

BIOCARVÃO

na agricultura

estudos básicos e aplicados

Lúcia Helena Garófalo Chaves
Josely Dantas Fernandes
Organizadores



EDITORA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – EDUF CG
atendimento@editora.ufcg.edu.br

Prof. Dr. Antônio Fernandes Filho
Reitor

Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata
Vice-Reitor

Prof. Dr. Bruno Medeiros Roldão de Araújo
Diretor EDUF CG

Simone Cunha
Revisão

Yasmine Lima
Projeto gráfico

CONSELHO EDITORIAL

Erivaldo Moreira Barbosa (CCJS)
Janiro Costa Rego (CTRN)
José Wanderley Alves de Sousa (CFP)
Marcelo Bezerra Grilo (CCT)
Mário de Sousa Araújo Filho (CEEI)
Marisa de Oliveira Apolinário (CES)
Naelza de Araújo Wanderley (CSTR)
Andréa Maria Brandão Mendes de Oliveira (CCTA)
Rogério Humberto Zeferino Nascimento (CH)
Saulo Rios Mariz (CCBS)
Valéria Andrade (CDSA)

Lúcia Helena Garófalo Chaves
Josely Dantas Fernandes
Organizadores

BIOCARVÃO

Na agricultura

estudos básicos e aplicados

B615 Biocarvão na agricultura: estudos básicos e aplicados [recurso eletrônico] / Lúcia Helena Garófalo Chaves, Josely Dantas Fernandes (organizadores). – Campina Grande: EDUF CG, 2024.
396 p. : il. color.

E-book (PDF)
ISBN 978-85-8001-303-0

1. Pirólise. 2. Cama de Aviário. 3. Propriedades Físico-Químicas. 4. Agricultura. 5. Fertilização do Solo. 6. Adubação Orgânica. I. Chaves, Lúcia Helena Garófalo. II. Fernandes, Josely Dantas. III. Título.

CDU 631.8

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MEIRE EMANUELA DA SILVA MELO GRB-15/568



Campina Grande – PB
2024

Apresentação

O biocarvão é o termo dado ao produto obtido da biomassa vegetal ou animal submetida ao processo de decomposição, degradação ou alteração da sua composição pela ação de calor. É denominado de pirólise e pode ser do tipo rápida ou lenta, quando aquecida essencialmente com a presença de pouco ou de nenhum oxigênio.

Os efeitos do uso do biocarvão de cama de aviário na agricultura ainda são poucos conhecidos, bem como sua literatura é escassa e este tema é ainda tratado de forma superficial, apesar do grande potencial de matéria-prima de que dispomos, dada a pujante atividade avícola do país.

Neste contexto, este livro vem apresentar os resultados de vários estudos sobre o biocarvão de cama de aviário, realizados por professores, pesquisadores e discentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, abordando temas sobre caracterização, mineralização, propriedades eletroquímicas, químicas e físicas de diferentes materiais e tratamentos; seus efeitos na adsorção de minerais no desenvolvimento de mudas e produção de culturas, bem como o uso como melhoradores de solo e mitigador de acidez e salinidade dos solos.

Vale destacar que, neste livro, com exceção do capítulo 1 e do estudo de caso 6 do capítulo 6, são apresentados, resumidamente, trabalhos de pesquisa já publicados em diversas revistas científicas, por isso, no início de cada estudo de caso, é apresentada a referência de tal publicação para que o leitor possa consultá-la na íntegra.

Este trabalho é dividido em 7 capítulos, apresentando 26 estudos de casos, e traz, nas suas 368 páginas, todos os temas mencionados acima.

No capítulo 1, os autores apresentam a bibliometria sobre as publicações referentes ao biocarvão de cama de aviário; no capítulo 2, os autores apresentam a caracterização de material carbonizado e biocarvão derivados de cama de aviário; no capítulo 3, os autores mostram os efeitos da aplicação de biocarvão nas propriedades eletroquímicas, químicas e físicas de solo; no capítulo 4, os autores avaliaram a mineralização do carbono orgânico do biocarvão e do composto orgânico de cama de aviário em um argissolo; no capítulo 5, os autores pesquisaram sobre a influência do biocarvão de cama de aviário na adsorção de fósforo, zinco e cádmio em solos; o capítulo 6 apresenta os efeitos do uso do biocarvão na produção de mudas de meloeiro e mamoeiro e os efeitos químicos nas amostras de solo antes e depois do cultivo destas culturas; no Capítulo 7, os autores discutem os resultados do biocarvão no estado nutricional, crescimento, desenvolvimento e produção de diversas culturas.

Sendo assim, com este livro, há a pretensão de colaborar com mais uma fonte de consulta sobre os temas aqui abordados, propiciando que a sociedade, de modo geral, possa aprofundar seus conhecimentos acerca do uso de biocarvão, em particular, o produzido a partir de cama de aviário.

Sumário

Apresentação

CAPÍTULO 1

Análise bibliométrica sobre biocarvão de cama de aviário13

Andrezza Maia de Lima, Maria Viviane Palmeira da Costa, Semako Ibrahim Bonou, Thaimara Ramos Angelino de Souza, Virgínia Mirtes de Alcântara Silva, Lúcia Helena Garófalo Chaves, Josely Dantas Fernandes

CAPÍTULO 2

Caracterização de material carbonizado e biocarvão derivados de cama de de aviário 33

Josely Dantas Fernandes , Lúcia Helena Garófalo Chaves, Jacqueline da Silva Mendes Edilma Rodrigues Bento Dantas

ESTUDO DE CASO 1

Caracterização de biocarvão de cama de aviário para uso agrícola 35

ESTUDO DE CASO 2

Caracterização da biomassa derivada de cama de aves submetida a diferentes tratamentos térmicos.....46

CAPÍTULO 3

Biocarvão nas propriedades eletroquímicas, químicas e físicas de solo 73

Jaqueline da Silva Mendes, Josely Dantas Fernandes, Lúcia Helena Garófalo Chaves

ESTUDO DE CASO 1

Uso de pó de rocha MB-4, biocarvão de cama de aviário, silicato e carbonato de cálcio para corrigir diferentes tipos de solo..... 78

ESTUDO DE CASO 2

Uso do biocarvão de cama de aviário e pó de rocha MB-4 na liberação de fósforo disponível para os solos.....88

ESTUDO DE CASO 3

Interpretação das características químicas dos solos submetidos à incubação com biocarvão e pó de rocha MB-4..... 92

ESTUDO DE CASO 4

Efeitos do biocarvão de cama de aviário sobre as propriedades eletroquímicas de solos eletronegativos 104

ESTUDO DE CASO 5

Alterações nas propriedades físicas e químicas do solo com uso de biocarvão..... 109

ESTUDO DE CASO 6

Efeito do biocarvão de cama de aviário sobre as propriedades físicas do argissolo 120

ESTUDO DE CASO 7

Alterações químicas do solo e avaliação da mobilidade de macronutrientes em latossolo tratado com biocarvão.....127

ESTUDO DE CASO 8

Alterações na salinidade do solo com o uso de diferentes doses de biocarvão. 138

CAPÍTULO 4

Mineralização de carbono orgânico do biocarvão e do composto orgânico de cama de aviário em um argissolo 155

Gilvanise Alves Tito, Josely Dantas Fernandes, Lúcia Helena Garófalo Chaves

CAPÍTULO 5

Fenômeno de adsorção com biocarvão de cama de aviário 181

Washington Benevenuto de Lima, Josely Dantas Fernandes ,

Lúcia Helena Garófalo Chaves

ESTUDO DE CASO 1

Disponibilidade de fósforo no solo incubado com biocarvão: estudo de adsorção..... 184

ESTUDO DE CASO 2

Adsorção de zinco em argissolo e neossolo utilizando biocarvão de cama de aviário..... 200

ESTUDO DE CASO 3

Otimização da adsorção de cádmio usando biocarvão de cama de aviário por meio da metodologia de superfície de resposta211

CAPÍTULO 6

Biocarvão nas mudas de meloeiro e mamoeiro 229

Laysa Gabryella de Souza Laurentino, Jean Pereira Guimarães, Antônio Ramos

Cavalcante, Lúcia Helena Garófalo Chaves, Edilma Rodrigues Bento Dantas,

Josely Dantas Fernandes

ESTUDO DE CASO 1

Influência de biocarvão na emergência de sementes de melão em dois ciclos.....231

ESTUDO DE CASO 2

Influência de biocarvão na emergência de sementes de mamão em dois ciclos..... 238

ESTUDO DE CASO 3	
Biocarvão como condicionador de substrato no desenvolvimento e fitomassa de mudas de meloeiro	244

ESTUDO DE CASO 4	
Efeito residual de biocarvão de cama de aviário no solo e desenvolvimento inicial de mudas de meloeiro	254

ESTUDO DE CASO 5	
Biocarvão como condicionador de substrato no desenvolvimento e fitomassa de mudas de mamoeiro	258

ESTUDO DE CASO 6	
Efeito residual de biocarvão de cama de aviário no solo e desenvolvimento inicial de mudas de mamoeiro.....	268

CAPÍTULO 7
Biocarvão no desenvolvimento e na produção de culturas 287

Guilherme de Freitas Furtado, Antônio Ramos Cavalcante, Gilvanise Alves Tito, Washington Benevenuto de Lima, Jacqueline da Silva Mendes, Lúcia Helena Garófalo Chaves, Josely Dantas Fernandes , André Alisson Rodrigues da Silva, Geovani Soares de Lima

ESTUDO DE CASO 1	
Propriedades químicas do solo, crescimento, desenvolvimento, produção e taxas de crescimento e produção de girassol em função da adubação com biocarvão e NPK	290

ESTUDO DE CASO 2	
Crescimento do gergelim em função da adubação com NPK e biocarvão de cama de frango.....	314

ESTUDO DE CASO 3	
Doses de biocarvão de cama de aviário e tempo de incubação: efeitos na fertilidade do solo e desenvolvimento de rabanete	324

ESTUDO DE CASO 4	
Produção de beterraba em função de doses de biocarvão	333

ESTUDO DE CASO 5	
Biocarvão nas propriedades químicas do solo e produção de pimenta-biquinho (Capsicu Chinense)	338

ESTUDO DE CASO 6	
Potencial nutricional, crescimento e produção do biocarvão e nitrogênio na cultura do pimentão	343

ESTUDO DE CASO 7	
Sintomas de deficiência e crescimento inicial do milho cultivado com biocarvão sob omissão de nutrientes	356

ESTUDO DE CASO 8	
Estado nutricional, desenvolvimento, produção de milho e propriedades químicas de solo pós-colheita em função de doses de biocarvão	370

CAPÍTULO 1

Análise bibliométrica sobre biocarvão de cama de aviário

Andrezza Maia de Lima

Maria Viviane Palmeira da Costa

Semako Ibrahim Bonou

Thaimara Ramos Angelino de Souza

Virgínia Mirtes de Alcântara Silva

Lúcia Helena Garófalo Chaves

Josely Dantas Fernandes

A evolução do conhecimento é algo dinâmico e, a cada instante, várias pesquisas com relevantes contribuições científicas e aplicadas são desenvolvidas, gerando um grande volume de artigos científicos publicados nas plataformas de base de dados. Nesse cenário, destacamos a bibliometria, que é um método de mensuração da produção científica. A análise bibliométrica refere-se à avaliação qualitativa e quantitativa de áreas de pesquisa específicas usando métodos matemáticos e estatísticos para entender a estrutura do conhecimento e explorar tendências de desenvolvimento (Bornmann; Leydesdorff, 2014). Em outras palavras, a análise bibliométrica é útil para decifrar e mapear o conhecimento científico cumulativo e as nuances evolutivas de campos bem estabelecidos, dando sentido a grandes volumes de dados não estruturados de maneira rigorosa (Donthu *et al.*, 2021).

Para realização da análise bibliométrica, é preciso definir o campo de estudo, a plataforma de pesquisa científica e o estabelecimento de critérios de busca, como termos específicos, períodos de publicação, idioma e área do conhecimento. A base de dados bibliográficas deve possuir vasta cobertura temática e temporal de publicações científicas e abranger periódicos indexados, cujos artigos passaram por processos de avaliação e validação de qualidade por pares, necessários para a sua inclusão nesses acervos (Medeiros *et al.*, 2015). Assim, a análise bibliométrica se constitui como ferramenta indispensável para a avaliação dessas publicações (Figueredo *et al.*, 2020).

A escolha da base de dados é uma etapa muito importante na avaliação bibliométrica pelas implicações que têm nos resultados a obter que possam ser utilizadas pelos pesquisadores para mensurar, interpretar e avaliar os resultados obtidos nas buscas realizadas, para posterior disseminação científica (Araújo, 2006).

O biocarvão é um dos principais produtos gerados a partir da pirólise da biomassa, que é o processo de degradação térmica em ambiente com altas temperaturas (>250°C) e atmosfera inerte. Pesquisas a respeito do uso de biocarvão de cama de aviário em solos são relevantes, no entanto, ainda são escassas, mesmo representando uma tecnologia emergente e promissora para reciclagem de nutrientes.

Pesquisas relacionadas ao biocarvão foram iniciadas com a descoberta da terra preta por James Orton em 1870 (Lehmann; Joseph 2009, 2015). Recentemente, o biocarvão tem gerado grande interesse em todo o mundo devido ao seu uso em múltiplas aplicações, como remediador de solo, combustível, catalisador, adsorvente para remoção de poluentes e sequestro de carbono (Agbede *et al.*, 2020; Bastos *et al.*, 2020; Chaves *et al.*, 2016; Deje-

ne; Tilahun, 2021; Fernandes *et al.*, 2018; Fidel *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2017; Mendes *et al.*, 2015; Moradi *et al.*, 2019; Toková *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2019). Além dessas aplicações, a produção e o uso do biocarvão permitem a reciclagem de resíduos orgânicos da agricultura, como cana-de-açúcar, cama de aviário, restolho de abacaxi, fibra de coco, palha de arroz, entre outros, que geralmente são descartados e se tornam um problema para o meio ambiente, ameaçando a qualidade do ar, da água e do solo. Ademais, o uso do biocarvão permite solucionar problemas relacionados à pecuária e às águas residuais (Baninajarian; Shirvani, 2020; Matheri *et al.*, 2020; Salazar-López *et al.*, 2021).

