsorvente e 25,0 mL de solução de azul de metileno ($6,0 \text{ mg L}^{-1}$), tempo de agitação 20 minutos. Os valores de pH inicial da solução de azul de metileno foram previamente ajustados com soluções de ácido clorídrico e hidróxido de Sódio a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, em medidor de pH (Modelo HI 2223-01, Marca Hanna).

2.3.4 Estudo cinético

Ensaio de adsorção com 20,0 mg do material adsorvente (biocarvão com diâmetro médio de partícula menor que 1,42 mm) e 25,0 mL de solução de azul de metileno (6 mg L^{-1} ; $\text{pH}_{\text{inicial}} = 7,00$), em diferentes tempos de agitação (5, 15, 20 e 60 minutos).

2.3.5 Estudo termodinâmico

O estudo de equilíbrio foi realizado visando à determinação da capacidade máxima de adsorção do biocarvão. Os ensaios de equilíbrio de adsorção foram realizados a partir de 10 soluções do corante nas concentrações de 3,0; 6,0; 9,0; 12,0; 14,0; 16,0; 18,0; 20,0; 22,0; 24,0 mg L^{-1} , em $\text{pH} = 7,00$. O tempo de agitação foi de 15 min, o volume de solução foi 25,0 mL e a massa de adsorvente foi 20,0 mg. Foram calculados os valores de C_e que é quantidade de soluto na fase aquosa (mg L^{-1}) e q_e quantidade de soluto adsorvido na fase sólida (mg g^{-1}). Os modelos de Langmuir e Freundlich foram utilizados na forma linearizada, de acordo com OLIVEIRA et al., (2017).

2.4 Avaliação do potencial de sorção do biocarvão por herbicida

A avaliação do potencial de sorção do biocarvão pela atrazina foi realizada através da técnica de bioensaio, utilizando o pepino da cultivar Safira (*Cucumis sativus* L.) como planta bioindicadora da presença do herbicida (DOS SANTOS et al., 2013).

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Uberlândia - *Campus* Monte Carmelo (48°43'37"S; 47°31'28"W; altitude de 900 m), de dezembro de 2017 a janeiro de 2018. O delineamento foi inteiramente casualizado, disposto no esquema fatorial 4 x 8, com três repetições. Os tratamentos corresponderam à combinação de biocarvão (0,0; 0,9; 1,8 e 2,7 % m/m) aplicados na superfície do substrato e oito concentrações de atrazina (0; 250; 500; 750; 1000; 1500; 3000 e 4000 g ha⁻¹). Foram semeadas três sementes por vaso, a uma profundidade de 1-2 cm. Após a semeadura os vasos foram irrigados uma vez por dia. Aos 12 dias após o semeio, foi realizado o desbaste e em seguida o biocarvão foi aplicado. A atrazina foi aplicada no décimo quinto dia após o semeio. O substrato utilizado foi o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (SANTOS et al., 2013) coletado na profundidade de 20 a 40 cm.

Aos 21 dias da instalação do experimento, quando as plantas apresentaram as primeiras folhas verdadeiras, foram realizadas as leituras do teor de clorofila com clorofilômetro (SPAD-502). Foram avaliados o comprimento da parte aérea, da base do caule (colete) até o ápice da folha mais velha, massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea.

No solo dos vasos, descartando a porção superior (camada contendo o biocarvão) foi realizada avaliação da condutividade elétrica, pH e da atividade microbiana. Os solos foram peneirados em peneira com malha de 2,0 mm e acondicionados separadamente em sacos plásticos.

A determinação da condutividade elétrica (CE) foi realizada em suspensão de solo disperso em água na proporção 1:2,5, conforme metodologia descrita pela (EMBRAPA, 2011). Para o preparo das dispersões foram medidos 10,0 cm³ de solo e colocados 25,0 mL de água destilada. Homogeneizou-se a dispersão com um bastão de vidro durante 15 s (com intervalo de 10 min por duas vezes). Em seguida, a suspensão foi deixada em repouso por duas horas e após esse tempo foi realizada

a medida da CE no sobrenadante, utilizando condutivímetro da Tecnon, modelo mCA 150. Em seguida a solução foi agitada, e realizado a medida do pH utilizando um medidor de pH da Tecnon, modelo mPa 210.

A determinação da atividade microbiana foi realizada conforme metodologia descrita por Dionísio et al., (2016), pela avaliação da respiração basal do solo (RBS). Inicialmente foi determinada a capacidade de retenção de água (CRA) e posterior correção da umidade para 60,0 % da CRA, com água destilada. A massa referente a 100,00 g de solo úmido, previamente tamizado, em peneira de abertura de 2,00 mm, foi pesada em triplicata, e transferida para um frasco de vidro com tampa hermética. Dentro do frasco de vidro foi colocado um tubo de ensaio contendo 10,0 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ padronizado para capturar o CO₂ produzido e outro tubo de ensaio contendo 10,0 mL de água destilada para manter a umidade do ambiente do frasco. Para cada dez frascos de vidro a serem incubados, foi realizado uma prova em branco, que corresponde a um frasco contendo apenas um tubo de ensaio com 10 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹ padronizado e outro contendo 10,0 mL de água destilada. Os frascos de vidro foram fechados hermeticamente e incubados em estufa a 28 °C por uma semana (168 h). Após o período de incubação, retirou-se dos frascos de vidro os tubos de ensaio contendo NaOH, cuja solução foi transferida para erlenmeyer de 125,0 mL, adicionando 1,0 mL de BaCl₂ (10 %m/V) e duas gotas de fenolftaleína e o excesso de NaOH foi titulado com HCl 0,5 mol L⁻¹.

Foi aplicado o teste F, através da Análise de Variância (ANAVA) aos resultados das variáveis, comprimento da parte aérea, teor de clorofila, massa fresca da parte aérea e massa seca da parte aérea. A comparação entre médias, para os casos que houve diferença estatística, conforme a ANAVA, foi realizada pelo teste de *Tukey*, ao nível de significância de 5 %. Os resultados foram interpretados, a partir da comparação dos substratos tratados com herbicida com os tratamentos em herbicida (dose zero), sendo submetidos à análise estatística, utilizando-se o modelo log-logístico não linear conforme utilizado por Freitas et al., (2014) (Equação 2). O software R (R CORE TEAM., 2016) foi utilizado nas análises estatísticas.

$$Y = C + \frac{D - C}{1 + \frac{(X)^b}{C_{50}}} \quad \text{Equação (2)}$$

onde, C e D correspondem ao nível máximo e mínimo da curva de dose-resposta; b, a declividade da curva em torno do C_{50} ; e C_{50} , à dose resposta referente à redução de 50% do parâmetro avaliado na plântula indicadora.

A partir dos dados obtidos de C_{50} para cada dose de biocarvão, calculou-se a relação desorção (RS) do solo contendo biocarvão em relação à resposta obtida pelo solo sem adição de biocarvão para a espécie indicadora. (Equação 3).

$$RS = \frac{C_{50} \text{ solo com biocarvão} - C_{50} \text{ solo sem biocarvão}}{C_{50} \text{ solo sem biocarvão}} \quad \text{Equação (3)}$$

2.5 Biocarvão como condicionador de substrato

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Uberlândia- *Campus* Monte Carmelo (48°43'37"S; 47°31'28"W; altitude de 900 m), de outubro a novembro de 2016.

A semeadura da cultivar Grandes Lagos (*Lactuca sativa* L.), foi realizada em bandejas de isopor com 200 células, e com três sementes por células. Aos dez dias após a semeadura (DAS), realizou-se o desbaste mantendo-se a planta mais vigorosa por célula. As bandejas foram dispostas na casa de vegetação, sobre suporte de ferro a uma altura de 1,0 m. A irrigação foi realizada por aspersão uma vez ao dia, complementando com irrigações extras sempre que necessário.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com cinco tratamentos e oito repetições, sendo que cada parcela foi constituída de 20 plantas. Os tratamentos corresponderam a cinco substratos, sendo um comercial e quatro formados a partir da mistura de substrato comercial e biocarvão, em diferentes concentrações (% m/m): Bioplant® (PLT), Bioplant® + biocarvão 5% (BC5), Bioplant® + biocarvão 10% (BC 10), Bioplant® + biocarvão 15% (BC 15) e Bioplant® + biocarvão 25% (BC 25).

Foram realizadas contagens diárias, computando-se o número de plântulas normais emergidas a cada dia até que esse permanecesse constante para determinação do índice de velocidade de emergência (IVE) (Equação 4) e no 7º dia

após a semeadura, foi computado a porcentagem de plântulas emergidas (MAGUIRE, 1962).

$$IVE = \frac{E_1}{N_1} + \frac{E_2}{N_2} + \dots + \frac{E_n}{N_n} \quad \text{Equação (4)}$$

sendo: IVE= índice de velocidade de emergência; E_n = número de plântulas emergidas computadas a cada contagem; N_n = número de dias após a semeadura.