Neste trabalho, por meio de um levantamento estatístico da busca de artigos nas bases de dados online da plataforma Scopus, realizou-se um levantamento das principais pesquisas quanto ao uso do biocarvão de cama de aviário (BCA) com os seguintes objetivos: i) analisar os padrões de distribuição temporal dos artigos de periódicos relacionados a BCA; ii) mostrar as contribuições de autores prolíficos, países líderes e instituições acadêmicas mais produtivas; (iii) determinar a dominação de países com base nas principais aplicações; e (iv) fornecer informações em colaboração potencial e direções futuras. Esta pesquisa auxiliará pesquisadores, formuladores de políticas e indivíduos a entenderem as tendências de pesquisa com BCA e potenciais oportunidades para pesquisas futuras.

Para isso, foi feito um estudo exploratório-descritivo, principalmente porque descreve o contexto do estudo e permite maior familiarização da comunidade acadêmica com as peculiaridades relacionadas ao tema. Essa abordagem exploratória descritiva, baseada na análise bibliométrica, tem como finalidade construir mapas científicos com base em dados bibliográficos. Tais bases

se concentram em redes de pesquisadores, redes de coautoria, palavras-chave que ocorrem em publicações, entre outras informações. Desta forma, a análise bibliométrica possibilita o estudo do desenvolvimento de um determinado campo de pesquisa, bem como o delineamento da literatura sobre a temática pesquisada.

Como método de pesquisa bibliográfica, a busca sistemática foi realizada nas bases de dados online da plataforma Scopus, seguida de análise bibliométrica dos resultados, que foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Machado *et al.* (2016), com adaptações.

A bibliografia encontrada na pesquisa foi analisada no mês de abril de 2022, sendo selecionada pela utilização das palavras-chave específicas na seção de busca “título do trabalho, resumo ou palavras-chaves”, utilizando os termos: “biocarvão de cama de aviário” e “*poultry litter biochar*”, sempre dentro das aspas para evitar que temas divergentes destes fossem encontrados na busca.

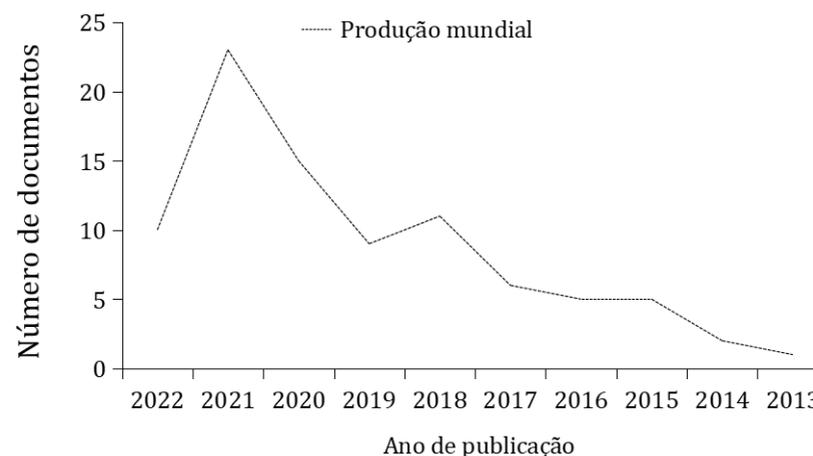
As análises bibliométricas foram realizadas no período compreendido entre 2008 e 2022, porém, neste trabalho, foram avaliados apenas os últimos 10 anos, ou seja, entre 2012 e 2022. Foi encontrado um total de 87 trabalhos científicos na seção de busca utilizada.

Após a obtenção do número de registros de trabalhos publicados, foram aplicadas as filtragens e analisados os trabalhos em relação a: ano de publicação, número de documentos publicados no Brasil, número de documentos publicados em nível mundial, número de documentos em relação aos órgãos de fomento, principais autores citados, número de publicações por instituição, países que mais publicaram sobre o tema, tipos de documentos

onde são publicados os trabalhos e as principais áreas onde foram publicados.

De acordo com a Figura 1, a produção científica por período aumentou nas publicações do ano de 2013 até o ano de 2021, sendo que, neste último ano, houve um aumento significativo com 23 artigos, o que demonstra o interesse crescente dos pesquisadores sobre o assunto biocarvão. Só para o período de 2022, até o mês de abril, já tinham sido publicados 10 artigos.

Figura 1–Produção mundial relacionada ao biocarvão de cama de aviário nos últimos 10 anos presentes na base da Scopus



Elaborado pelos autores.

O aproveitamento de resíduos orgânicos oriundos da atividade agropecuária na forma de biocarvão pode ser uma alternativa

viável tanto no processo de gestão das biomassas geradas quanto na reciclagem dos nutrientes contidos nestes resíduos (Laurentino, 2021).

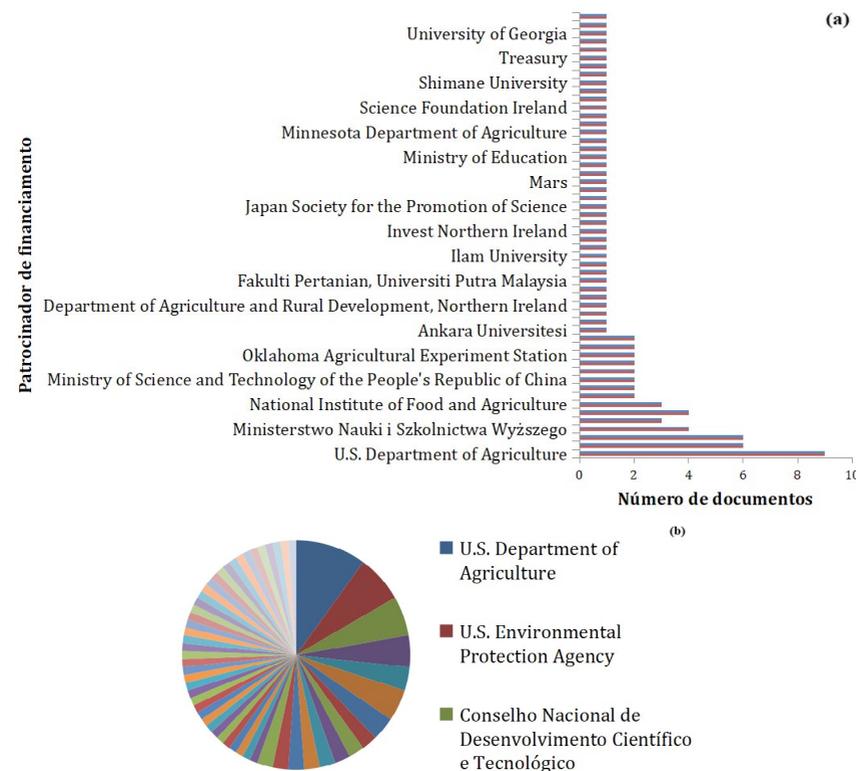
Segundo Jeffery *et al.* (2011), a utilização do biocarvão de cama de aviário no meio agrícola tem proporcionado resultados significativos nos ganhos em produtividade dos cultivos devido à manutenção e à melhoria da fertilidade dos solos.

Diversos periódicos, em âmbito nacional, têm desempenhado papel fundamental nas publicações relacionadas à utilização de cama de aviário como biocarvão. Por exemplo, as revistas brasileiras que mais se destacaram foram a *Revista Ciências Agrárias* (1), *Revista Caatinga* (2), *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (1), *Revista Virtual de Química* (1), *Geoderma* (1) e *Semina Ciências Agrárias* (4), realizando um total de 10 publicações brasileiras sobre o tema biocarvão de cama de aviário. As revistas internacionais que mais publicaram trabalhos a respeito deste assunto são as seguintes: *Sustainability Switzerland* (3), *Frontiers In Sustainable Food Systems* (3), *Energies* (4), *Environments Mdpi* (5) e *Agronomy* (8).

A utilização da cama de aviário para fins agrícolas é de interesse das grandes empresas avícolas e do próprio governo, os principais financiadores das pesquisas, pois o tema tem forte apelo focado na sustentabilidade. Para as empresas, o bom desempenho nas esferas ambiental e social, além de agregar valores à companhia, aumenta o rendimento econômico com a possibilidade de parcerias e integração com proprietários e cooperativas rurais da região.

Os dados apresentados na Figura 2 (a e b) mostram que foram identificadas 54 instituições financiadoras de trabalhos de pesquisa tendo o biocarvão como objetivo dos estudos. Destas apenas 3 são nacionais e as demais internacionais.

Figura 2 - Principais agências financiadoras de trabalhos com a temática de biocarvão de cama de aviário na base de dado da Scopus



Elaborado pelos autores.

Das instituições estrangeiras, os principais financiadores foram o *U.S. Department of Agriculture* (9 publicações) e a *U.S. Environmental Protection Agency* (6 publicações), seguidos do Ministério de Ciência e Ensino Polonês - *Ministers two Nauki i Szkolnictwa Wyższego* (4 publicações), *Agricultural Research Service* (3 publicações), *National Institute of Food and Agriculture* (3 publicações), *European Commission* (2 publicações), *Ministry of Education and Science of the Russian Federation* (2 publicações), *Ministry of Science*

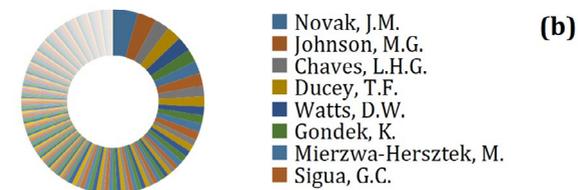
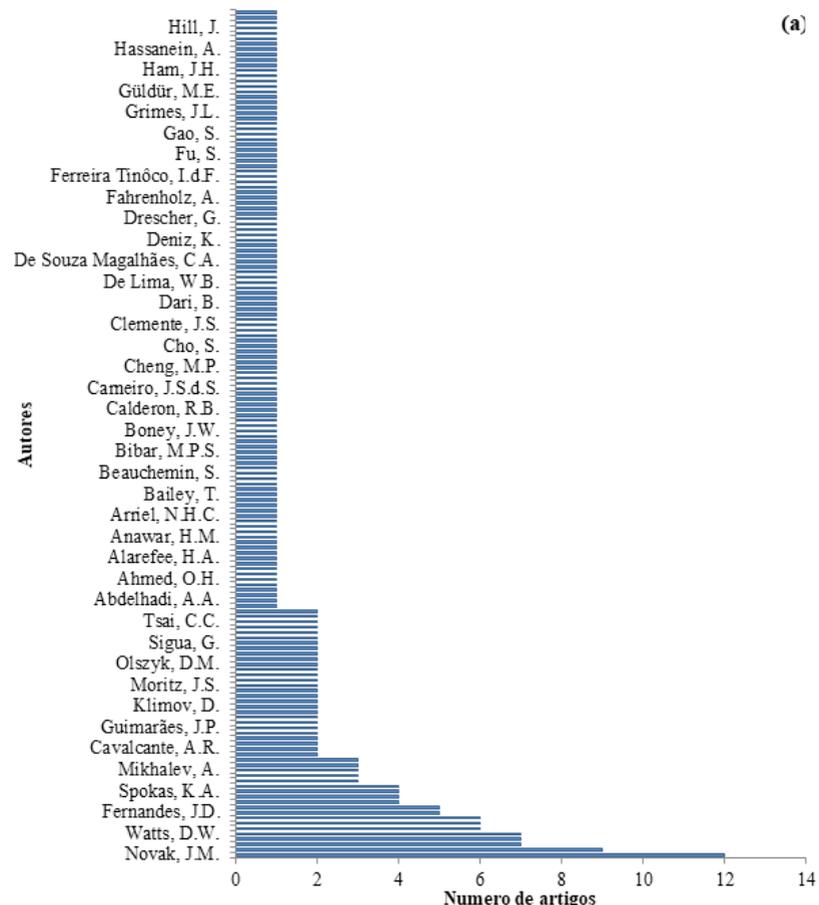
and Technology of the People's Republic of China (2 publicações), National Natural Science Foundation of China (2 publicações), Oklahoma Agricultural Experiment Station (2 publicações), Taif University (2 publicações) e UK Research and Innovation (2 publicações).

Das instituições financeiras nacionais, teve o CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (6 publicações), seguido da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (4) e o MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2).

Embora por limitação técnica de impressão não estejam representados os nomes de todas as instituições financiadoras, inclusive as brasileiras (Figura 2a), ficam evidenciados os registros da participação das instituições brasileiras com o mesmo número de projetos financiados, CNPq com 6 e CAPES com 4 projetos. Já na Figura 2b, procurou-se destacar apenas a posição relativa do CNPq em termos de número de projetos financiados em nível global. O CNPq como instituição nacional de fomento tem colaborado cada vez mais para o desenvolvimento das pesquisas em áreas estratégicas, tanto com investimentos para a pesquisa quanto com a concessão de bolsas, que podem ocorrer por meio de demanda espontânea, por parte dos próprios pesquisadores ou através de editais específicos para áreas que o CNPq julgue interessante ou estratégica para produção de conhecimento no país.

Dentre os autores mais citados nas publicações sobre a temática biocarvão de cama de aviário se encontram Novak, J. M. com 12 citações em consultas na *agronomy*, *microorganisms*, *energies* e *biochar*. Em seguida, vem Johnson, M. G. com 9 citações em trabalhos publicados, que apresentam foco em *agronomy*, *biochar*, *microorganisms*, *hortscience*, *agrosystems*, *Geosciences* e *Environment* (Figura 3a).

Figura 3 - Principais autores citados sobre a temática biocarvão de cama de aviário nas bases de fonte da Scopus

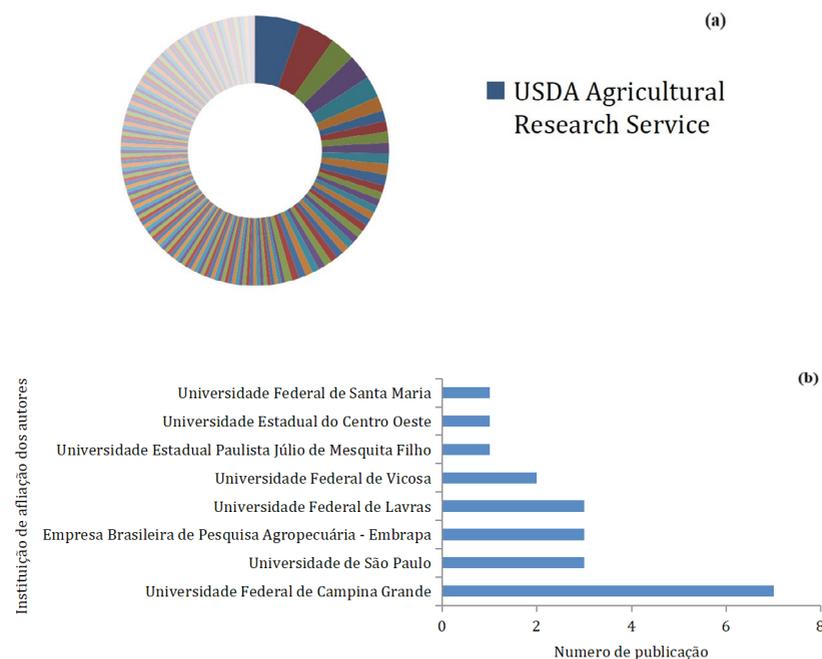


Elaborado pelos autores.

No que se refere à avaliação da autoria, verificou-se, na Figura 4 b, que o autor Chaves, L. H. G apresentou 7 produções científicas citações em linhas de pesquisa na revista *Caatinga e Semina: Ciências Agrárias*; como também se destacaram autores como Ducey, T. F e Watts, D. W., que também foram citados em 7 artigos. Na mesma linha dos estudos, destacaram-se os pesquisadores Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M. e Sigua, G. C. em 6 citações, nos periódicos *Journal of Soils and Sediments, Biomass Conversion and Biorefinery, Polish Journal of Environmental Studies, Waste and Biomass Valorization, Zemdirbyste, Chilean Journal of Agricultural Research, Agronomy, Environments, Energies, Microorganisms, Biochar*.

Analisando o número de artigos publicados com filiais nas instituições, observou-se que, em nível mundial, as instituições com maiores publicações foram a USDA Agricultural Research Service com 13 publicações; United States Department of Agriculture, com 10 publicações; Universidade Federal de Campina Grande e United States Environmental Protection Agency, com 7 publicações; Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kollataja w Krakowie, com 6 publicações; US EPA National Health and Environmental Effects Research Laboratory, com 4 publicações; Universidade de São Paulo, Colorado State University, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, University of Florida, Tambov State Technical University, Universidade Federal de Lavras, Universiti Putra Malaysia, com 3 publicações, como mostra na Figura 4a.

Figura 4 – Principais instituições de afiliação dos autores sobre a temática biocarvão de cama de aviário nas bases de dados da Scopus mundial (A) e Brasil (B)



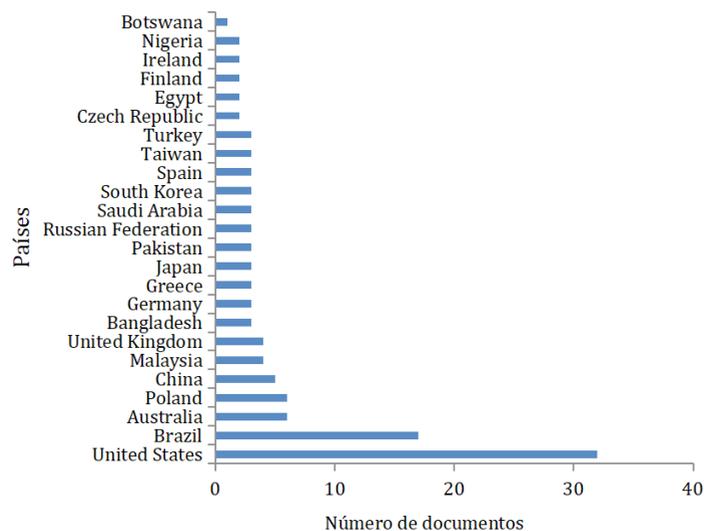
Elaborado pelos autores.

Já no Brasil, observa-se que a instituição da Universidade Federal de Campina Grande obteve maior destaque em relações às publicações com o tema biocarvão de cama de aviário, apresentando 7 publicações. Em seguida, as instituições Universidade de São Paulo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EM-

BRAPA e Universidade Federal de Lavras também colaboraram com pesquisas na mesma linha, apresentando 3 publicações cada uma. Na Universidade Federal de Viçosa, foram publicados 2 artigos sobre o assunto, enquanto a Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, a Universidade Estadual do Centro Oeste e a Universidade Federal de Santa Maria publicaram somente 1 artigo cada instituição de ensino segundo a Scopus, durante os 10 últimos anos (Figura 4b).

No referido período, os principais documentos por território mundial sobre o tema biocarvão de cama de aviário mostram os Estados Unidos como o país de maior taxa de publicações, equivalente a 32 artigos, tendo o Brasil 17 artigos; Austrália e Poland, 6 artigos; e Malaysia e United Kingdom, com 4 artigos (Figura 5).

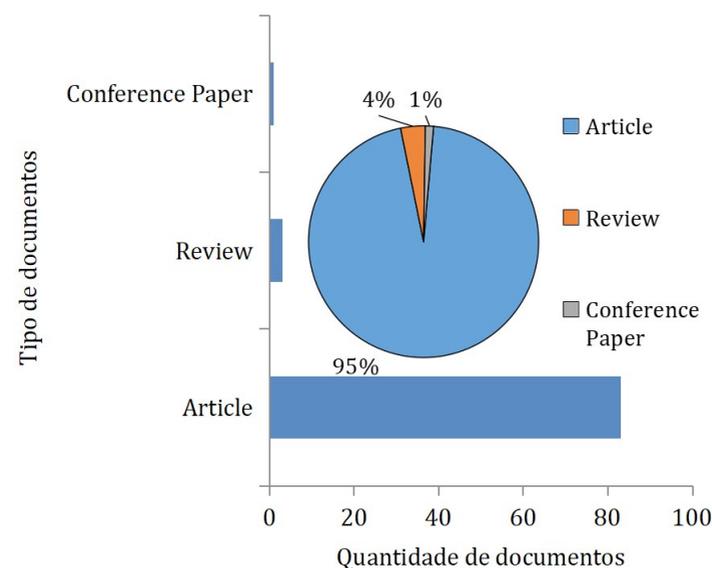
Figura 5 - Principais documentos por território mundial sobre a temática biocarvão de cama de aviário nas bases de dados da Scopus



Elaborado pelos autores.

Em relação aos tipos de documentos sobre biocarvão de cama de aviário, observa-se que os tipos de documentos mais utilizados são em forma de artigo, totalizando 95% com uma quantidade equivalente a 83. Em segundo lugar, destacam-se os artigos de revisão, com cerca de 4%, o que equivale a 3 documentos; e 1% de anais de eventos, equivalente a apenas 1 documento (Figura 6).

Figura 6 - Principais tipos de documentos sobre a temática biocarvão de cama de aviário nas bases de dados da Scopus

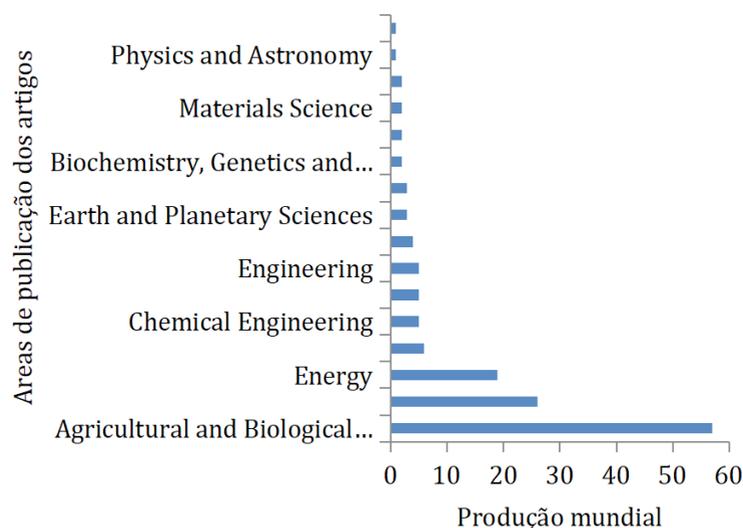


Elaborado pelos autores.

Com base na figura acima, pode-se observar que as principais áreas de publicações de artigos foram *Agricultural and Biological Sciences*, com 57 publicações; *Environmental Science*, com 26 publicações; *Energy*, com 19; *Multidisciplinary*, com 6; *Chemical*

Engineering, Chemistry, com 5 publicações; e *Mathematics*, com 4 publicações.

Figura 7 - Principais áreas de publicações dos artigos sobre a temática biocarvão de cama de aviário nas bases de dados da Scopus



Elaborado pelos autores.

Com base no exposto, pode-se concluir que as pesquisas voltadas para a temática biocarvão de cama de aviário apresentaram grande relevância nos últimos 10 anos. Assim, por parte de universidades, empresas financiadoras, associações e órgãos de extensão, foi possível encontrar dados sobre a importância dessa temática na redução da poluição ambiental e no aproveitamento desses resíduos na agricultura como fonte de nutrientes, promovendo assim a adubação orgânica nas culturas e, a cada dia,

a sustentabilidade e a conservação ambiental. Contudo as universidades públicas e os institutos de pesquisa são os maiores beneficiários dos recursos destinados à pesquisa científica, uma vez que é nessas instituições que se desenvolve quase que a totalidade das atividades científicas e dos cursos de pós-graduação *stricto sensu* do país.

REFERÊNCIAS

AGBEDE, T.; ADEKIYA, A.; ODOJA, A.; BAYODE, L.; OMOTEHINSE, P.; ADEPEHIN, I. Effects of biochar and poultry manure on soil properties, growth, quality, and yield of cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) in degraded tropical sandy soil. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 4, p. 528-543, 2020.

ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão**, Porto Alegre, RS, v. 12, n. 1, p. 11-32, 2006.

BANINAJARIAN, S.; SHIRVANI, M. Use of biochar as a possible means of minimizing phosphate fixation and external P requirement of acidic soil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 4, p. 1-15, 2020.

BASTOS, R. R. C.; CORRÊA, A. P. L.; LUZ, P. T. S.; ROCHA FILHO, G. N.; ZAMIAN, J. R.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Optimization of biodiesel production using sulfonated carbon-based catalyst from an amazon agro-industrial waste. **Energy Conversion and Management**, v. 205, p. 112457, 2020.

BORNMANN, L.; LEYDESDORFF, L. Scientometrics in a changing research landscape: bibliometrics has become an integral part of research quality evaluation and has been changing the practice of research. **EMBO Reports**, v. 15, n. 12, p. 1228-1232, 2014.

CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B. Effects of poultry litter biochar on electrochemical properties of electronegative soils. **International Journal of Current Research**, v. 8, p. 40834-40837, 2016.

DEJENE, D.; TILAHUN, E. Role of biochar on soil fertility improvement and greenhouse gases sequestration. **Horticulture International Journal**, v. 3, n. 6, p. 291-298, 2019.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285-296, 2021.

FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B.; TITO, G. A. Soil Chemical amendments and the macronutrients mobility evaluation in Oxisol treated with biochar. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 10, p. 238-247, 2018.

FIDEL, R. B.; LAIRD, D. A.; PARKIN, T. B. Effect of Biochar on soil greenhouse gas emissions at the laboratory and field scales. **Soil Systems**, v. 3, n. 1, p. 1-18, 2019.

FIGUEREDO, W. N.; MACÊDO, T. T. S.; CARDOSO, G. M. P.; FERNANDES, E. T. B. S. Análise bibliométrica da produção brasileira sobre a

COVID-19. **Revista Baiana de Enfermagem**, Salvador, BA, v. 34, p. 1-10, 2020.

JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F. G. A.; VELDE, M. VAN DER; 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.

JIANG, C.; BO, J.; XIAO, X.; ZHANG, S.; WANG, Z.; YAN, G.; WU, Y.; WONG, C.; HE, H. Converting waste lignin into nano-biochar as a renewable substitute of carbon black for reinforcing styrene-butadiene rubber. **Waste Management**, v. 102, p. 732-742, 2020.

LAURENTINO, L. G. S. **Influência do biocarvão na fertilidade do substrato, emergência e crescimento inicial de mudas de mamão e melão**. 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.). **Biochar for environmental management: science and technology**. 1. ed. London: Earthscan, 2009. 448p.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015. 994p.

LIMA, W. B.; FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B. Adsorption of Zinc in Ultisol and Entisol Amended with

Poultry Litter Biochar. **World Applied Sciences Journal**, v. 35, n. 1, p. 142-150, 2017.

MACHADO, A. B.; SILVA, A. R. L.; CATAPAN, A. H. Bibliometria sobre concepção de habitats de inovação. **Navus-Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 6, p. 88-96, 2016.

MATHERI, A. N.; ELOKO, N. S.; NTULI, F.; NGILA, J. C. Influence of pyrolyzed sludge use as an adsorbent in removal of selected trace metals from wastewater treatment. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 2, p. 100018, 2020.

MEDEIROS, I. V.; VIEIRA, A.; RAVIANO, G.; GONÇALVES, B. S. Revisão sistemática e facilitada por um canvas para visualização de informação. **Revista Brasileira de Design de Informação**, São Paulo, SP, v. 12, n. 1, p. 93-110, 2015.

MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; SILVA, F. A. S.; FERNANDES, J. D. Litter biochar and rock dust MB4 on release available phosphorus to soils. **Agricultural Sciences**, v. 6, p. 1367-1374, 2015.

MORADI, N.; RASOULI-SADAGHIANI, M. H.; SEPEHR, E. The effect of biochar produced from plant residues (pruning waste of trees and straw) on some of the microbiological indices in calcareous soils. **Iranian Journal of Soil and Water Research**, v. 50, n. 6, p. 1381-1394, 2019.

SALAZAR-LÓPEZ, N. J.; SALMERÓN-RUIZ, M. L.; DOMÍNGUEZ-AVILA, J. A.; VILLEGAS-OCHOA, M. A.; AYALA-ZAVALA, J. F.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. Phenolic compounds from 'Hass' avocado peel are retained in the indigestible fraction after an in vitro gastrointestinal digestion. **Food Measure**, v. 15, p. 1982-1990, 2021.

TOKOVÁ, L.; IGAZ, D.; HORÁK, J.; AYDIN, E. Effect of Biochar Application and Re-Application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam Haplic Luvisol. **Agronomy**, v. 10, n. 7, p. 1005, 2020.

YANG, X.; ZHANG, S.; JU, M.; LIU, L. Preparation and modification of biochar materials and their application in soil remediation. **Applied Sciences**, v. 9, n. 7, p. 1365, 2019.