A avaliação do desenvolvimento das plântulas foi realizada aos 25 dias após a semeadura (DAS), onde foram avaliadas 20 plântulas por parcela, totalizando 160 plantas por tratamento, conduzidas exclusivamente em bandejas de isopor de 200 células. Avaliou-se o comprimento do sistema radicular (CSR), comprimento da parte aérea (CPA) determinada a partir da base do caule (colete) até o ápice da folha mais velha, massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa fresca do sistema radicular (MFSR). Posteriormente, as mudas foram secas em estufa a 60°C até massa constante, visando à determinação da massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca do sistema radicular (MSSR).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo as médias das variáveis comparadas pelo teste de *Tukey*, ao nível de significância de 5 %, utilizando-se o software estatístico R (R CORE TEAM., 2016).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do resíduo e biocarvão

Neste sentido, o pH_{PCZ} para o resíduo (casca e palha do cafeeiro *in natura*) e biocarvão (diâmetro médio de partícula menor que 0,25 mm) foram avaliados e os resultados estão apresentados na (Figura 2 e 3). O estudo das cargas elétricas, em específico a determinação do pH ponto de carga zero (PCZ) é de fundamental

importância para o entendimento de diversos fenômenos físico-químicos que ocorrem no solo, já que a maioria das reações eletroquímicas que influenciam sua fertilidade e a nutrição de plantas ocorre na superfície dos constituintes das frações orgânica e mineral.

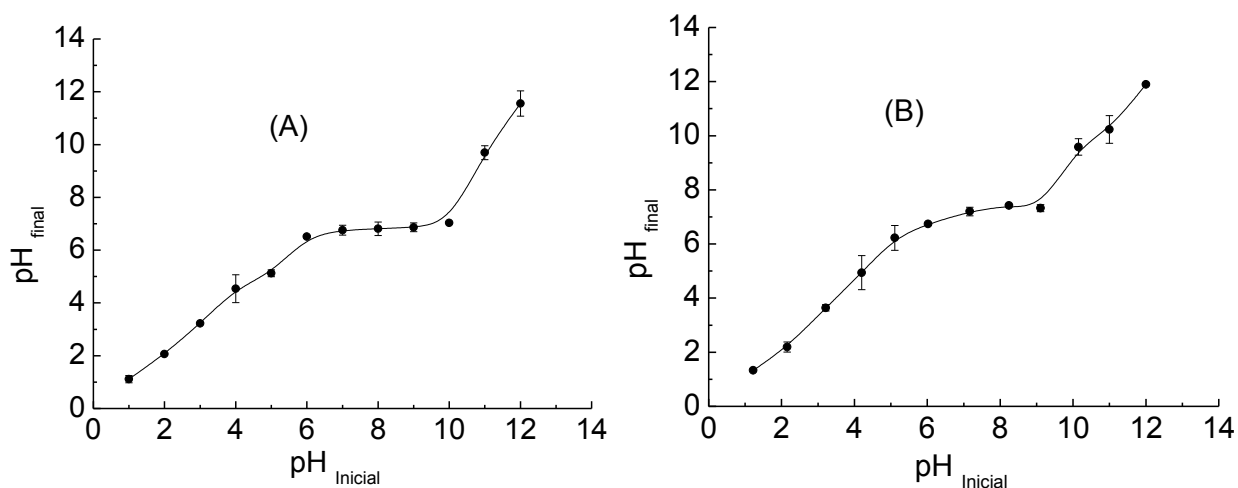


Figura 2. Variação do pH_{final} em função do $pH_{inicial}$. Resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro (A); Biocarvão (B).

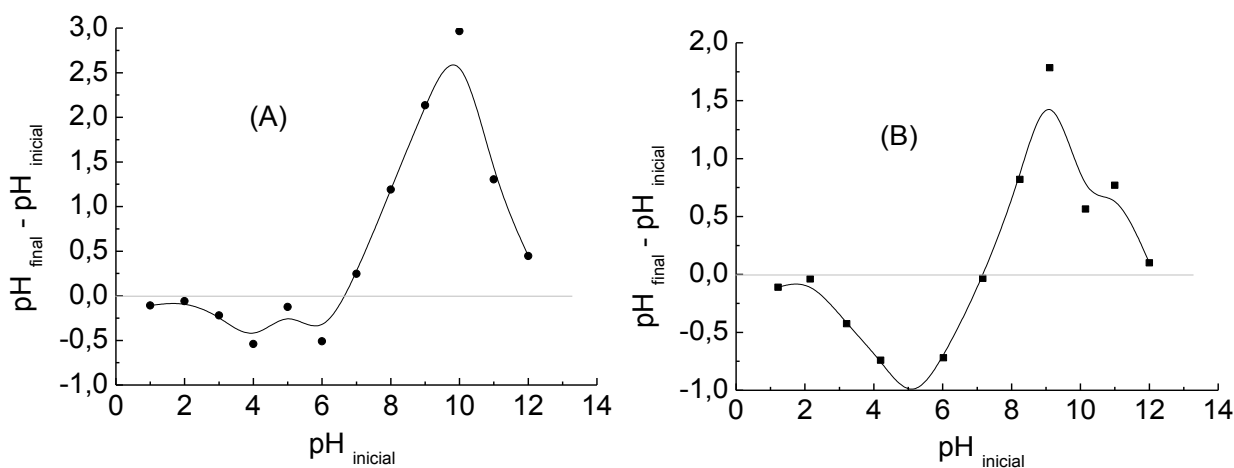


Figura 3. Comportamento dos valores de $pH_{final} - pH_{inicial}$ em função do $pH_{inicial}$ do resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro (A); Biocarvão (B).

O resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro apresentou pH_{PCZ} de 6,64 e o biocarvão produzido a partir desse resíduo agrícola apresentou pH_{PCZ} de 7,17. Os

dois materiais quando colocados em ambientes onde o pH seja menor que o pH do PCZ, o material apresentará na sua superfície, acúmulo de carga positiva, enquanto que se os materiais forem colocados em ambientes, onde o pH seja maior que o pH do PCZ, haverá predominância de carga superficial líquida negativa sobre o material.

Nesse contexto, a aplicação do biocarvão sendo adicionado no solo em doses ainda a serem otimizadas, e tendo como referência que o pH do solo da maioria das culturas deverá ser corrigido para 6,50 verifica-se que se o biocarvão for aplicado ao solo com esse pH, o mesmo contribuirá para a capacidade de troca de ânions (CTA) e de forma indireta para o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, em específico melhorando a absorção de micronutrientes pela planta, pois o substrato (solo e biocarvão) terá predominância de carga superficial positiva, o que não ocorrerá com a palha quando aplicada ao solo, pois a mesma apresenta um pH_{PCZ} muito próximo do pH do solo, influenciando na CTA e CTC do solo.

No sentido de compreender a estrutura molecular dos compostos constituintes do resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro e do biocarvão, foi realizada a aquisição dos espectros vibracionais de infravermelho destes materiais. Na Figura 4 encontra-se indicado os espectros de infravermelho obtidos para o biocarvão e o resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro.

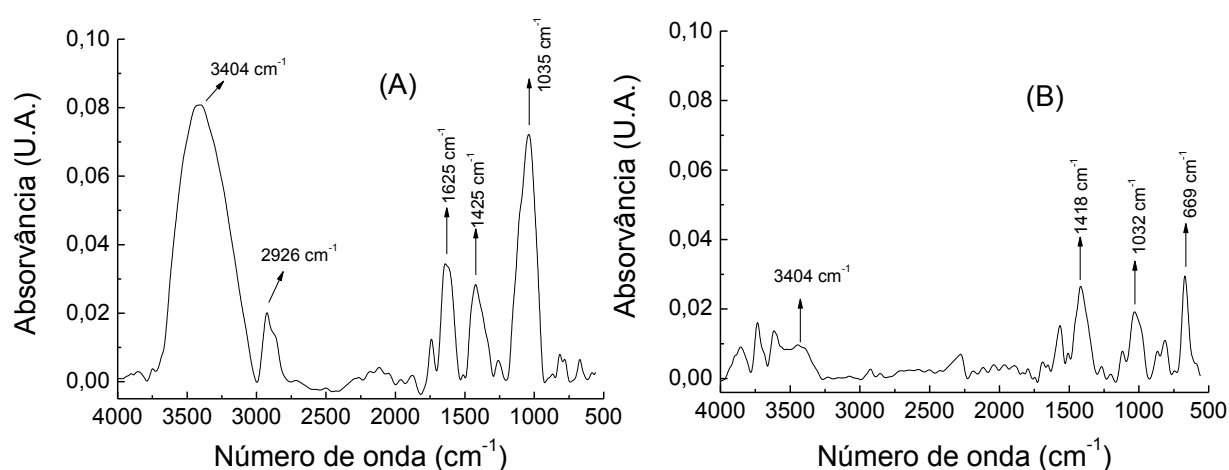


Figura 4. Espectro de infravermelho. Resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro (A); Biocarvão (B).