CAPÍTULO 2

Caracterização de material carbonizado e biocarvão derivados de cama de de aviário

Josely Dantas Fernandes

Lúcia Helena Garófalo Chaves

Jacqueline da Silva Mendes

Edilma Rodrigues Bento Dantas

Um dos desafios relacionados ao uso do biocarvão de cama de aviário diz respeito à variação de sua composição química, porque o uso de diferentes biomassas, como cama de aviário (casca, palha, sementes, bagaço, serragem, entre outros), sua permanência no galpão (que pode ser reaproveitado em mais de um lote de frangos) e a alimentação das aves e seus dejetos influenciam suas propriedades químicas e físicas. Vários autores citados por Mukherjee e Lal (2013) confirmam que os biocarvões não possuem as mesmas propriedades, pois suas características são controladas por fatores, como tipo de matéria-prima (pedaços de madeira, esterco animal, restos de colheita, cama de frango), condições de pirólise (temperatura final da pirólise, taxa de aquecimento - pirólise baixa versus rápida) e duração da carbonização. Portanto, os efeitos do biocarvão, quando aplicado ao solo, variam devido à diversidade de suas propriedades, como área superficial, porosidade, densidade do solo, capacidade de retenção de água e/ou produtos químicos (macro, micronutrientes e metais pesados) e resistência à penetração.

Devido ao aumento dos resíduos gerados pelo setor avícola, algumas empresas têm interesse em utilizar esses resíduos na produção de biocarvão, como tem ocorrido na empresa SPPT Pesquisa Tecnológica LTDA, visando à possibilidade de seu uso como condicionador de solo. Da mesma forma, o biocarvão pode ser produzido pelos agricultores, obtendo-se, dependendo da temperatura, um produto carbonizado (< 250°C) ou biocarvão (> 350°C).

O biocarvão da cama de aviário, uma vez submetido a diferentes tratamentos térmicos, pode ser caracterizado por meio de “análise imediata”, pela qual determina carbono fixado, umidade, voláteis, teor de cinzas do biocarvão; além disso, são determinados pH, condutividade elétrica e ponto de carga zero do biocarvão (Aller *et al.*, 2017). Quanto à temperatura utilizada na pirólise da cama de aviário, alguns estudos já foram realizados, como Sobik-Szołtysek *et al.* (2021), que estudaram a capacidade de sorção de metais pesados em biocarvões produzidos a 425, 525 e 752°C. Tsai e Chang (2021) e Tsai e Chang (2022) avaliaram os impactos de biocarvões pirolisados a 200, 300, 400, 500 e 600°C na mineralização do carbono do solo e na preservação de nutrientes e imobilização de contaminantes.

A relação entre as condições de produção da cama de aviário e as propriedades do biocarvão destinado a melhorar as propriedades do solo ainda é pouco conhecida, por isso, neste capítulo, são apresentados dois estudos de casos relacionados à caracterização de um biocarvão produzido em uma empresa e outro produzido em laboratório, já que os tratamentos térmicos afetam a composição final do material carbonizado (250°C) e pirolisado (350 e 450°C). Também é apresentado o valor do desempenho agrônômico desses materiais através das análises imediatas e dos rendimentos gravimétricos.

■ ESTUDO DE CASO 1

Caracterização de biocarvão de cama de aviário para uso agrícola (Chaves *et al.*, 2020)¹

Objetivou-se, com este estudo, apresentar as características químicas do biocarvão de cama de aviário pirolisado a 400°C, adquirido na empresa SPPT Tecnológica Research Ltda., e seu potencial como condicionador de solos. Para isso, a composição química do biocarvão foi analisada de acordo com os métodos utilizados para fertilizantes e corretivos (Brasil, 2014). A análise imediata seguiu a metodologia conforme ASTM: D1762–84 (2007), desenvolvida para carvão vegetal.

A análise da Espectroscopia no Infravermelho com Transformação de Fourier (FTIR) foi realizada no Perkin Elmer Fourier Transform Infrared (FTIR), série Spectrum 400, com o software Perkin Elmer. A análise foi conduzida no infravermelho médio e as amostras foram preparadas em pastilhas de KBr. Para obter uma impressão dos poros do biocarvão, foi visualizada a morfologia dos caracteres por microscopia eletrônica SEM Hitachi TM-1000.

A propriedade textural do biocarvão foi analisada via isotermas de adsorção-dessorção de nitrogênio. O aparelho utilizado foi o Micromeritics ASAP 2420 do LAMM no CETENE. A área superficial foi calculada de acordo com o método de Brunauer–Emmett–Teller (BET), enquanto a distribuição do tamanho dos poros foi obtida via método de Barrett–Joyner–Halenda (BJH) (1951). A determinação do ponto de carga zero (PCZ) foi realizada utilizando

1 . CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; MENDES, J. S.; DANTAS, E. R. B.; GUERRA, H. C.; TITO, G. A.; SILVA, A. A. R.; LAURENTINO, L. G. S.; SOUZA, F. G.; LIMA, W. B. Characterization of poultry litter biochar for agricultural use. *Sylwan*, v. 164, n. 6, p. 468-487, 2020.

do a metodologia denominada de “experimento dos 11 pontos”, descrita por Regalbuto e Robles (2004). As análises termogravimétricas (TG e DTG) foram realizadas em equipamento Perkin Elmer modelo Pyris 1 TGA, em atmosfera de ar sintético, com vazão de 20 mL/min, com cadinho de alumina e taxa de aquecimento de 10°C/min, em uma faixa de temperatura que variou entre 30 e 920°C. A massa utilizada foi de 4,482mg.

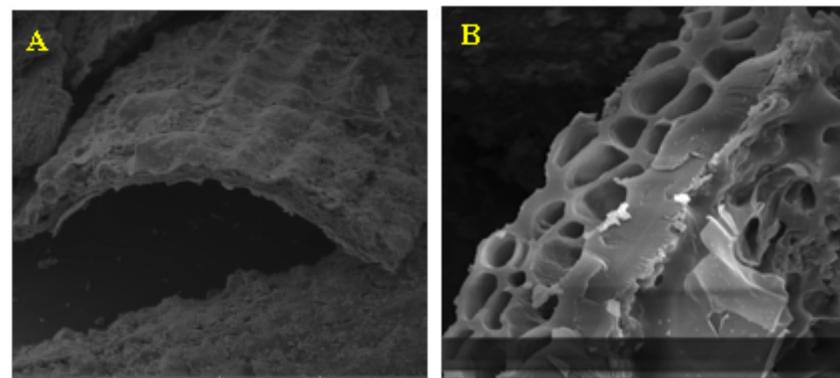
As análises de difração de raios X foram realizadas em temperatura ambiente, em equipamento Shimadzu XRD-7000, utilizando radiação Ka de cobre (1,5418 Å), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. O biochar foi examinado em uma faixa de 2 θ entre 10 e 80,0 graus a uma velocidade de 1°/min.

Os seguintes atributos foram encontrados no biocarvão: pH = 9,45; P₂O₅ = 7,78%; K₂O = 4,90%; Ca = 6,83%; Mg = 1,34%; Na = 0,73%; S = 0,74%; Fe = 0,46%; Mn = 0,09%; Cu = 0,04%; Zn = 0,08%; B = 0,01%; carbono orgânico = 39,77%, C/N = 11,53 e CTC = 38,89 cmol_c dm⁻³. O biocarvão de cama de aviário, quando aplicado ao solo, proporciona aumento de pH, CTC, carbono orgânico, P, K e outros elementos, que podem estar em formas mais solúveis e acessíveis do que na matéria-prima não pirolisada (Fernandes *et al.*, 2018).

Analisando o aspecto morfológico e a porosidade do biocarvão, percebe-se uma relativa uniformidade de poros em alguns pontos na superfície da amostra (Figura 1A-B).

Segundo Sharma *et al.* (2004), a biomassa utilizada no preparo do biocarvão, após iniciar a decomposição térmica, sofre modificação estrutural com a formação de poros. Os poros inicialmente observados quando pirolisados a baixa temperatura indicam o início da liberação dos gases voláteis aprisionados dentro da biomassa de origem (Zhao *et al.*, 2017).

Figura 1 – Micrografia do biochar produzido a partir de cama de aviário, imagem ampliada 250x (A) e 2000x (B)



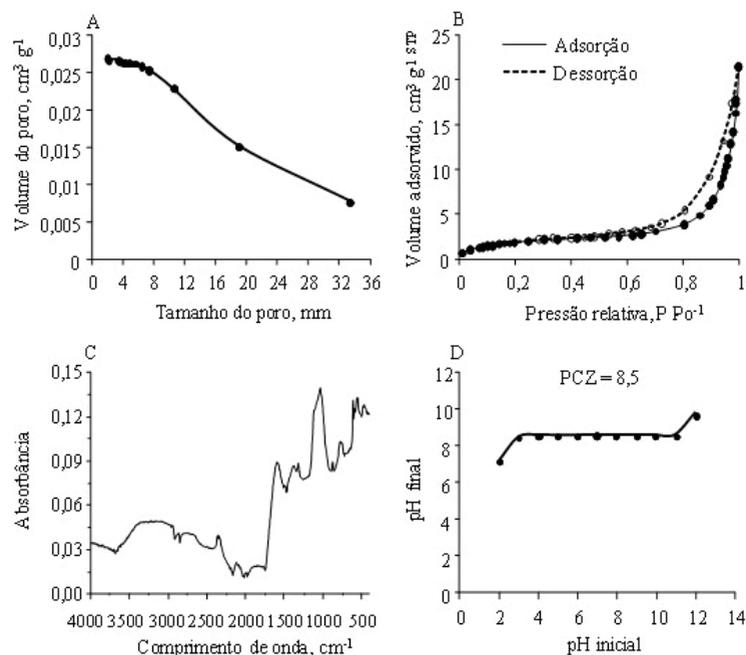
Acervo dos autores.

Com o aumento da temperatura, a estrutura porosa é aumentada, mas nem sempre em ordem uniforme e homogênea, indicando ainda, possivelmente, material volátil contido à estrutura. A porosidade é uma característica importante dos biocarvões, pois influenciam o transporte de fluidos, principalmente quando são utilizados como materiais adsorventes (Atkinson *et al.*, 2010). Além do mais, a adição de biocarvão tanto em solos arenosos como argilosos diminui a densidade e aumenta a retenção de água do solo, o que pode ser explicado pela natureza porosa do biocarvão (Ulyett *et al.*, 2014).

A análise por adsorção de N₂ permitiu a determinação da área superficial específica (BET), do volume de poro e do tamanho médio dos poros do biocarvão de cama de aviário. O biocarvão apresentou um tamanho médio de poros de aproximadamente 15,5 nm (Figura 2A), característico de mesoporos (2 a 50 nm) e uma área superficial de 7,37 m² g⁻¹. Durante o processo de pirólise da cama de aviário, há formação de macro, meso e microporos, de-

vido à perda de massa, em volume, dos materiais hemicelulose, celulose, lignina na forma de compostos voláteis, o que contribui para o aumento da área de superfície específica do biocarvão. O biocarvão caracterizado neste trabalho apresentou uma área superficial superior ao observado por Song e Guo (2012), cujo valor variou de 2,68 a 5,79 m² g⁻¹ utilizando cama de aviário pirolisado a 300 e 600°C, respectivamente.

Figura 2 - Isoterma de adsorção-dessorção do N₂ a 77,3 K (A), curva de distribuição de tamanho de poros (B), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (C) e pH PCZ para o biocarvão de cama de aviário (D)



Elaborado pelos autores.

A isoterma de adsorção-dessorção de N₂ para o biocarvão de cama de aviário (Figura 2B) assemelha-se à isoterma do tipo IV (Thommes *et al.*, 2015), característica de sólidos contendo mesoporos. A histerese natural ocorrida para essas frações é ocasionada pelo formato interno e condensamento do gás nos mesoporos, em partículas esferoidais de tamanho uniforme, compactas ou aglomeradas (Lowell *et al.*, 2004).

Observando o espectro do biocarvão (Figura 2C), percebeu-se uma banda larga a 3200-3400 cm⁻¹, que é atribuída a -OH a partir de H₂O ou grupos fenólicos (Chen *et al.*, 2008; Melo *et al.*, 2013). A absorção na região entre 2920 e 2885 cm⁻¹ (estiramento de CH) foi atribuída a grupos funcionais alifáticos (Cantrell *et al.*, 2012; Melo *et al.*, 2013); e o aumento na intensidade de banda na região de 1600 cm⁻¹ evidenciou a presença de cetonas e quinonas conjugadas (C=O e C=C). As bandas intensas a 1270 cm⁻¹ são designadas para grupos OH-fenólicos (Chen *et al.*, 2008) e a banda forte a 1030 cm⁻¹ é devida ao estiramento de CO e associada a grupos funcionais oxigenados de celulose, hemicelulose e grupos metoxílicos de lignina (Cantrell *et al.*, 2012; Bruun *et al.*, 2011). O aparecimento de bandas fracas entre 885 e 750 cm⁻¹ (CH aromático fora do plano) foi atribuído a um grau crescente de condensação dos compostos orgânicos presentes no biocarvão.

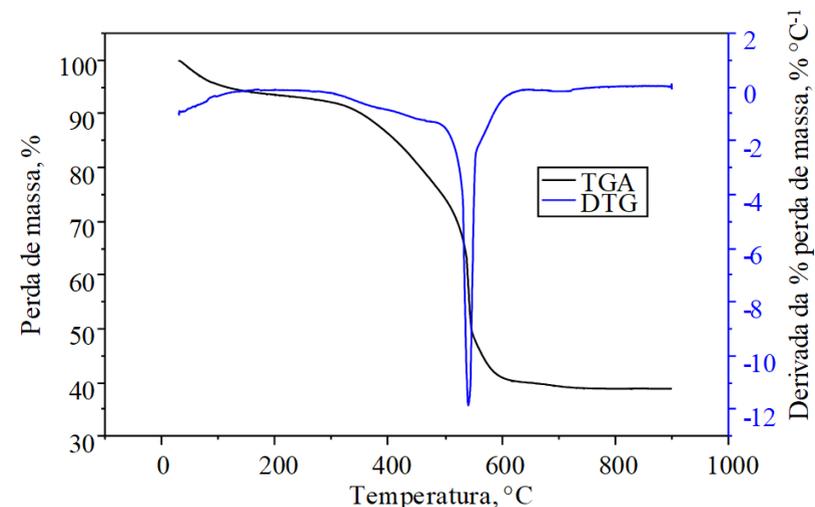
O comportamento desses grupos funcionais varia com o aumento do pH da solução. Em pH baixo, a maior parte dos grupos funcionais presentes nos biocarvões estão protonados e apresentam-se positivamente carregados. Em pH alto, esses grupos estão desprotonados e, portanto, negativamente carregados.