Nos espectros a banda em 3404 cm^{-1} , pode ser atribuída ao estiramento da hidroxila (OH) presentes no resíduo e não identificada no biocarvão. A não identificação dessa banda no biocarvão pode ser atribuída ao fato da desidratação do resíduo pelo aumento da temperatura, durante o processo de pirólise, bem como pode ser atribuída à decomposição do material lignocelulósicos pelo mesmo processo, principalmente de celulose e hemicelulose que possuem, em suas estruturas, grande quantidade de grupos OH. As bandas em aproximadamente 2926 cm^{-1} , C–H, pode ser atribuídas ao estiramento vibracional simétrico e assimétrico dos grupos —CH_2 presentes na celulose e hemicelulose (CANTRELL et al., 2012).

Conforme descrito por LI; CHEN (2018), a presença da banda em 1625 cm^{-1} pode ser atribuída ao estiramento, C=C, de grupos aromáticos, e o fato da mesma não ser identificada no espectro do biocarvão foi devido a temperatura do processo de pirólise. A presença de 1425 cm^{-1} e 1418 cm^{-1} pode ser atribuída aos estiramentos (C=C) de grupos aromáticos isolados da lignina (ALVES, 2011). A banda em 1035 cm^{-1} e 1032 cm^{-1} , segundo CHELLAPPAN et al., (2018) refere-se a estiramentos de grupos funcionais específicos da celulose e a diminuição da intensidade desta banda é um indício da diminuição de celulose ocasionada pelo processo de pirólise. A banda em 669 cm^{-1} que não é identificada no espectro do resíduo e está presente no espectro do biocarvão, pode ser atribuída a ligações Fe–O, confirmando a presença de ferro na forma de óxido no biocarvão (YANG et al., 2018; MOHAN et al., 2011).

As características morfológicas da superfície do resíduo do fruto do cafeeiro e do biocarvão Figuras 5 e 6, evidenciam diferenças entre a morfologia da superfície desses materiais.

Analisando as imagens da Figura 5 e Figura 6, verifica-se que os materiais possuem morfologia heterogênea, sendo que o resíduo apresenta regiões na sua estrutura que contém poros de diferentes tamanhos (Figura 5 C e Figura 5 D). Avaliando a topografia da superfície dos materiais, verifica-se que o biocarvão apresentou uma superfície mais lisa, mais compactada, no entanto, apresenta-se mais descontínua (ONOREVOLI et al., 2018), o que provavelmente justifica uma maior área superficial e, portanto, maior capacidade adsortiva em relação ao resíduo.

Na Figura 6 B, observa-se a presença de estruturas do material original, como vasos e paredes celulares, formam a porosidade do biocarvão.

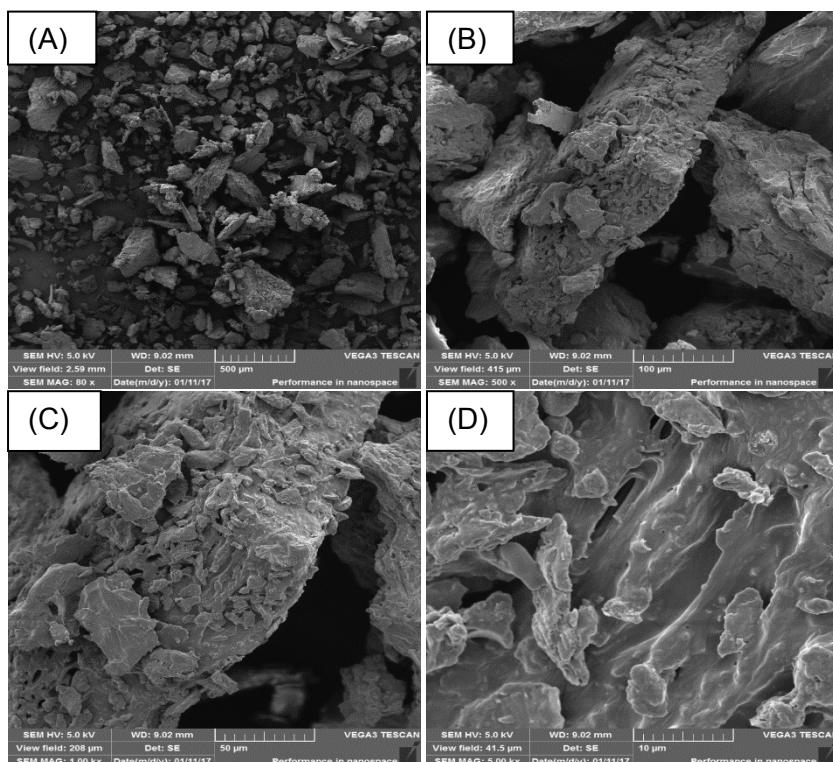


Figura 5. Fotomicrografias eletrônicas de varredura para o resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro. Aumento: 80X (A); 500X (B); 1000X (C) e 5000X(D).

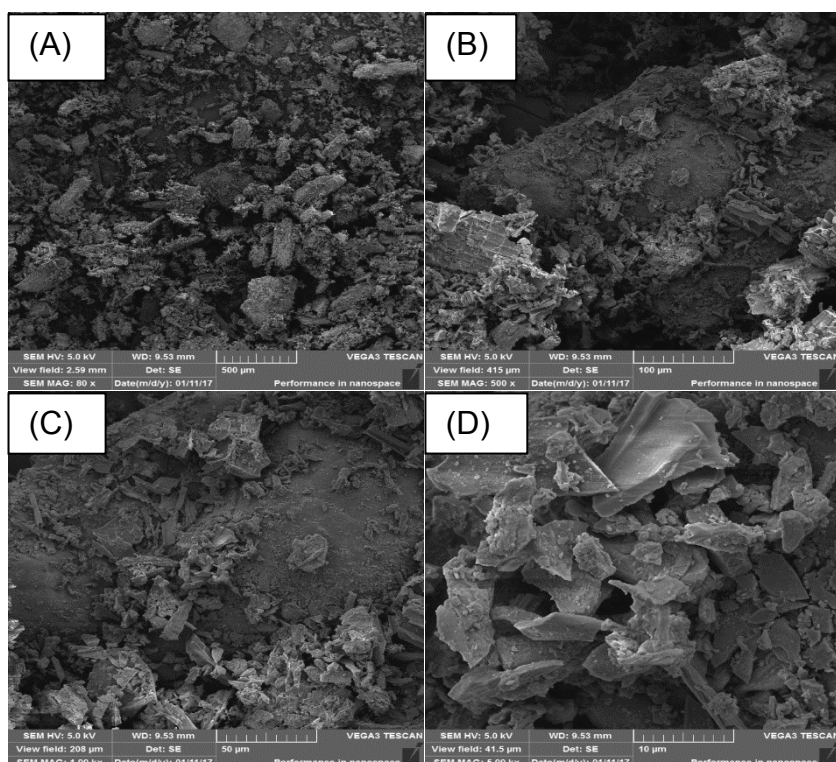


Figura 6. Fotomicrografias eletrônicas de varredura para o biocarvão. Aumento: 80X (A); 500X (B); 1000X (C) e 5000X(D).

A resistência dessas estruturas, em relação processo de pirólise, se deve ao fato de serem na sua maioria formadas por lignina, o que evidencia a decomposição térmica da celulose e hemicelulose (LEE et al., 2013). Além disto, durante a conversão térmica a fase mineral e o esqueleto de carbono formado mantêm rudimentarmente a porosidade e estrutura do material original (KAN; STREZOV; EVANS, 2016).

3.2 Avaliação do potencial de adsorção do biocarvão para composto modelo

Ensaio de adsorção foram realizados utilizando como molécula modelo, o corante de azul de metileno (JÚNIA; LOPES; CUNHA, 2017; OLIVEIRA; SILVA; VIANA, 2013), onde foram otimizados de forma univariada, a granulometria do material adsorvente (Tabela 1) e pH do meio de adsorção (Figura 7).