Em processos de adsorção, a determinação do ponto de carga zero (PCZ) é importante, uma vez que a variação do pH da solução influencia diretamente as cargas elétricas superficiais do biocarvão e, conseqüentemente, as interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorvato (Oh *et al.*, 2012). Quando o pH da solução corresponde ao valor do pH_{PCZ} , a superfície do biocarvão não apresenta cargas elétricas; como a carga superficial do biocarvão vai depender do pH da solução na qual ele está inserido, em pH inferior ao pH_{PCZ} , a carga superficial do biocarvão será positiva ($pH < pH_{PCZ}$); e, ao contrário, em pH acima do pH_{PCZ} , a sua carga superficial será negativa (Abdel-Fattah *et al.*, 2014). Realizando a média aritmética do logaritmo do inverso da concentração hidrogeniônica dos valores que se apresentam constantes no pH final, após o tempo de equilíbrio da solução, obteve-se o valor do pH_{PCZ} igual a 8,5 (Figura D).

Como o biocarvão adquirido na empresa SPPT possui um pH de 9,45, ele possui superfície carregada negativamente e, em condições naturais, poderá ser utilizado como adsorvente de cátions. Essa tendência foi observada em outros estudos de adsorção, nos quais a capacidade de adsorção correlacionou-se proporcionalmente com o pH da solução (Huang *et al.*, 2011; Liao *et al.*, 2015).

Através da análise termogravimétrica (Figura 3), há uma degradação do biocarvão da cama de aviário devido ao aumento da temperatura.

Figura 3 - Curvas TG / DTG do biocarvão, sob aquecimento de 10 °C.min⁻¹, em atmosfera de ar sintético



Elaborado pelos autores.

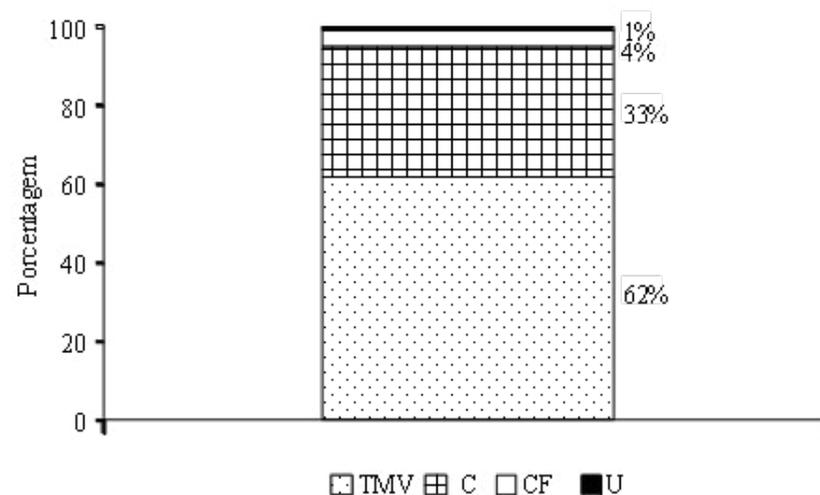
Três áreas de perda de massa foram observadas na curva TGA. A primeira apresentou redução de 6,37%, em temperatura variando entre 30 e 208°C, geralmente atribuída à perda de água. A segunda região, entre 261 e 678°C, teve uma redução de massa de aproximadamente 53%, o que pode estar relacionado à combustão dos compostos carbonílicos e carboxilados remanescentes do processo de pirólise. Após 678°C, a perda de massa observada no termograma aparece de forma contínua e fraca, representando uma perda total de aproximadamente 61%.

Conforme mostrado na Figura 3, observa-se que o biocarvão da cama de aviário tem um pico com maior intensidade entre 250 e 650°C, apresentando maior perda de massa nesta temperatura, conforme já observado pela curva TGA, provavelmente relacionado à perda de hemicelulose e celulose. As hemiceluloses são os componentes menos estáveis termicamente, sendo comumente degradadas entre 180 e 350°C (Kim *et al.*, 2006), enquanto a celulose sofre degradação entre 305 e 375°C (Shafizadeh, 1985) e a lignina entre 250 e 500°C (Kim *et al.*, 2006; Shafizadeh, 1985).

A cama de aviário utilizada neste trabalho é constituída principalmente por bagaço de cana-de-açúcar. Segundo ICIDCA/GEPLACEA/PNUD (1990), este subproduto da indústria sucroalcooleira, *in natura*, contém em média 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade e 2 a 3% de sólidos solúveis em água. Quimicamente, aproximadamente 41% de celulose, 25% de hemicelulose e 20% de lignina têm como base a massa seca do bagaço. As variações de massa registradas na análise termogravimétrica devem-se então, em sua maioria, à decomposição dos principais constituintes da biomassa utilizada no processo de pirólise.

A análise imediata separa os componentes da biomassa em termos de material volátil, cinzas, carbono fixo e umidade para avaliar a variação em suas proporções nos diferentes materiais formados pelo processo de transformação térmica (Mitchell *et al.*, 2013). As quantidades relativas de voláteis, cinzas, carbono fixo e umidade contidas no biocarvão em estudo estão representadas na Figura 4, cujas médias foram 62%, 33%, 4% e 1%, respectivamente.

Figura 4 - Relação das proporções de cada componente do biocarvão. Teor de massa volátil (TMV), cinzas (C), carbono fixado (CF) e umidade (U)



Elaborado pelos autores.

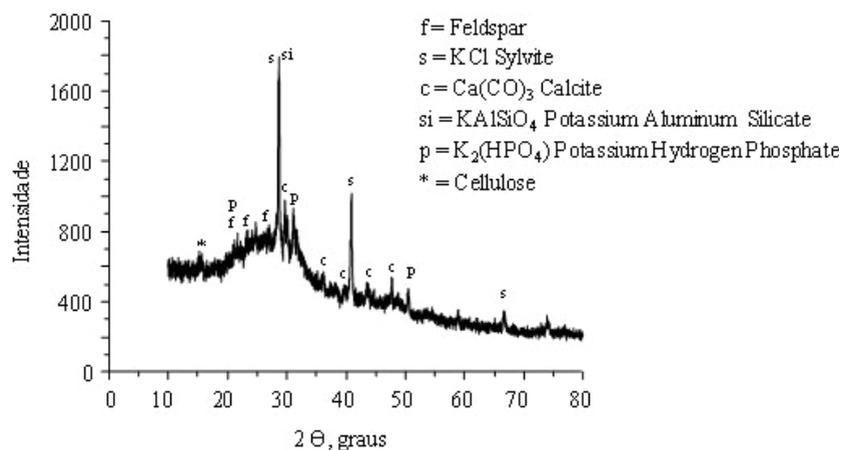
O material volátil é considerado a porção da massa do material original que se perde durante a pirólise, sendo composto por materiais lábeis. Sabe-se que seu teor varia de acordo com a matéria-prima utilizada no processo de pirólise, por exemplo, o biocarvão de madeira possui maior teor de material volátil quando comparado aos provenientes de resíduos culturais e dejetos animais. Além da biomassa, também são observadas mudanças na propriedade do biocarvão com a variação da temperatura utilizada no processo de pirólise (Enders *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013).

Os padrões de XRD do biocarvão da cama de aviário foram complexos, com padrões de picos largos com algum grau de ordem

em curto alcance, indicando que o material é amorfo, mas também tem picos sobrepostos (Figura 5). Tais características dificultaram a atribuição de picos menores a minerais específicos.

Observa-se que os picos mais fortes em 2θ $28,346^\circ$ ($d = 3,146 \text{ \AA}$) e $40,509^\circ$ ($d = 2,225 \text{ \AA}$) indicam a presença de componentes inorgânicos com o elemento potássio em sua constituição, como a silvita; e a 2θ $28,790^\circ$ ($d = 3,098 \text{ \AA}$) para silicato de alumínio e potássio. A presença de calcita (CaCO_3) evidencia, conforme relatado anteriormente, o caráter alcalino do biocarvão de cama de aviário.

Figura 5 - Difração padrão de raios X do biocarvão de cama de aviário



Elaborado pelos autores.

O cálcio pode formar diferentes compostos dependendo da temperatura de pirólise usada durante a produção de biocarvão. A forma mineral na qual o cálcio é encontrado no biocarvão influencia sua capacidade de neutralizar solos ácidos. Com valores de pKa

de 1,27 a 4,28, o oxalato pode ser menos eficaz na neutralização de solos ácidos quando comparado ao carbonato, que possui um pKa de 6,4 a 10,3 (Goldberg *et al.*, 2002).

Compostos de feldspato [Ortoclásio (KAlSi_3O_8) e Albita ($\text{Al}_1.26\text{Si}_2.74\text{O}_8$)] e fosfato de potássio ($\text{K}_2(\text{HPO}_4)$) também foram identificados, confirmando o resultado da análise química do biocombustível de cama de aviário que apresentou um teor considerável de P, K, Ca e Mg. Como a cristalinidade da amostra deste trabalho não é inerente ao biocarvão, acredita-se que a presença de minerais inorgânicos existentes nele se deva provavelmente à existência de solo na biomassa utilizada como cama no aviário, aos excrementos de aves (que metabolizam aproximadamente 70% dos nutrientes) e à ração fornecida, que contém, além do milho e da soja em sua constituição, um composto denominado núcleo (complexo vitamínico mineral), fosfato bicálcico e calcário calcítico.

Conforme verificado anteriormente pela curva termogravimétrica (TG), 53% da massa do biocarvão da cama de aviário foram perdidos em temperaturas variando entre 261 e 678°C , devido à queima de orgânicos. No entanto, de acordo com Koutcheiko *et al.* (2007), a decomposição de minerais inorgânicos, como fosfatos, não pode ser excluída. Ainda segundo esses autores, a perda de massa de biocarbonos acima de 800°C pode ser atribuída à decomposição do CaCO_3 e, provavelmente, também à oxidação de algum carbono orgânico estável, adsorvido em superfícies de silicato mineral.

Com base no exposto, o biocarvão de cama de aviário pode ser utilizado no cultivo de lavouras e aplicações ambientais para melhorar a fertilidade do solo. Além disso, a utilização dessa cama

para produção de biocarvão por meio do processo de pirólise é uma alternativa para gerenciar o descarte eficiente dessa biomassa.

O biocarvão possui uma distribuição de mesoporos em sua estrutura e uma área superficial de 7,37 m² g⁻¹. Além disso, a presença de grupos funcionais (-OH e C = O) e pH ZCP igual a 8,5 mostra que possui carga elétrica superficial negativa e, em condições naturais, pode ser utilizado como adsorvente de cátions.

A presença de componentes inorgânicos no biocarvão analisado justifica os teores consideráveis de nutrientes, principalmente fósforo e potássio. Além disso, a presença de calcita explica o caráter alcalino do biocarvão da cama de aviário.

■ ESTUDO DE CASO 2

Caracterização da biomassa derivada de cama de aves submetida a diferentes tratamentos térmicos (Fernandes *et al.*, 2022a²; Fernandes *et al.*, 2022b³)

Uma vez que as características físicas, químicas e estruturais dos biocarvões variam em função do tratamento térmico e dada a significativa produção de cama de aviário pelo setor avícola no

2 . FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; DANTAS, E. R. B.; LAURENTINO, L. G.; CAVALCANTE, A. R.; KUBO, G. T. M. Thermal treatment of poultry litter: Part I. Characterization by immediate analysis and gravimetric yield. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 9, p. 633-639, 2022a.

3 . FERNANDES, J. D.; GUERRA, H. O. C.; CHAVES, L. H. G.; LAURENTINO, L. G. S.; CAVALCANTE, A. R.; KUBO, G. T. M. Thermal treatment of poultry litter: Part II. Evaluation of structural and morphological characteristics. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 9, p. 680-687, 2022b.

Brasil, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da temperatura nas características físicas, químicas e estruturais de biomassa da cama de aviário submetida a tratamentos térmicos.

Para isso, foi coletado material de cama de aviário, o qual é composto por bagaço de cana-de-açúcar, fezes e ração dos frangos, para, em seguida, passar por procedimentos térmicos.

A caracterização química da cama de aviário foi realizada no Laboratório de Análise de Solos e Foliar, conforme Brasil (2014), e apresentou como resultado: pH = 8,24; N total = 2,78%; C = 37,57%; P₂O₅ total = 2,08; K₂O total = 2,48%; Ca = 2,40%; Mg = 0,68%; S = 0,17%; B = 0,01%; Zn = 0,02%; Cu = <0,01%; Mn = 0,02%; Fe = 0,26%; Umidade = 13,29%.

Os experimentos de carbonização foram realizados em recipientes de porcelana contendo 400g de amostras de cama de aviário colocados em mufla com controlador microprocessador digital (Jung, J200). O processo térmico utilizado neste trabalho foi lento e os tratamentos corresponderam a três temperaturas de degradação térmica, 250, 350 e 450°C, em triplicata, seguindo uma taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹. Após atingirem a temperatura, as amostras permaneceram na mufla por três horas. Quando aquecida a 250°C, a amostra é carbonizada; quando as amostras submetidas a temperaturas maiores ou iguais a 350°C, são os biocarvões, conseqüentemente, os resíduos produzidos nos diferentes tratamentos são rotulados como: CCA250 (cama de aviário carbonizada a 250°C), BCA350 e BCA450 (cama de aviário pirolisada a 350°C e 450°C, respectivamente).

Para a caracterização das amostras de CCA250, BCA350 e BCA450, estas foram analisadas quimicamente de acordo com a norma ASTM: D1762-84 (2007), elaborada para carvão vegetal, determinando assim o carbono fixado, as cinzas, a matéria volátil e o teor de umidade. Além disso, foram determinados o pH, a condutividade elétrica e o ponto de carga zero (PCZ) das amostras.

Para obter uma impressão dos poros dos materiais, a morfologia dos caracteres foi visualizada por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV (Hitachi TM-1000). A propriedade textural foi analisada através de isotermas de adsorção-dessorção de nitrogênio. O aparelho utilizado foi o Micromeritics ASAP 2420 LAMM no CETENE. A área superficial foi calculada de acordo com o método Brunauer-Emmett-Teller (BET), enquanto a distribuição do tamanho dos poros foi obtida usando o método Barrett-Joyner-Halenda (BJH) (1951). A análise de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada no Perkin Elmer Fourier Transform Infrared (FTIR), série Spectrum 400, com o software Perkin Elmer. A análise foi realizada no infravermelho médio e as amostras foram preparadas em pastilhas de KBr. As análises de difração de raios X foram realizadas à temperatura ambiente, em um aparelho Shimadzu XRD-7000, utilizando radiação Ka de cobre (1,5418 Å), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. As amostras foram examinadas em um intervalo de 2 θ entre 10 e 80,0 graus a uma velocidade de 1°/min.