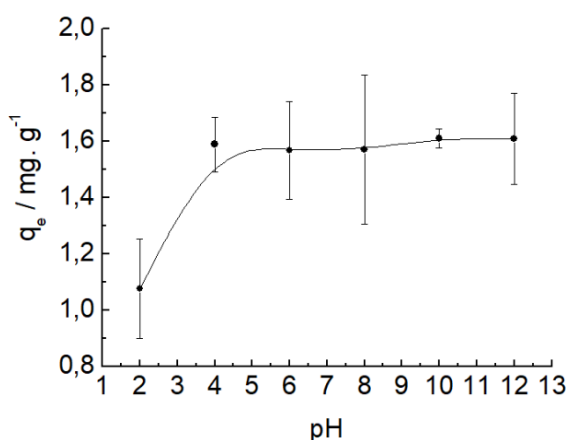


Figura 7. Capacidade adsorptiva em função do pH da solução de azul de metileno

Tabela 1. Quantidade de corante adsorvida (q_e) em função da granulometria do biocarvão

Material	Peneira (Mesh)	D_m (mm)	q_e (mg g ⁻¹)
Biocarvão	+9	>2,00	1,738
	-9 +20	1,425	1,812
	-20 +32	0,670	1,814
	-32 +60	0,375	1,837
	-60	<0,25	1,915

D_m : diâmetro médio de partícula.

Foi aplicado o teste F, através da Análise de Variância (ANAVA) onde não foram verificadas diferenças significativas na capacidade adsortiva (q_e) em função da granulometrias, indicando que a área superficial do material adsorvente não apresenta influência na capacidade de adsorção do biocarvão para o azul de metileno.

A capacidade adsortiva em função do $pH_{inicial}$ (Figura 7), apresenta um comportamento de aumento em função do $pH_{inicial}$, até o valor de aproximadamente 6,00. A partir deste valor de $pH_{inicial}$ a capacidade adsortiva não sofre alteração, permanecendo constante, sendo, portanto, máxima em função do $pH_{inicial}$, indicando que o biocarvão nesta condição de pH apresenta carga superficial líquida predominantemente negativa, o que favoreceu a adsorção máxima do azul de metileno que é um corante catiônico. Resultados similares na adsorção de corante Azul de metileno foram observados por OLIVEIRA (2016) utilizando resíduos agroindustriais.

O efeito do tempo de agitação na adsorção do corante azul de metileno sobre o biocarvão foi avaliado e os resultados estão apresentados na Figura 8.

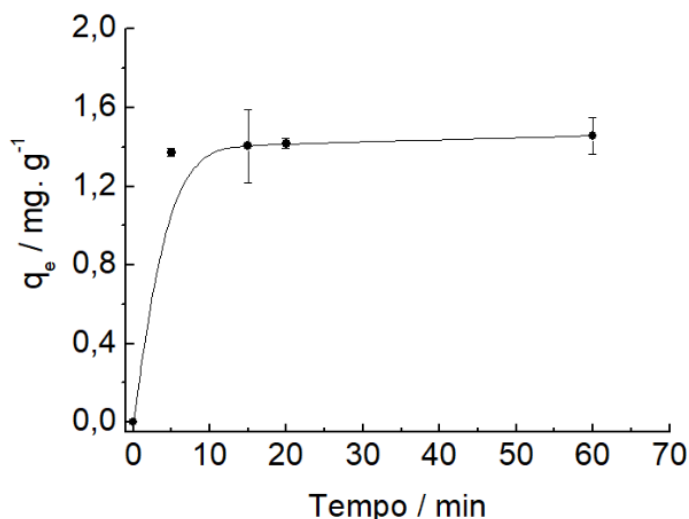


Figura 8. Efeito do tempo de agitação na remoção do corante azul de metileno para o biocarvão.

Observa-se que o estado de equilíbrio da adsorção foi alcançado, pois a quantidade de corante que está sendo adsorvida pelo biocarvão está em equilíbrio dinâmico com a quantidade de corante que está desorvendo (Figura 8). O tempo requerido para atingir este estado de equilíbrio, denominado de tempo de equilíbrio e quantidade de corante adsorvida neste tempo refletem a capacidade adsortiva do azul de metileno pelo biocarvão.

O estudo cinético é importante, pois revela a influência do tempo de contato sobre a quantidade de corante adsorvida pelo material adsorvente. A remoção do corante azul de metileno aumentou com o tempo de agitação até atingir um equilíbrio, sendo a capacidade adsortiva $1,4 \text{ mg g}^{-1}$ para um tempo de equilíbrio de aproximadamente 15 minutos.

O processo de adsorção pode ser avaliado quantitativamente por meio de isotermas de adsorção (Figura 9).

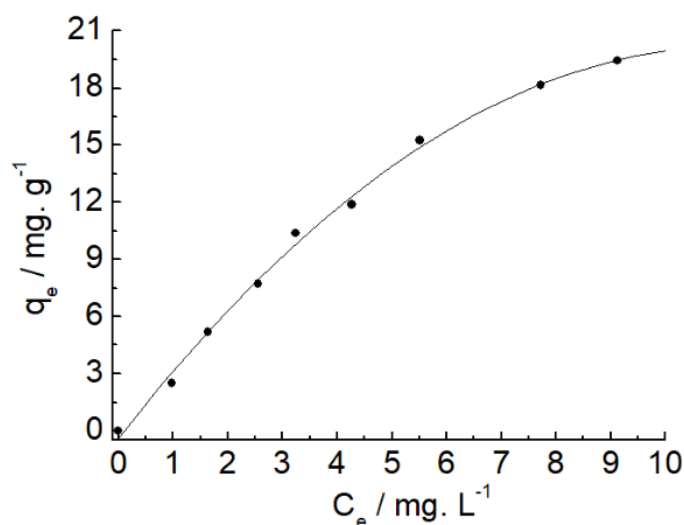


Figura 9. Isoterma de Langmuir de adsorção do biocarvão.

A isoterma de adsorção expressa a relação entre a quantidade do corante azul de metileno que é adsorvido por unidade de massa do biocarvão e a concentração do corante em solução no equilíbrio a uma determinada temperatura constante. A expressão gráfica da isoterma é geralmente uma hipérbole cujo o valor da capacidade máxima de adsorção do biocarvão é obtido pela aproximação do valor da completa saturação do material adsorvido a altas concentrações (WANG; CHEN, 2009). A isoterma apresentada pelo biocarvão é do tipo L-1 (GILES et al.,

1960), indicando que os sítios ativos de adsorção diminuem sua disponibilidade quando a concentração da solução aumenta.

Com os resultados experimentais obtidos (Figura 9) calculou-se os parâmetros das isotermas de acordo com os modelos de Langmuir e Freundlich (Tabela 2), a fim de verificar se a isoterma experimental obtida segue o comportamento de alguns desses modelos, pois apesar de os modelos empíricos não refletirem as questões relacionadas com o mecanismo de adsorção, eles fornecem informações úteis sobre a capacidade de acumulação do material adsorvente.

Tabela 2. Constantes de adsorção segundo os modelos de Langmuir e Freundlich para a remoção do azul de metileno utilizando biocarvão

Langmuir	$q_{\max}$ (mg g ⁻¹)	61,3108
	K_L (L mg ⁻¹)	0,05711
	R_L	0,2673
	r	0,998
Freundlich	N	1,115
	$1/n$	0,89675
	K_F (L mg ⁻¹)	3,098
	r	0,984

Os valores das constantes de adsorção mostram que o modelo de Langmuir se ajustou melhor aos resultados experimentais, o que pode ser observado pelos valores do coeficiente de correlação, r (Tabela 2). A capacidade máxima adsortiva apresentada pelo biocarvão, obtida pelo modelo de Langmuir foi de 61,31 mg g⁻¹, indicando que o biocarvão produzido a partir do resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro apresenta potencial de ser aplicado como material adsorvente na remediação de contaminantes orgânicos, podendo ser aplicado na remediação de solo no sentido de amenizar possíveis contaminações de água.

3.3 Avaliação do potencial de sorção do biocarvão pela atrazina

Aplicando o teste F, através da Análise de Variância (ANAVA) (Tabela 3) foram observadas diferenças significativas para as variáveis avaliadas em função da dose de atrazina (exceto para variável massa seca da parte aérea), dose de biocarvão e para interação entre doses de biocarvão e atrazina. A comparação entre os pares de médias, para os casos em que houve diferença estatística, conforme a ANAVA, foi realizada pelo teste de *Tukey*, ao nível de 5 % de significância, no sentido de verificar quais parâmetros apresentaram diferenças entre os tratamentos (concentração de biocarvão e atrazina), para posteriormente realizar a modelagem não linear para variável resposta que melhor descreva a relação de sorção do biocarvão pela atrazina.

Tabela 3. Valores de quadrado médio da Análise de Variância (ANAVA) das variáveis avaliadas no desenvolvimento de plântulas

FV	GL	Quadrado Médio			
		CL	CP	MFPA	MSPA
DB	3	60,4041ns	5,4869*	0,1353*	0,0004ns
DA	7	943,7614*	15,7683*	1,4891*	0,0208*
DBxDA	21	52,8189*	1,5298*	0,0736*	0,0020*
Resíduo	64	29,6100	0,5102	0,04197	0,0010
Média Geral		20,85	4,0041	1,1302	0,0570
CV (%)		26,10	17,84	18,13	56,99

*Significativo ou ns não significativo a 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F. CL = teor de clorofila; CP= Comprimento da parte aérea (cm); MFPA= massa fresca parte aérea (mg); MSPA= massa seca parte aérea (mg).

A tabelas 4 à 7 apresentam o resultado do teste de *Tukey* para as variáveis avaliadas no desenvolvimento de plântula para os diferentes tratamentos em função das doses de biocarvão e atrazina. Verifica-se que a variável teor de clorofila (Tabela 4) foi a que mais apresentou influência em função da concentração de atrazina aplicada foi influenciada pela concentração de biocarvão aplicada, apenas para a dose de 500 g há⁻¹.

Observando o comportamento para variável comprimento da parte aérea (Tabela 5), em função da concentração do biocarvão aplicado, verifica-se que o biocarvão influenciou no desenvolvimento da plântula, para a concentração superior a 1000 g ha⁻¹ de atrazina. Para a variável massa fresca da parte aérea (Tabela 6)

verifica-se um efeito do biocarvão para as concentração de atrazina 250 e 1000 g há⁻¹.

Tabela 4. Valores médios da variável teor de clorofila em função de doses de biocarvão e atrazina.

Atrazina (g ha ⁻¹)	Biocarvão (%m/m)							
	0,0		0,9		1,8		2,7	
0	35,3	A a	37,9	A a	36,0	A a	32,6	Aa
250	25,0	A ab	24,4	A abc	29,1	A ab	28,7	Aa
500	13,7	C bc	19,7	BC bcd	26,3	ABabc	32,0	Aa
750	26,1	A ab	26,4	A ab	20,1	A bcd	27,1	Aa
1000	13,0	A bc	19,2	A bcd	22,4	A abcd	23,0	Aa
1500	16,5	A bc	21,6	A bcd	14,1	A cd	19,9	A b
3000	13,4	A bc	11,0	A cd	18,1	A bcd	8,8	A bc
4000	5,4	A c	8,3	A d	9,9	A d	2,4	A c

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade para variável atrazina e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5 % de probabilidade para a variável biocarvão.

Tabela 5. Valores médios da variável comprimento da parte aérea em função de doses de biocarvão e atrazina.

Atrazina (g ha ⁻¹)	Biocarvão (%m/m)							
	0,0		0,9		1,8		2,7	
0	5,3	A a	4,5	A ab	5,5	A a	4,5	A a
250	5,2	A a	6,1	A a	4,6	A ab	5,1	A a
500	4,8	A ab	6,0	A a	4,7	A ab	4,4	A a
750	4,7	A ab	4,8	A a	5,0	A ab	3,7	A a
1000	3,1	B bc	4,7	A a	4,3	ABabc	3,7	AB a
1500	2,4	B c	4,5	A ab	3,9	ABabc	3,6	AB a
3000	3,9	A abc	2,0	BC c	3,2	AB bc	1,1	C b
4000	2,8	A c	2,8	A bc	2,7	A c	0,6	B b

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade para variável atrazina e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5 % de probabilidade para a variável biocarvão.

Observando os resultados para a variável massa seca da parte aérea (Tabela 7), verifica-se que influencias da dose de biocarvão nessa variável para as concentrações de atrazina 0,0 e 1500 g há⁻¹. O fato do biocarvão ter apresentado influência, principalmente na ausência de atrazina, indica que esta variável não é interessante para modelar a curva de dose resposta para presença do herbicida

atrazina utilizando como planta bioindicadora o pepino (*Cucumis sativus* L.), sendo indicadas para a modelagem da curva resposta aquelas variáveis que sofreram menos influência do biocarvão, o teor de clorofila e o comprimento da parte aérea.

Tabela 6. Valores médios da variável massa fresca da parte aérea em função de doses de biocarvão e atrazina

Atrazina (g ha ⁻¹)	Biocarvão (%m/m)							
	0,0		0,9		1,8		2,7	
0	1,6	A a	1,6	A a	1,6	A a	1,7	A a
250	1,1	Bab	1,4	ABa	1,4	ABab	1,6	A ab
500	1,2	A ab	1,4	A a	1,2	A abc	1,5	A abc
750	1,1	A ab	1,2	A ab	1,2	A abc	1,3	A abc
1000	0,9	B bc	1,4	A a	1,3	A ab	1,0	AB cd
1500	0,9	A bc	1,3	A a	0,9	A bc	1,1	A bcd
3000	0,8	A bc	0,6	A bc	0,8	A c	0,6	A de
4000	0,5	A c	0,5	A c	0,8	A c	0,4	A e

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade para variável atrazina e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5 % de probabilidade para a variável biocarvão.

Tabela 7. Valores médios da variável massa seca da parte aérea em função de doses de biocarvão e atrazina

Atrazina (g ha ⁻¹)	Biocarvão (%m/m)							
	0,0		0,9		1,8		2,7	
0	0,22	A a	0,11	Ba	0,13	Ba	0,16	ABa
250	0,04	A b	0,04	A abc	0,04	A b	0,08	A ab
500	0,02	A b	0,03	A bc	0,04	A b	0,03	A b
750	0,01	A b	0,06	A abc	0,05	A b	0,07	A b
1000	0,03	A b	0,04	A abc	0,06	A ab	0,04	A b
1500	0,03	B b	0,10	A ab	0,07	ABab	0,05	AB b
3000	0,04	A b	0,01	A c	0,04	A b	0,03	A b
4000	0,04	A b	0,03	A abc	0,07	A ab	0,02	A b

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade para variável atrazina e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5 % de probabilidade para a variável biocarvão.

Fundamentado no comportamento das variáveis de desenvolvimento de plântula em função da concentração de biocarvão para as diferentes concentrações de atrazina, as variáveis teor de clorofila e comprimento da parte aérea, que apresentaram influência mínima do biocarvão e apresentaram maior influência pela adição de atrazina foram utilizadas na construção das curvas de dose resposta da atrazina para as diferentes concentrações de biocarvão (Figura 10 e 11).

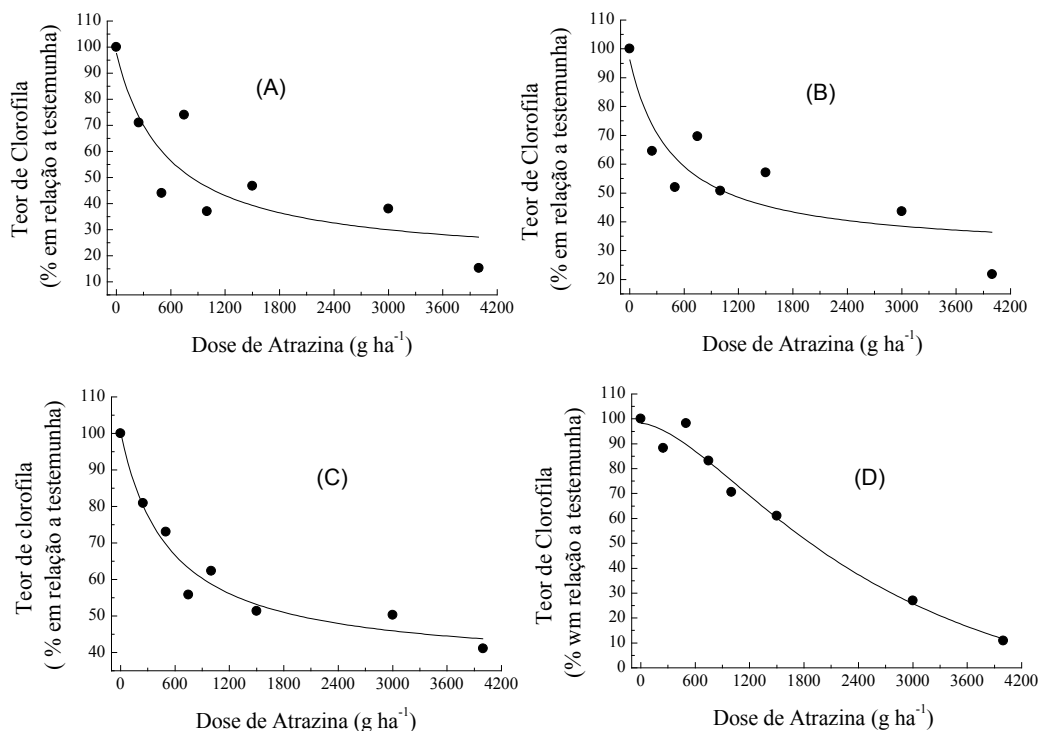


Figura 10. Curvas de dose-resposta do teor de clorofila do pepino (*Cucumis sativus* L.) na presença do herbicida Atrazina. Concentração de biocarbão: 0,0 % (A); 0,9 % (B); 1,8% (C) e 2,7% (D).