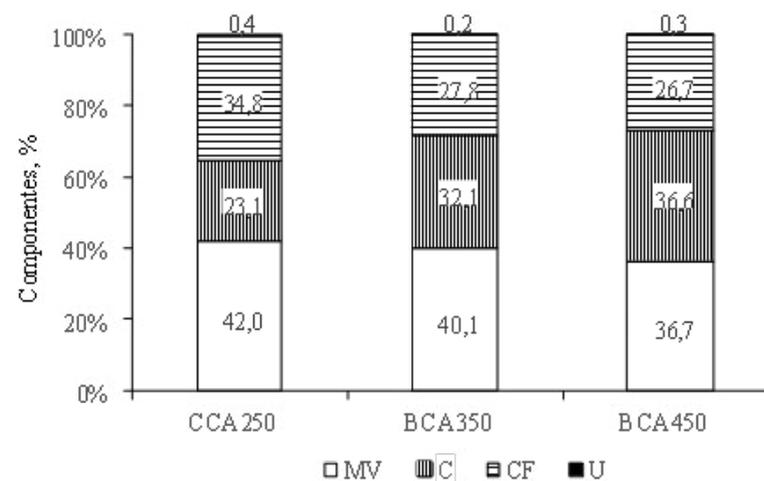
Os resultados de carbono fixo, cinzas, matéria volátil, umidade e rendimento gravimétrico foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias obtidas nos diferentes tratamentos (250, 350 e 450°C) foram comparadas entre si por meio do teste

de Tukey, ao nível de significância de 5%. Todos os cálculos estatísticos foram realizados no programa SISVAR 5.4 (Ferreira, 2014).

A quantidade relativa das porções voláteis, cinzas, carbono fixado e umidade contidas na cama de aviário carbonizada (CCA250) e nos biocarvões pirolisados a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450) são mostrados na Figura 1.

De maneira geral, observa-se que os percentuais dos componentes matéria volátil e carbono fixado no tratamento CCA250 foram maiores do que nos biocarvões produzidos nas temperaturas 350 e 450°C, ao contrário do percentual de cinzas, que foi menor no tratamento CCA250 (Figura 1).

Figura 1 - Relação das proporções de matéria volátil (MV), cinzas (C), carbono fixado (CF) e umidade (U) da cama de aviário carbonizada (CCA250) e nos biocarvões pirolisados a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450)



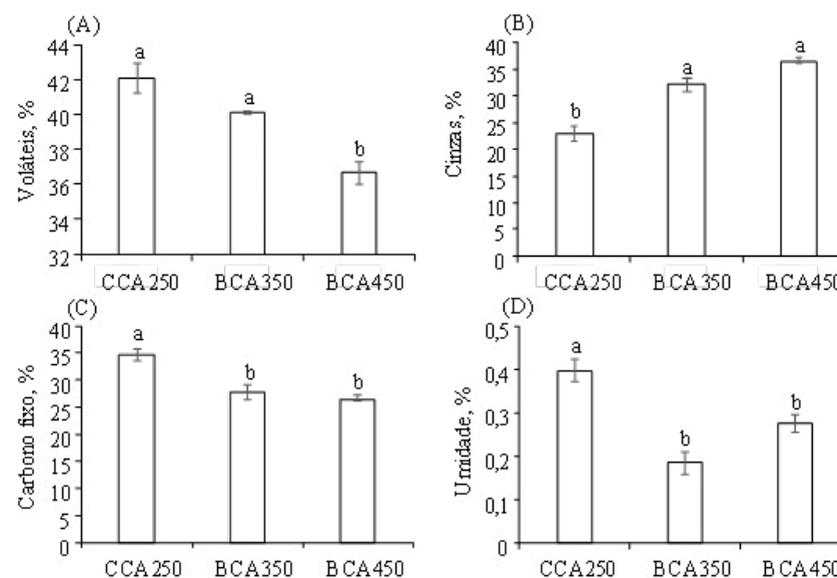
Elaborado pelos autores.

O material volátil é a porção da massa do material original perdida durante a pirólise, sendo composto por materiais lábeis. Por esse motivo, à medida que a temperatura de pirólise aumenta, a porção desses materiais diminui (Figura 1), pois eles são facilmente liberados (Devens *et al.*, 2018). No CCA250, houve reduções de 1,9 e 5,3 unidades de voláteis quando em comparação com BCA350 e BCA450, respectivamente (Zhao *et al.*, 2013).

De acordo com a análise de variância para todos os componentes dos tratamentos analisados, houve diferença significativa entre pelo menos um dos tratamentos, cujos valores de $Pr > Fc$ foram: 0,0024; 0,0004; 0,0022 e 0,0024 para matéria volátil, cinzas, umidade e carbono fixado, respectivamente; e pelo teste de Tukey, foi possível saber quais tratamentos diferiram significativamente (Figura 2).

O teor de cinzas está relacionado ao teor de nutrientes presentes na matéria-prima. Essa parte da matéria é determinada após sua combustão completa, quando todos os elementos orgânicos são volatilizados (Devens *et al.*, 2018). Neste estudo, o teor de cinzas aumentou em função da temperatura de pirólise empregada; as médias obtidas nos tratamentos BCA350 e BCA450 não diferiram estatisticamente, com aumentos correspondentes a 38,96 e 58,44%, respectivamente, quando comparadas ao observado no tratamento CCA250 (Figura 2B). O menor teor de cinzas é justificado pela menor temperatura utilizada no processo e pela composição desse biocarvão, composto principalmente por material volátil e carbono fixado.

Figura 2 - Matéria volátil (A), cinzas (B), carbono fixado (C) e umidade (D) analisados na cama de aviário carbonizada a 250°C (CCA250) e cama de frango pirolisada a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450)



Elaborado pelos autores.

As mesmas letras minúsculas indicam que não há diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey em $p < 0,05$. As barras verticais representam o erro padrão ($n = 6$ repetições).

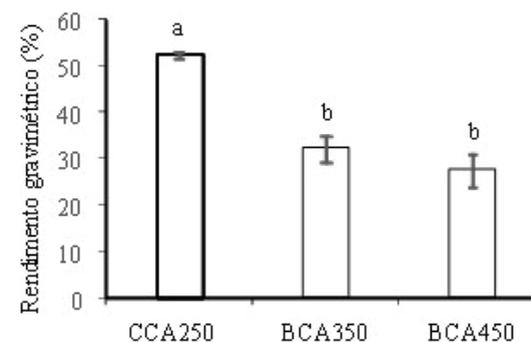
O teor de carbono fixado (CF) é a porção do material em sua forma mais resistente que permanece no biocarvão após a remoção dos materiais voláteis, geralmente arranjados em cadeias aromáticas (Devens *et al.*, 2018). Neste estudo, o maior teor de CF

(34,82%) foi encontrado em CCA250, diferindo estatisticamente das médias obtidas nas temperaturas de 350 e 450°C (Figura 2C). Esse resultado sugere que a variação do teor de carbono fixado em função da temperatura depende da biomassa utilizada e, no caso da cama de aviário, do manejo e do período em que a cama permanece no aviário.

O teor médio de umidade da cama de aviário (base úmida) utilizada neste estudo foi de 29,7%. Sob tratamento térmico, a biomassa geralmente começa a perder umidade em temperaturas a partir de 50°C, caracterizando o primeiro estágio da decomposição, por isso sua fração no biocarvão é baixa (Sadaka *et al.*, 2014). Neste estudo, independentemente do tratamento utilizado, as amostras apresentaram umidade média inferior a 1%, com o maior teor (0,4%) a 250°C, diferindo significativamente dos níveis de 0,19 e 0,27% registrados no BCA350 e BCA450, respectivamente.

As massas obtidas após o processo de conversão térmica apresentam uma diminuição gradativa do rendimento com o aumento da temperatura de pirólise (Figura 3). De acordo com Shahbaz *et al.* (2020), isso se deve ao aumento da degradação da celulose, hemicelulose e lignina gerado nas condições de pirólise em função do aumento da temperatura. Além disso, o teor de cinzas presente na matéria-prima (cama de aviário) também influencia o rendimento do biocarvão produzido.

Figura 3 - Rendimento gravimétrico da cama de aviário carbonizada a 250°C (CCA250) e pirolisada a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450)



Elaborado pelos autores.

Letras minúsculas comparam as médias das amostras pelo teste de Tukey em 0,05. As barras verticais representam o erro padrão (n = 6 repetições)

Ainda ao analisar a Figura 3, pode-se observar que o tratamento CCA250 promoveu um rendimento de 52,3%, significativamente superior às massas pirolisadas nas temperaturas de 350 e 450°C, com rendimentos de 32,03 e 27,49%, respectivamente.

As amostras analisadas apresentaram aumento contínuo da condutividade elétrica (CE) associada às temperaturas de processo, cujos valores corresponderam a 7,270, 7,226 e 7,675 dS m⁻¹ na aplicação de 250, 350 e 450°C, respectivamente. Esse comportamento pode estar correlacionado com a perda de material volátil, resultando na concentração de elementos na fração cinza (Cantrell *et al.*, 2012). As temperaturas 250, 350 e 450°C também influenciaram o pH das amostras, que apresentaram valores alcalinos, ou seja, 7,55, 8,69 e 9,66, respectivamente.

A determinação do ponto de carga zero (PCZ) é importante, pois a variação do pH da solução influencia diretamente as cargas superficiais do biocarvão e, conseqüentemente, as interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorvato (Chaves *et al.*, 2020). Os valores de pHPCZ nos tratamentos CCA250, BCA350 e BCA450 corresponderam a 7,95, 8,48 e 8,73, respectivamente. Com exceção do CCA250, que tinha um pH de 7,55, os biocarvões BCA350 (pH = 8,69) e BCA450 (pH = 9,66) tinham uma superfície carregada negativamente e, em condições naturais, podem ser usados como um adsorvente de cátions (Liao *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2019).

O processo de degradação térmica influenciou todos os parâmetros descritos na Tabela 1. Com exceção do tamanho dos poros, todos os outros parâmetros foram aumentados com o aumento da temperatura de 250 para 450°C. Como resultado, as amostras CCA250, BCA350 e BCA450 apresentaram área superficial (SA) de 1,301, 3,375 e 3,444 m² g⁻¹, respectivamente.

Tabela 1 - Área superficial Brunauer–Emmett e Teller (BET) e porosidade da cama de aviário carbonizada a 250°C (CCA250) e pirolisada a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450)

AMOSTRA	BET ÁREA SUPERFICIAL (m ² g ⁻¹)	VOLUME TOTAL DOS POROS (cm ³ g ⁻¹)	ÁREA SUPERFICIAL DOS MICROPOROS (m ² g ⁻¹)	VOLUME DOS MICROPOROS (cm ³ g ⁻¹)	LARGURA MÉDIA DOS POROS (nm)
CCA250	1,301	0,0041	1,237	0,0005	29,06
BCA350	3,375	0,0129	0,238	0,00003	14,83
BCA450	3,444	0,0128	1,453	0,0006	16,10

Elaborado pelos autores.

Com a perda dos compostos voláteis, formam-se macro, meso e microporos, que aumentam a área superficial específica

do biocarvão. Além disso, amostras de biocarvão com maiores áreas superficiais, devido à sua porosidade, quando aplicadas ao solo, melhoram sua estrutura, aumentando significativamente a capacidade total de retenção de água e servindo de habitat para microrganismos do solo (Lehmann; Joseph, 2015).

A presença de poros na cama de aviário carbonizada a 250°C (Tabela 1) indicou que gases voláteis aprisionados na biomassa original foram liberados (Zhao *et al.*, 2017). Com o aumento da temperatura (250 a 450°C), a estrutura porosa e o volume total de poros aumentaram 212,19%.

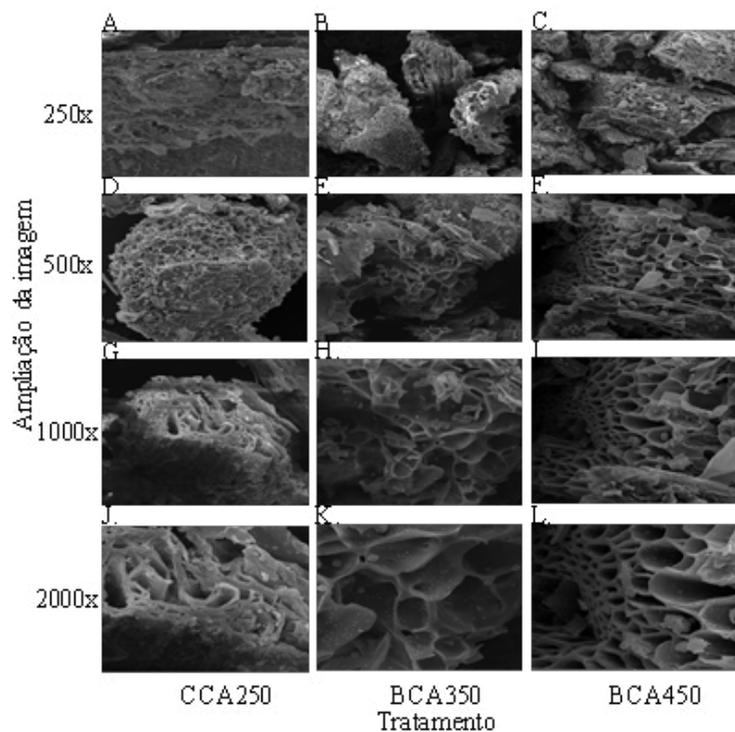
Os menores valores de área superficial e volume de poros dos microporos no BCA350, quando comparados aos tratamentos CCA250 e BCA450, indicaram que a formação dessas estruturas nem sempre ocorrem de forma uniforme e homogênea, ou porque, quando as matérias-primas foram parcialmente carbonizadas, o material volátil ainda está contido nessas estruturas, não aumentando o volume dos poros.

A análise morfológica permitiu que as amostras fossem analisadas quanto a massa, tamanho, forma e estrutura. Ao analisar a imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície da cama de aviário carbonizada a 250°C (CCA250) e pirolisada a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450), foi possível observar uma evolução de rearranjos microestruturais como trincas e poros devido ao aumento da temperatura utilizada no processo (Figuras 4A, 4B, 4C, 4D, 4E, 4F, 4G, 4H, 4I, 4J, 4K, 4L).