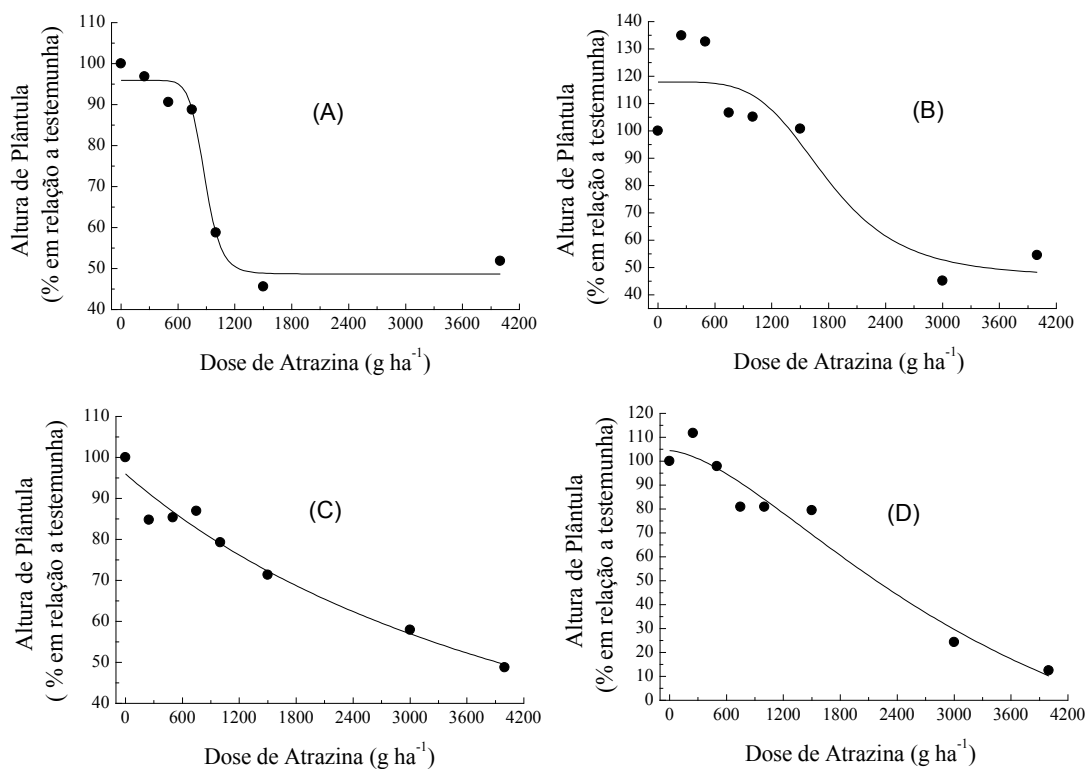


Figura 11. Curvas de dose-resposta da altura de plântula do pepino (*Cucumis sativus* L.) na presença do herbicida Atrazina. Concentração de biocarbão: 0,0 % (A); 0,9 % (B); 1,8 % (C) e 2,7 % (D).

As equações de regressão, o coeficiente de correlação para a função log-logístico não linear (Freitas et al., 2014), os valores de C_{50} (a dose de atrazina referente à redução de 50% do parâmetro avaliado na plântula indicadora) e a relação de sorção (RS) estão apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8. Equações de regressão ajustadas para a variável teor de clorofila

Biocarvão (% m/m)	Equação de regressão	r	C_{50}	RS
0,0	$Y = 17,06 + ((97,79 - 17,06)/1 + (x/570,92)^{1,000})$	0,78	830,2	----
0,9	$Y = 29,13 + ((96,33 - 29,13)/1 + (x/486,75)^{1,000})$	0,78	1082,1	0,303
1,8	$Y = 36,05 + ((100,39 - 36,05)/1 + (x/544,69)^{1,000})$	0,96	1967,3	1,370
2,7	$Y = -31,49 + ((98,26 + 31,49)/1 + (x/2591,93)^{1,611})$	0,98	1871,9	1,255

X= Dose de atrazina (g ha^{-1}), Y= Teor de clorofila (% em relação a testemunha).

Tabela 9. Equações de regressão ajustadas para a variável comprimento da parte aérea

Biocarvão (% m/m)	Equação de regressão	r	C_{50}	RS
0,0	$Y = 48,69 + ((95,91 - 48,69)/1 + (x/882,18)^{10,49})$	0,98	1239,4	----
0,9	$Y = 46,34 + ((117,92 - 46,34)/1 + (x/1790,06)^{4,465})$	0,85	3452,3	1,785
1,8	$Y = -14,07 + ((96,00 + 14,07)/1 + (x/5461,90)^{1,000})$	0,96	3921,7	2,164
2,7	$Y = -67,00 + ((104,40 + 67,00)/1 + (x/3526,79)^{1,59})$	0,96	2178,3	0,758

X= Dose de atrazina (g ha^{-1}), Y= Comprimento da parte aérea (% em relação a testemunha).

Observando os valores da relação de sorção (RS), tanto para a variável teor de clorofila, quanto para a variável comprimento da parte aérea, verifica-se que o biocarvão tem capacidade de adsorver o herbicida atrazina, sendo que a máxima adsorção foi obtida para 1,8 % de biocarvão, onde os valores da RS foram de 1,370 g ha^{-1} e 2,164 g ha^{-1} , para as variáveis, teor de clorofila e comprimento de parte aérea, respectivamente, indicando que o biocarvão apresenta potencial para ser utilizado em áreas com contaminação por herbicida atrazina.

3.3.1 Efeito da atrazina e do biocarvão na CE, pH e Atividade Microbiana

A partir do teste F, realizado pela Análise de Variância (ANAVA) (Tabela 10 e 11), verifica-se que ocorreram diferenças significativas para as variáveis condutividade elétrica (C.E.) em função da concentração de biocarvão e da interação entre as concentrações de biocarvão e atrazina no solo do bioensaio. Para a variável pH e respiração basal do solo (RBS) não foram observadas diferenças significativas pelo teste F, em função da concentração do biocarvão e da atrazina, indicando que a aplicação de biocarvão e atrazina ao solo não promoveram alterações na atividade microbiana e no valor da acidez do solo no período de realização do bioensaio. Tal comportamento, observado para a variável RBS, que avalia a atividade microbiana do solo, está de acordo com o que foi descrito por KLEINSCHMITT et al.(2006).

Tabela 10. Valores de quadrado médio da Análise de Variância (ANAVA) das variáveis avaliadas no solo do bioensaio

FV	GL	Quadrado Médio (QM)	
		CE (mS/cm)	pH
DB	3	2151,96*	0,872ns
DA	7	77,3437ns	0,823ns
DBxDA	21	92,8882*	0,389ns
Resíduo	32	45,3331	0,576
Média Geral		18,06	6,69
CV (%)		37,27	11,33

*significativo; ns não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. CE = condutividade elétrica; pH= potencial hidrogeniônico.

Tabela 11. Valores de quadrado médio da Análise de Variância (ANAVA) para variável respiração basal do solo

FV	GL	Quadrado Médio (QM)	
		RBS (mg C-CO ₂ /kg)	
DB	3	5067,3608 ^{ns}	
DA	7	5943,1580 ^{ns}	
DBxDA	18	5916,8825 ^{ns}	
Resíduo	3	1295,2238	
Média Geral		319,7710	
CV (%)		11,25	

ns não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. RBS= respiração basal do solo.

A comparação entre as médias, para a variável C.E. foi realizada pelo teste de Tukey, ao nível de 5 % de significância e os resultados estão descritos na tabela 12.

Tabela 12. Valores médios de condutividade elétrica (mS/cm) em função de doses de biocarvão e atrazina

Atrazina (g ha ⁻¹)	Biocarvão (%m/m)			
	0,0	0,9	1,8	2,7
0	5,2 B a	9,2 AB a	16,3 ABa	26,2 A b
250	5,4 A a	14,5 A a	19,5 A a	19,6 A b
500	4,0 B a	10,1 AB a	24,1 A a	23,8 A b
750	4,8 B a	9,4 B a	18,7 Ba	57,4 A ab
1000	6,3 Ca	12,3 BCa	34,5 A a	29,1 AB b
1500	6,3 B a	12,1 AB a	22,7 ABa	26,5 A b
3000	6,0 Ca	14,7 BCa	26,0 ABa	34,0 A b
4000	7,3 B a	13,6 B a	20,3 ABa	38,2 A ab

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade para variável atrazina e médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5 % de probabilidade para a variável biocarvão.

A condutividade elétrica do solo depende da concentração de íons solúveis no extrato aquoso, sendo que, quanto maior o valor da condutividade elétrica maior é a concentração de íons. Assim, verifica-se que a presença de biocarvão aumenta a concentração de íons presentes no solo, no entanto, conforme descrito por MEDEIROS; DIAS, (2009) as concentrações observadas no solo do bioensaio são menores do que o valor de condutividade elétrica na qual o pepino é tolerante (3500 mS/cm), não impedindo portanto a utilização do biocarvão para remediação de atrazina no solo.

3.4 Biocarvão como condicionador de substrato

A percentagem de emergência e o índice de velocidade de emergência de plântulas de alface não sofreu influência pela presença do biocarvão nos tratamentos BC 5, BC10, BC 15, sendo comparável ao tratamento com substrato comercial (PLT), em que foram observadas 100% de plântulas emergidas (Tabela 13).

No entanto, para o substrato do tratamento BC 25, ocorreu uma redução significativa na percentagem de plântulas emergidas, onde apenas 4% emergiram,

diferenciando dos demais tratamentos e do tratamento PLT, com substrato comercial, conforme teste de *Tukey* ao nível de significância de 5% (Tabela 13).

Tabela 13. Valores médios do índice de velocidade de emergência e da percentagem de emergência de plântulas de alface

Tratamento	E (%)	IVE (plântulas dia ⁻¹)
PLT	100 a	36,7 a b
BC 5	100 a	37,1 a b
BC 10	100 a	37,5 a b
BC 15	100 a	37,7 b
BC 25	4 b	1,4 c
C.V.%	2,02	5,51

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade. IVE = índice de velocidade de emergência e E = percentagem de emergência.

O elevado conteúdo de sais encontrado no substrato do tratamento BC 25, advindo de uma maior concentração de biocarvão utilizada na mistura, e por consequência maior concentração de sais que permaneceram do material lignocelulósico, resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro, utilizado na produção do biocarvão, pode ter afetado a germinação das sementes de alface (DE ASSIS ET AL., 2011; OLIVEIRA ET AL., 2011).

Um alto teor de sais solúveis pode provocar a queima ou necrose das raízes, sendo resultante de condições inerentes do próprio substrato (Menezes Júnior et al., 2000). No entanto, as concentrações de biocarvão presente nos tratamentos BC 5, BC 10 e BC 15 não apresentaram níveis excessivos de sais, devido ao efeito de diluição provocado pela mistura com o substrato comercial, o que se traduziu em maior rapidez na emergência das plântulas, apresentando IVE, de 37,1 Plântulas dia⁻¹, 37,5 Plântulas dia⁻¹ e 37,7 Plântulas dia⁻¹, respectivamente, não apresentando diferença em relação ao tratamento com substrato comercial (PLT). O efeito do teor de sais foi mais pronunciado no substrato do tratamento BC 25, provocando uma diminuição significativa no IVE (1,4 Plântulas dia⁻¹).

Os indicadores de desenvolvimento da planta, comprimento da parte aérea (CPA), comprimento do sistema radicular (CSR), massa fresca da parte aérea

(MFPA), massa fresca do sistema radicular (MFSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca do sistema radicular (MSSR) em função do tratamento (diferentes substratos) estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Valores médios das variáveis de desenvolvimento de plântulas

Tratamentos	MFPA (mg)	MFSR (mg)	MSPA (mg)	MSSR (mg)	CPA (cm)	CSR (cm)
PLT	50,8 b	45,2 b	5,4 b	4,4 b c	1,74 b	4,14 b
BC 5	44,8 b	37,8 b	5,2 b	5,9 b	1,66 b	3,91 b
BC 10	89,1a	88,8a	12,7a	10,3a	2,38a	5,16a
BC 15	56,8 b	41,8 b	6,6 b	5,0 b c	1,93 b	4,19 b
BC 25	38,4 b	49,1 b	3,2 b	2,2 c	1,63 b	3,38 b
C.V.%	31,57	52,10	36,77	36,63	15,33	15,27

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade. MFPA = Massa fresca da parte aérea; MFSR= Massa fresca do sistema radicular; MSPA= Massa seca da parte aérea e MSSR= Massa seca do sistema radicular; CPA= Comprimento da parte aérea; CSR= Comprimento do sistema radicular.

Como resultado da melhoria da fertilidade do substrato e da maior absorção de nutrientes, o tratamento BC 10, substrato com 10% de biocarvão promoveu aumento no desenvolvimento vegetativo de plântulas da cultivar Grandes lagos (*Lactuca sativa* L.), diferenciando-se dos demais tratamentos e também do tratamento PLT, (Tabela 14). Ocorreram aumentos significativos nas variáveis MFPA, MFSR, MSPA, MSSR, CPA e CSR para o tratamento BC 10.

Os maiores valores das variáveis CPA e CSR para o tratamento BC 10, pode estar relacionado ao fato do biocarvão contribuir para uma maior absorção de nutrientes, principalmente em função dos grupos funcionais reativos, presentes em estruturas moleculares aromáticas do biocarvão (GHEZZEHEI; SARKHOT; BERHE, 2014; DE FIGUEIREDO ET AL., 2017; CRISTIELLEM; LUIZ; FERNANDES, 2017). Outro fator que pode ter contribuído para os maiores valores destas variáveis pode ter sido o efeito eletrofisiológico do carbono pirogênico para as plântulas, onde poderia estar havendo uma redução na energia gastas pelas plântulas para a absorção da quantidade necessária de nutrientes (PETTER et al., 2012).

Observou-se que quantidades superiores a 10% de biocarvão promoveram um decréscimo nas variáveis biométricas de crescimento da cultivar Grandes lagos

(*Lactuca sativa* L.). Isso pode ser resultado de possíveis desequilíbrios nutricionais, por exemplo, a limitação da disponibilidade de potássio e o excesso de outros nutrientes que limitaram o desenvolvimento da planta em doses superiores. Outro fator que pode contribuir para esse efeito é a presença de ácido húmico no biocarvão. ATIYEH et al. (2002) observaram decréscimos na altura de planta, área foliar e massa seca da raiz no tomateiro e pepino em função do aumento de quantidade de ácido húmico.

4 CONCLUSÃO

O biocarvão, obtido a partir do resíduo do beneficiamento do fruto do cafeeiro apresentou características de carga superficial líquida, quando comparadas ao resíduo lignocelulósico (palha do fruto do cafeeiro não pirolisado) que permitem um influenciar na capacidade de troca de cátions e ânions, de tal forma que contribuem para fertilidade do solo e com a nutrição de plantas. A morfologia do biocarvão, observada pelos resultados de MEV, mostrou um material mais descontínuo o que justifica uma maior área superficial e, portanto, maior capacidade adsorptiva em relação ao material na ausência de pirólise. Os resultados de infra vermelho indicaram a presença de grupo funcionais no material pirolisado, remanescentes do material *in natura* os quais podem contribuir para uma maior capacidade de adsorção do biocarvão.

Os resultados para os ensaios de adsorção do azul de metileno, permitiram verificar que o biocarvão produzido a partir da palha do fruto do cafeeiro, apresentou potencial para ser aplicado como material adsorvente na remediação de contaminantes orgânicos no solo e água. Dentre os contaminantes orgânicos, o biocarvão apresentou potencial para remediação de solos contaminados por herbicida atrazina, além de contribuir para o desenvolvimento de plantas não influenciando a princípio na atividade microbiana, pH do solo e mantendo uma condutividade elétrica do solo em níveis aceitáveis para a maioria das culturas.

A adição de biocarvão, ao substrato comercial, Bioplant®, na concentração de 10% em massa, apresentou viabilidade para ser utilizado como condicionador de

substrato utilizado no desenvolvimento de mudas de alface da cultivar Grandes lagos.

5 REFERÊNCIAS

AHMED, M. B. et al. Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater. **Bioresource Technology**, v. 214, p. 836–851, 2016.

ALHO, C. F. B. V. **Efeito da temperatura final de pirólise na estabilidade de biocarvão produzido a partir de madeira de Pinus sp. e Eucalyptus sp.** [s.l.] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, 2012.

ALVES, R. E. Caracterização de fibras lignocelulósicas pré-tratadas por meio de técnicas espectroscópicas e microscópicas ópticas de alta resolução. p. 115, 2011.

ATIYEH, R. et al. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. **Bioresource Technology**, v. 84, n. 1, p. 7–14, ago. 2002.

CANTRELL, K. B. et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 419–428, 2012.

CEDERLUND, H.; BÖRJESSON, E.; STENSTRÖM, J. Effects of a wood-based biochar on the leaching of pesticides chlorpyrifos, diuron, glyphosate and MCPA. **Journal of Environmental Management**, v. 191, p. 28–34, 2017.

CHELLAPPAN, S. et al. Synthesis, optimization and characterization of biochar based catalyst from sawdust for simultaneous esterification and transesterification. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, p. 2–11, 2018.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: café. **Monitoramento agrícola- Safra 2017**, v. 4, n. 1, p. 1–98, 2017.