A presença de poros no tratamento CCA250 (Figuras 4A, 4D, 4G, 4J) indicou que, a 250°C, houve liberação de gases voláteis esgotados pela biomassa de origem, corroborando os achados de Zhao *et al.* (2017). Além disso, a estrutura porosa aumentou em função da temperatura empregada, conforme descrito na tabela

anterior, mas não em ordem uniforme e homogênea, possivelmente indicando também material volátil aderido à estrutura, como mencionado no item acima sobre porosidade.

Figura 4 - Microscopia eletrônica de varredura da cama de aviário carbonizada a 250°C (A, D, G e J) e pirolisada a 350°C (B, E, H e K) e 450°C (C, F, I e EU). Imagem ampliada 250x (A, B e C), 500x (D, E e F) 1000x (G, H e I) e 2000x (J, K e L)



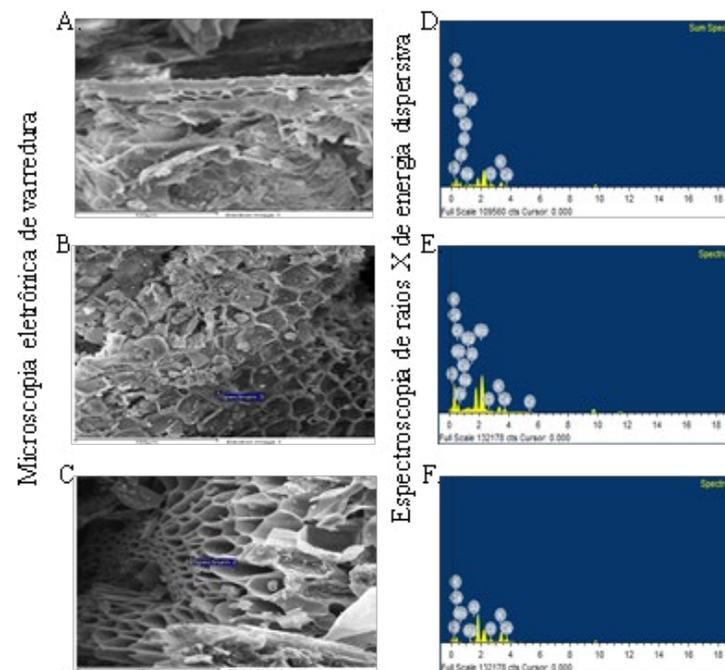
Elaborado pelos autores.

Os poros mais significativos observados no biocarvão produzido a 450°C (BCA450) resultaram da perda mais significativa de materiais voláteis (MV) (Figuras 4C, 4F, 4I, 4L). O menor teor de

MV (36,7%), verificado em BCA450, apresentou sua perda mais significativa durante a pirólise, cujo valor diferiu quando comparado aos demais tratamentos, ou seja, 42 e 40,1% de MV em CCA250 e BCA350, respectivamente.

As amostras obtidas nos diferentes processos térmicos foram analisadas por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) usando varreduras pontuais (Figuras 5A, 5B, 5C) para verificar os elementos presentes na superfície dos biocarvões (Figuras 5D, 5E, 5F).

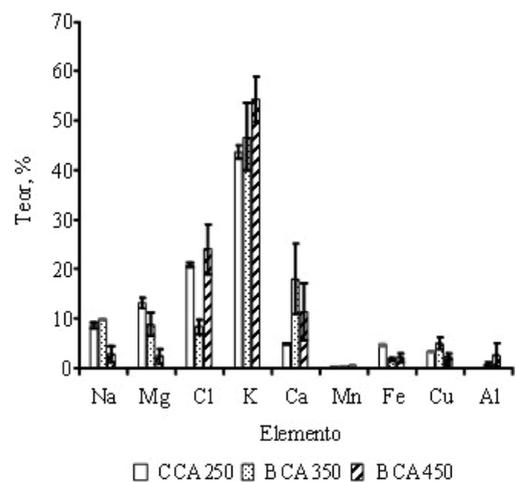
Figura 5 - Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva de raios X correspondentes a varreduras pontuais marcadas para cama de aviário carbonizada a 250°C (A e D) e pirolisada a 350°C (B e E) e 450°C (C e F)



Elaborado pelos autores.

Os elementos sódio (Na), magnésio (Mg), cloro (Cl), potássio (K), cálcio (Ca), manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu) e alumínio (Al) foram identificados em os diferentes tratamentos (Figura 6). Independentemente da temperatura empregada, as amostras apresentaram alto teor de potássio em sua constituição, cujos valores aumentaram em função da temperatura, variando entre 43,67 e 54,34% a 250 e 450°C, respectivamente. Os demais elementos também apresentaram variação em seus teores em função da temperatura utilizada, apresentando os maiores valores nas seguintes temperaturas: Cl (23,96%) e Al (2,64%) a 450°C; Ca (17,98%), Na (9,83%) e Cu (5,0%) a 350°C; e Mg (13,0%) e Fe (4,70%) a 250°C. O manganês correspondeu a apenas 0,38, 0,25 e 0,41% da composição elementar das amostras obtidas a 250, 350 e 450°C, respectivamente.

Figura 6 - Análise semiquantitativa por EDS dos elementos de superfície das amostras de cama de aviário carbonizadas a 250°C (CCA250) e pirolisadas a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450)



Elaborado pelos autores.

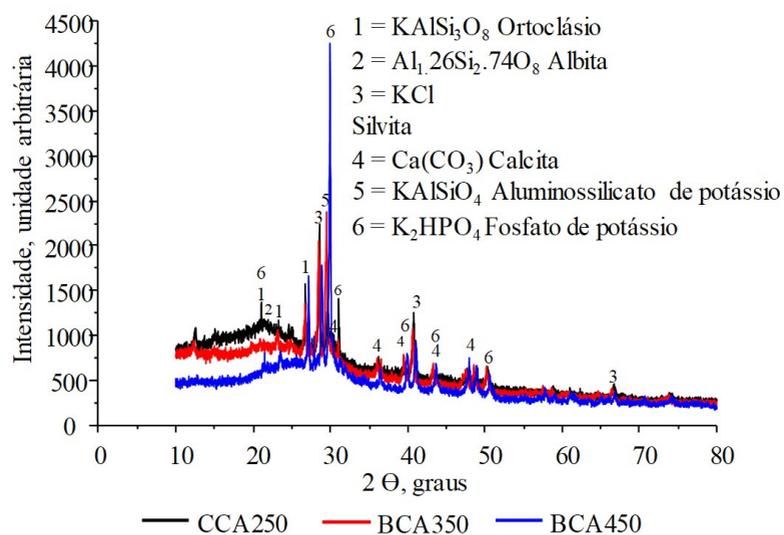
O fósforo (P), apesar de apresentar alto teor no biocarvão da cama de aviário (Chaves *et al.*, 2020), não foi identificado por EDS, independentemente da temperatura utilizada. Esse resultado sugere que o P pode estar associado a compostos orgânicos complexos dentro da célula, relativamente estáveis em baixas temperaturas de degradação (Lehmann; Joseph, 2015). No entanto, após 100 dias de incubação com doses crescentes de biocarvão no argissolo e no latossolo, essas amostras de solo, analisadas quanto ao fósforo disponível no solo, mostraram que o biocarvão é uma fonte potencial de fósforo, principalmente para solos intemperizados (Mendes *et al.*, 2015). Além disso, em relação ao estudo da adsorção de metais pesados pelo biocarvão, observou-se, nessas mesmas amostras, que o biocarvão aumentou a adsorção de zinco após esse mesmo período de incubação (Lima *et al.*, 2017). Da mesma forma, a presença de biocarvão no solo influencia a adsorção de cádmio (Chaves *et al.*, 2021) e aumenta a fertilidade do solo, influenciando o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento das culturas (Mendes *et al.*, 2021).

De acordo com a difração de raios X, os padrões de XRD da cama de aviário carbonizada a 250°C (CCA250) e pirolisada a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450) foram semelhantes entre si. Este resultado indica material amorfo com picos sobrepostos (Figura 7). Tais características dificultaram a atribuição de picos menores a minerais específicos.

Observa-se que os picos mais fortes em 2θ 28,346° ($d = 3,146 \text{ \AA}$) e 40,509° ($d = 2,225 \text{ \AA}$) indicam a presença de componentes inorgânicos com o elemento potássio em sua constituição, como a silvita [KCl]; e em 2θ 28,790° ($d = 3,098 \text{ \AA}$), para silicato de alumínio e potássio (KAlSiO_4). A presença dos minerais de potás-

sio justifica a alta concentração deste elemento nos tratamentos CCA250, BCA350 e BCA450, corroborando o que foi discutido anteriormente através da análise EDS. A calcita (CaCO_3) nas amostras aponta o caráter alcalino do biocarvão da cama de aviário, e sua presença é atribuída ao uso de calcário calcítico na dieta das galinhas (Chaves *et al.*, 2020; Domingues *et al.*, 2017).

Figura 7 - Padrão de difração de raios X de amostras de cama de frango carbonizadas a 250°C (CCA250) e pirolisadas a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450)



Elaborado pelos autores.

Compostos de feldspato [Ortoclásio (KAlSi_3O_8) e Albita ($\text{Al}_{1,26}\text{Si}_{2,74}\text{O}_8$)] e fosfato de potássio ($\text{K}_2(\text{HPO}_4)$) (Figura 4) também foram identificados, confirmando o resultado da análise química do biocarvão da cama de aviário, que apresentou considerável teores de K, Ca e Mg (Figura 6).

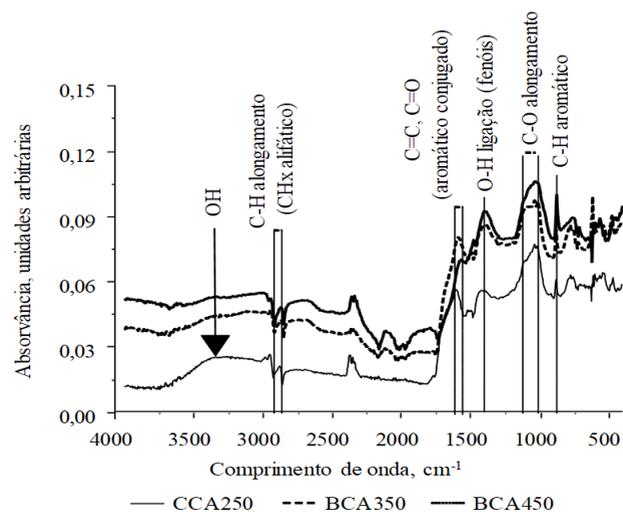
Os espectros de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram semelhantes entre os tratamentos CCA250, BCA350 e BCA450 (Figura 8). Depois que a biomassa foi submetida ao processo térmico, a intensidade de todas as bandas funcionais orgânicas permaneceu praticamente inalterada, independentemente do tratamento. Esse comportamento pode estar associado ao alto teor de cinzas encontrado na cama de aviário, que protege os compostos orgânicos contra a degradação térmica (Domingues *et al.*, 2017).

A banda larga observada no comprimento de onda de 3200-3400 cm^{-1} é atribuída a -OH de H_2O ou a grupos fenólicos (Chen *et al.*, 2008; Melo *et al.*, 2013). No entanto, as amostras BCA350 e BCA450 não apresentaram picos de hidroxila nessas regiões; a perda da funcionalidade OH é consequência das reações de decarbonilação, descarboxilação e desidratação promovidas com o aumento da temperatura de pirólise (Cuixia *et al.*, 2020).

A absorção na região entre 2920 e 2885 cm^{-1} (estiramento CH) foi atribuída a grupos funcionais alifáticos (Melo *et al.*, 2013), e o aumento da intensidade da banda na região de 1600 cm^{-1} mostrou a presença de cetonas e quinonas conjugadas ($\text{C}=\text{O}$ e $\text{C}=\text{C}$). As bandas intensas em 1270 cm^{-1} são atribuídas a grupos OH-fenólicos (Chen *et al.*, 2008), e a banda forte em 1030 cm^{-1} foi devido ao estiramento de CO e associado a grupos funcionais oxigenados de celulose, hemicelulose e grupos de lignina metoxilada (Cantrell *et al.*, 2012). O aparecimento de bandas fracas entre 885 e 750 cm^{-1} (CH aromático fora do plano) foi atribuído a um grau crescente de condensação dos compostos orgânicos presentes no biocarvão. Espectros menores que 601 cm^{-1} estão associados à presença de metais inorgânicos.

O conhecimento específico sobre a química dos grupos funcionais das amostras CCA250, BCA350 e BCA450 é essencial para prever e entender como eles reagirão no solo. Por exemplo, sabe-se que grupos funcionais como carboxílico, fenólico, hidroxila, carbonila ou quinina presentes no biocarvão da cama de aviário aumentam a sorção de metais pesados (Lu *et al.*, 2018); grupos carboxílicos, hidroxila e aromáticos têm maior capacidade de troca catiônica (CTC). Além disso, como substâncias hidrofóbicas, têm maior afinidade por compostos orgânicos (Ok *et al.*, 2016). Além disso, Fernandes *et al.* (2018) encontraram um aumento na CTC do solo após a aplicação de biocarvão de cama de aviário, provavelmente causado por cargas negativas devido à desprotonação do H⁺ presente nos grupos hidroxil fenólicos.

Figura 8 - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier de amostras de cama de aviário carbonizadas a 250°C (CCA250) e pirolisadas a 350°C (BCA350) e 450°C (BCA450)



Elaborado pelos autores.

De acordo com o exposto, pode-se dizer que os biocarvões BCA350 e BCA450 apresentaram os maiores teores de cinzas e os menores teores de carbono fixado, umidade e rendimento gravimétrico; o aumento das temperaturas utilizadas no processo provocou maiores valores de pH e CE. Além disso, o valor de PCZ, com exceção de CCA250, mostrou a presença de cargas negativas na superfície dos biocarvões; os resultados mostraram a presença de estruturas mesoporosas nas amostras CCA250, BCA350 e BCA450; e um aumento na área superficial e no volume dos poros como resultado do tratamento térmico. Análises pontuais de todas as amostras pela técnica SEM-EDS revelaram a presença de metais pesados e macro e micronutrientes. No entanto, o potássio, na constituição de silvita, silicato de alumínio e potássio, além de calcita e fosfatos de potássio, está presente em maiores concentrações, confirmado por análise de DRX. As amostras têm grupos funcionais de superfície semelhantes entre si, como fenólicos, alifáticos, quinonas conjugadas e OH-fenólicos. Houve perda apenas do grupo hidroxila nas amostras BCA350 e BCA450; os diferentes tratamentos térmicos aplicados à cama de aviário geraram amostras com características físicas, químicas e estruturais semelhantes.