CRISTIELLEM, I.; LUIZ, S.; FERNANDES, A. Growth and production of common bean fertilized with biochar. **Ciência Rural**, v. 47, n. 11, p. 1–8, 2017.

DA SILVA, J. V.; MADURRO, A. G. B.; MADURRO, J. M. Modified electrode with reduced graphene oxide/poly(3-hydroxyphenylacetic acid): a new platform for

oligonucleotide hybridization. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 21, n. 7, p. 2129–2139, 2017.

DE ASSIS, A. M. et al. Cultivo de orquídea em substratos à base de casca de café. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 544–549, 2011.

DE FIGUEREDO, N. A. et al. Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 48, n. 3, p. 395–403, 2017.

DEBIAGI, P. E. A. et al. Detailed Kinetic mechanism of gas-phase reactions of volatiles from biomass pyrolysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 60–71, 2016.

DECHENE, A. et al. Sorption of polar herbicides and herbicide metabolites by biochar-amended soil. **Chemosphere**, v. 109, p. 180–186, 2014.

DI MARSICO, A. et al. Mucilage from seeds of chia (*Salvia hispanica* L.) used as soil conditioner; effects on the sorption-desorption of four herbicides in three different soils. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 537–538, 2018.

DING, Y. et al. Potential Benefits of Biochar in Agricultural Soils: A Review. **Pedosphere**, v. 27, n. 4, p. 645–661, 2017.

DIONÍSIO, J. A. et al. **Guia prático de biologia do solo**. [s.l.: s.n.].

DOS SANTOS, D. P. et al. Determinação de espécies bioindicadoras de resíduos de herbicidas auxínicos. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 354–362, 2013.

EDUARDO, P. et al. Biomass and Bioenergy Detailed kinetic mechanism of gas-phase reactions of volatiles released from biomass pyrolysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 60–71, 2016.

EMBRAPA. Documentos 132 Manual de Métodos de Análise de Solo. **Embrapa Solos**, n. ISSN 1517-2627, p. 230, 2011.

FREITAS, M. A. M. et al. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo determinada por bioensaios. **Planta Daninha**, v. 32, n. 2, p. 385–392, 2014.

GHEZZEHEI, T. A.; SARKHOT, D. V.; BERHE, A. A. Biochar can be used to capture essential nutrients from dairy wastewater and improve soil physico-chemical properties. **Solid Earth**, v. 5, n. 2, p. 953–962, 2014.

GILES, C. H. et al. 786. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. **Journal of the Chemical Society (Resumed)**, v. 846, p. 3973, 1960.

HOFFMANN, B. S.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. An evaluation of the techno-economic potential of co-firing coal with woody biomass in thermal power plants in the south of Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 45, p. 295–302, 2012.

HONORATO CASTRO, A. C. et al. Preparation of genosensor for detection of specific DNA sequence of the hepatitis B virus. **Applied Surface Science**, v. 314, p. 273–279, 2014.

IBAMA. **Boletim de comercialização de agrotóxicos e afins. Histórico de vendas -2016**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#boletinsanuais>>. Acesso em: 28 maio. 2018.

IUPAC. **global availability of information on agrochemicals-2018**. Disponível em: <<https://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/Reports/43.htm#none>>. Acesso em: 28 maio. 2018.

JIN, J. et al. Properties of biochar-amended soils and their sorption of imidacloprid, isoproturon, and atrazine. **Science of the Total Environment**, v. 550, p. 504–513, 2016.

JÚNIA, A. D. B.; LOPES, L. R.; CUNHA, R. N. DA. Estudo da adsorção do corante azul de metileno utilizando a casca de tamarindo como bioissorvente. **Revista Perquirere**, v. 14, n. 2, p. 194–206, 2017.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 126–1140, 2016.

KLEINSCHMITT, A. R. B. et al. Dessorção do herbicida atrazina e atividade microbiana em duas classes de solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1794–1798, 2006.

KONG, L. et al. Biochar accelerates PAHs biodegradation in petroleum-polluted soil by biostimulation strategy. **Journal of Hazardous Materials**, v. 343, p. 276–284, 2018.

LEE, Y. et al. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. **Bioresource Technology**, v. 148, p. 196–201, 2013.

LI, S.; CHEN, G. Thermogravimetric , thermochemical , and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures. v. 78, p. 198–207, 2018.

LIU, J. et al. Combination of biochar and immobilized bacteria in cypermethrin-contaminated soil remediation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 120, p. 15–20, 2017.

MAGUIRE, J. D. Speed of Germination—Aid In Selection And Evaluation for Seedling Emergence And Vigor¹. **Crop Science**, v. 2, n. 2, p. 176, 1962.

MARÍN-BENITO, J. M. et al. Organic sorbents as barriers to decrease the mobility of herbicides in soils. Modelling of the leaching process. **Geoderma**, v. 313, n. November 2017, p. 205–216, 2018.

MEDEIROS, P. R. F. DE; DIAS, C. T. S. Tolerância da cultura do pepino à salinidade em ambiente protegido 1. n. 19, p. 406–410, 2009.

MENEZES JÚNIOR, F. O. G. et al. Caracterização de diferentes substratos e seu desempenho na produção de mudas de alface em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 18, n. 3, p. 164–170, 2000.

MOHAN, D. et al. Development of magnetic activated carbon from almond shells for trinitrophenol removal from water. **Chemical Engineering Journal**, v. 172, n. 2–3, p. 1111–1125, 2011.

NOVOTNY, E. H. et al. Biochar: Pyrogenic Carbon for Agricultural Use - a Critical Review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321–344, 2015.

OH, T. K. et al. Effect of pH conditions on actual and apparent fluoride adsorption by biochar in aqueous phase. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 223, n. 7, p. 3729–3738, 2012.

OLIVEIRA, F. DE A. DE et al. Desempenho de cultivares de alface submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 771–777, 2011.

OLIVEIRA, F. M. DE et al. Avaliação do processo adsorptivo utilizando bagaço de cana-de-açúcar como material adsorvente na remoção do corante azul de metileno. In: **Tecnologias em pesquisa: ciências exatas e biológicas**. [s.l.] Editora Blucher, 2017. p. 27–42.

OLIVEIRA, S. P.; SILVA, W. L. L.; VIANA, R. R. Avaliação da capacidade de adsorção do corante azul de metileno em soluções aquosas em caulinita natural e intercalada com acetato de potássio. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 338–344, 2013.

ONOREVOLI, B. et al. Characterization of feedstock and biochar from energetic tobacco seed waste pyrolysis and potential application of biochar as an adsorbent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1279–1287, 2018.

OUYANG, W. et al. Typical agricultural diffuse herbicide sorption with agricultural waste-derived biochars amended soil of high organic matter content. **Water Research**, v. 92, p. 156–163, 2016.

PANDIT, N. R. et al. Biochar improves maize growth by alleviation of nutrient stress

in a moderately acidic low-input Nepalese soil. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1380–1389, 2018.

PETTER, F. A. et al. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 4, p. 44–51, 2012.

PRAKONGKEP, N.; GILKES, R. J.; WIRIYAKITNATEEKUL, W. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 5, p. 732–740, 2015a.

PRAKONGKEP, N.; GILKES, R. J.; WIRIYAKITNATEEKUL, W. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 5, p. 732–740, 2015b.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

SAFAEI KHORRAM, M. et al. Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 44, p. 269–279, 2016.

SANCHEZ-HERNANDEZ, J. C. Biochar activation with exoenzymes induced by earthworms: A novel functional strategy for soil quality promotion. **Journal of Hazardous Materials**, v. 350, n. February, p. 136–143, 2018.

SANTOS, H. G. DOS et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. In: [s.l.: s.n.]. p. 353.

WANG, J.; CHEN, C. Biosorbents for heavy metals removal and their future. **Biotechnology Advances**, v. 27, n. 2, p. 195–226, 2009.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83–95, 2017.

XIAO, F.; PIGNATELLO, J. J. Interactions of triazine herbicides with biochar: Steric and electronic effects. **Water Research**, v. 80, p. 179–188, 2015.

YANG, F. et al. Corn straw-derived biochar impregnated with α -FeOOH nanorods for highly effective copper removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 348, n. March, p. 191–201, 2018.

YAVARI, S. et al. Sorption-desorption mechanisms of imazapic and imazapyr herbicides on biochars produced from agricultural wastes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 4, p. 3981–3989, 2016.

YIN, Y.; GAO, Y.; LI, A. Self-activation of biochar from furfural residues by recycled pyrolysis gas. **Waste Management**, 2018.

ZEIST, A. R. et al. Comparação de métodos de estimativa de área foliar em morangueiro. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 20, n. 1–2, p. 33–41, 2014.

ZHENG, W. et al. Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1–3, p. 121–126, 2010.