REFERÊNCIAS

ABDEL-FATTAH, T. M.; MAHMOUD, M. E.; AHMED, S. B.; HUFF, M. D.; LEE, J. W.; KUMAR, S. Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 22, p. 103-109, 2014.

ALLER, D.; BAKSHI, S.; LAIRD, D. A. Modified method for proximate analysis of biochars. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 124, p. 335-342, 2017.

ASTM International ASTM D1762-84. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. ASTM International 1-2, West Conshohocken, 2007.

ATKINSON, C. J.; FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: Review. **Plant Soil**, v. 337, p. 1-18, 2010.

BARRETT, E.; JOYNER, J.; HALENDA, P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. **Journal American Chemical Society**, v. 73, n. 1, p. 373-380, 1951.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Coordenação Geral de Apoio Laboratorial, Murilo Carlos Muniz Veras (Org.). Brasília: MAPA/ SDA/CGAL, 2014. 220p.

BRUUN, E. W.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; IBRAHIM, N.; EGSGAARD, H.; AMBUS, P.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 3, p. 1182-1189, 2011.

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

CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; MENDES, J. S.; DANTAS, E. R. B.; GUERRA, H. O. C.; TITO, G. A.; SILVA, A. A. R.; LAURENTINO, L. G. S.; SOUZA, F. G.; LIMA, W. B.; CHAVES, I. B. Characterization of poultry litter biochar for agricultural use. **Sylwan**, v. 164, p. 468-487, 2020.

CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; MENDES, J. S.; TITO, G. A.; GUERRA, H. O. C.; LAURENTINO, L. G. S. Optimization of cadmium adsorption using poultry litter biochar through response surface methodology. **Chemical Engineering Transactions**, v. 86, p. 1507-1512, 2021.

CHEN, B.; ZHOU, D.; ZHU, L. Transitional Adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 14, p. 5137-5143, 2008.

CUIXIA, [https://pubs.rsc.org/en/results?searchtext=Author:Yan Cuixia Y.; YINGMING, X.; LIN, W.; XUEFENG, L.; YUEBING, S.; HONGTAO, J.](https://pubs.rsc.org/en/results?searchtext=Author:Yan%20Cuixia%20Y.;%20YINGMING,%20X.;%20LIN,%20W.;%20XUEFENG,%20L.;%20YUEBING,%20S.;%20HONGTAO,%20J.) Effect of different pyrolysis temperatures on physico-chemical characteristics and lead (ii) removal of biochar derived from chicken manure. **RSC Advances**, v. 7, p. 3667-3674, 2020.

DEVENS, K. U.; PEREIRA NETO, S.; OLIVEIRA, D. L. A.; GONÇALVES, M. S. Characterization of biochar from green coconut shell and

orange peel wastes. **Revista Virtual de Química**, v. 10, p. 288-294, 2018.

DOMINGUES, R. R.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, C. A.; MELO, I. C. N. A.; MELO, L. C. A.; MAGRIOTIS, Z. M.; SAÂNCHESZ-MONEDERO, M. A. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos One**, v. 12, p. 1-19, 2017.

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 644-653, 2012.

FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B.; TITO, G. A. Soil chemical amendments and the macronutrients mobility evaluation in Oxisol treated with biochar. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 10, p. 238-247, 2018.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014.

GOLDBERG, R. N.; KISHORE, N.; LENNEN, R. M. Thermodynamic quantities for the ionization reactions of buffers. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 31, n. 2, p. 231-370, 2002.

HUANG, J. H.; HSU, S. H.; WANG, S. L. Effects of rice straw ash amendment on Cu bioavailability in flooded rice paddy soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 2-3, p. 1801-1807, 2011.

ICIDCA-GEPLACEA-PNUD. Manual de los derivados de la caña de azúcar. 2.ed. México, 1990. 447p.

KIM, H. S.; KIM, S.; KIM, W. J.; YANG, H. S. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. **Thermochimica Acta**, v. 451, n. 1/2, p. 181-188, 2006.

KOUTCHEIKO, S.; MONREAL, C. M.; KODAMA, H.; MCCRACKEN, T.; KOTLYAR, L. Preparation and characterization of activated carbon derived from the thermo-chemical conversion of chicken manure. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 13, p. 2459-2464, 2007.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Eds.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. Cap.1. London: Routledge, 2015. p. 1-13.

LIAO, I. H.; HUANG, J. H.; WANG, S. L.; CHENG, M. P.; LIU, J. C. Adsorptions of Cd(II) and Pb(II) in aqueous solution by rice-straw char. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, p. 21619-21626, 2015.

LIMA, W. B.; FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B. Adsorption of zinc in Ultisol and Entisol amended with poultry litter biochar. **World Applied Sciences Journal**, v. 35, n. 1, p. 142-150, 2017.

LOWELL, S.; SHIELDS, J. E.; THOMAS, M. A.; THOMMES, M. **Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Poro Size and Density.** Springer Netherlands, 2004. 243p.

LU, H. P.; LI, Z. A.; GASCÓ, G.; MÉNDEZ, A.; SHEN, Y.; PAZ-FERREIRO, J. Use of magnetic biochars for the immobilization of heavy metals in a multi-contaminated soil. **Science of The Total Environment**, v. 622-623, p. 892-899, 2018.

MELO, L. C. A.; COSCIONE, A. R.; ABREU, C. A.; PUGA, A. P.; CAMARGO, A. O. Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugarcane straw derived biochar. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 4992-5004, 2013.

MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; SILVA, F. A. S.; FERNANDES, J. D. Using poultry litter biochar and rock dust MB-4 on release available phosphorus to soils. **Agricultural Sciences**, v.6, p.1367-1374, 2015.

MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; TITO, G. A.; GUERRA, H. O. C.; LAURENTINO, L. G. S.; KUBO, G. T. M.; DANTAS, E. B.; SILVA, Y. S.; OLIVEIRA, L. D. de. Development and production of maize as a function of biochar rates. **Semina-Ciências Agrárias**, v. 46, p. 3707-3720, 2021.

MITCHELL, P. J.; DALLEY, T. S. L.; HELLEUR, R. J. Preliminary laboratory production and characterization of biochars from lignocellulosic municipal waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 99, n. 1, p. 71-78, 2013.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 313-339, 2013.

OH, T. K.; CHOI, B.; SHINOGI, Y.; CHIKUSHI, J. Effect of pH conditions on actual and apparent fluoride adsorption by biochar in aqueous phase. **Water Air & Soil Pollution**, v. 223, p. 3729-3738, 2012.

REGALBUTO, J. R.; ROBLES, J. **The engineering of Pt/Carbon Catalyst Preparation.** Chicago: University of Illinois, 2004. 14p.

SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. *In*: OVEREND, R. P.; MILNE, T. A.; MUDGE, L. K. **Fundamentals of Biomass thermochemical conversion.** London: Elsevier, 1985. p. 183-217.

SHAHBAZ, M.; ALNOUSS, A.; PARTHASARATHY, P.; ABDELAAL, A. H.; MACKEY, H.; MCKAY, G.; AL-ANSARI, T. Investigation of biomass components on the slow pyrolysis products yield using Aspen Plus for techno-economic analysis. **Biomass conversion and Biorefinery**, v. 1, p. 85-94, 2020.

SHARMA, R. K.; WOOTEN, J. B.; BALIGA, V. L.; LIN, X.; CHAN, W. G.; HAJALIGOL, M. R. Characterization of chars from pyrolysis of lignin. **Fuel**, v. 83, n. 11-12, p. 1469-1482, 2004.

SOBIK-SZOŁTYSEK, J.; WYSTALSKA, K.; MALIŃSKA, K.; MEERS, E. Influence of pyrolysis temperature on the heavy metal sorption capacity of biochar from poultry manure. **Materials**, v. 14, n. 21, p. 6566-6587, 2021.

SONG, W.; GUO, M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 94, p. 138-145, 2012.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A. V.; OLIVIER, J. P.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

TSAI, C. C.; CHANG, Y. F. Quality evaluation of poultry litter biochar produced at different pyrolysis temperatures as a sustainable management approach and its impact on soil carbon mineralization. **Agronomy**, v. 11, n. 9, p. 1-17, 2021.

TSAI, C. C.; CHANG, Y. F. Poultry litter biochar as a gentle soil amendment in multi-contaminated soil: quality evaluation on nutrient preservation and contaminant immobilization. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 1-19, 2022.

ULYETT, J.; SAKRABANI, R.; KIBBLEWHITE, M.; HANN, M. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 96-104, 2014.

ZHAO, J.; SHEN, X.; DOMENE, X.; ALCAÑIZ, J.; LIAO, X.; PALET, C. Comparison of biochars derived from different types of feedstock and their potential for heavy metal removal in multiple-metal solutions. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1-12, 2019.

ZHAO, L.; CAO, X.; MAŠEK, O.; ZIMMERMAN, A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 256/257, p. 1-9, 2013.

ZHAO, S. X.; TA, N.; WANG, X. D. Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. **Energies**, v. 10, n. 9, p. 1293-1308, 2017.

CAPÍTULO 3

Biocarvão nas propriedades eletroquímicas, químicas e físicas de solo

Jacqueline da Silva Mendes

Josely Dantas Fernandes

Lúcia Helena Garófalo Chaves

Solos ácidos, originados pela remoção das bases, apresentam alta concentração de íons de hidrogênio e/ou alumínio no complexo sortivo e na solução dos solos, causando, por isso, uma redução da disponibilidade de nutrientes para o solo e, conseqüentemente, baixos rendimentos de produção. Portanto, a correção da acidez dos solos (calagem) é considerada como uma das práticas que contribuem significativamente para o aumento da produtividade agrícola.

No Brasil, o material mais utilizado para a correção da acidez é o calcário, no entanto, muitos outros materiais têm sido testados e usados para a mesma finalidade. Dentre estes materiais, escória siderúrgica, fontes abundantes de silicatos e pó de rocha MB-4, proveniente da moagem de rocha silicatada, têm se mostrado promissores como corretivos da acidez do solo (Chaves; Farias, 2008). Os resultados do uso de MB-4 na correção da acidez dos solos ainda são questionáveis, pois a liberação de silício-MB-4 para os solos é muito baixa (Pereira *et al.*, 2003). Segundo Lehmann *et al.* (2006), o biocarvão, um composto rico em carbono, pode melhorar as propriedades físicas e químicas do

solo, reduzindo a lixiviação de nitrogênio, neutralizando a acidez do solo, reduzindo a quantidade de alumínio extraível e outros benefícios (Asai *et al.*, 2009).

De acordo com Sanvong e Suppadit (2013), o biocarvão de cama de aviário pode ser eficaz como fertilizante e condicionador do solo, no entanto, resultados sobre a neutralização da acidez do solo através da aplicação de MB-4 e biocarvão de cama de aviário são poucos, por isso, foi realizado um estudo sobre os efeitos desses produtos como agentes corretivos de pH em solos, em comparação com o carbonato de cálcio e a escória de siderurgia (Estudo de Caso 1).

Da mesma forma, os solos ácidos são caracterizados por baixa fertilidade, particularmente com baixo nível de fósforo no solo, ou seja, deficiências de fósforo nos solos, limitando o crescimento das culturas e reduzindo o rendimento das culturas. A cama de aviário, matéria-prima para biocarvão, tem uma alta concentração de fósforo e nitrogênio, tornando-se um corretivo ideal para solos agrícolas. No entanto, através da pirólise lenta, transformado-se em biocarvão pelo aquecimento na ausência de oxigênio, esse fósforo pode ser imobilizado. Fosfato de cálcio e ferro, potássio e enxofre e vários micronutrientes, como cobre, zinco, manganês e cobalto (MIBASA), também fazem parte da composição do MB-4. Assumindo que o fósforo ocorre na composição química tanto no biocarvão como no MB-4, foi realizado um experimento a respeito da influência da aplicação desses materiais em três diferentes solos no aumento da disponibilidade de fósforo para as culturas (Estudo de Caso 2). Além disso, foi avaliada a influência de MB-4 e biocarvão nas características químicas dos solos (Estudo de Caso 3).

Em solos altamente intemperizados, a adição de matéria orgânica ou biocarvão em um sistema equilibrado promove alterações no pH do solo e, conseqüentemente, nas cargas elétricas positivas e/ou negativas das superfícies dos colóides, devido a fatores diretos ou indiretos. O ponto de carga zero (PCZ) corresponde ao valor do pH do solo em que o balanço entre estas cargas é zero, sendo, portanto, uma característica eletroquímica de grande importância em solos com predominância de cargas dependentes do pH, afetando propriedades como floculação, dispersão, troca catiônica e disponibilidade de nutrientes, entre outros (Appel *et al.*, 2003; Fontes; Alleoni, 2006; Fontes *et al.*, 2001). Também é possível, através do valor do PCZ, determinar o potencial da dupla camada elétrica pela equação simplificada de Nernst (Uehara; Gillman, 1980).

O estudo das cargas elétricas é necessário para o entendimento dos diferentes eventos físicos e químicos que ocorrem no solo, porque a maioria das reações eletroquímicas influencia a fertilidade (Kononova, 1984) e a nutrição das plantas, interferindo em fenômenos relacionados ao seu manejo e conservação, que ocorrem na superfície das partículas dos solos (Fontes *et al.* 2001; Siqueira, 1985; Sposito, 1989).

Com base no exposto, foi realizado um estudo sobre a variação do PCZ, das cargas elétricas e do potencial superficial de alguns solos do Estado da Paraíba por meio da aplicação de biocarvão de cama de aviário (Estudo de Caso 4).

O biocarvão de cama de aviário tem muitos benefícios agrícolas; é um recurso útil para melhorar as propriedades químicas do solo, como, por exemplo, aumentar o pH do solo, a capacidade de troca catiônica (Chaves; Mendes, 2016), a eficiência no uso de

fertilizantes e o aumento da produção agrícola, particularmente para solos cultivados a longo prazo (Van Zwieten *et al.*, 2010). De acordo com Jien e Wang (2013), muitos estudos relataram o uso de biocarvão no solo melhorando as propriedades químicas em solos tropicais altamente intemperizados (Liang *et al.*, 2006). No entanto, há poucos estudos sobre os efeitos do biocarvão nas propriedades físicas dos solos (Atkinson *et al.*, 2010). De acordo com Kimetu e Lehmann (2010), o biocarvão influencia a agregação e consistência do solo, atuando na formação de agregados, portanto, na distribuição do tamanho dos poros, bem como na retenção e disponibilidade de água no solo, ajudando as plantas em períodos de seca (Lehmann *et al.*, 2006).

Vários pesquisadores, estudando os efeitos de matéria orgânica sobre as propriedades físicas do solo (teor de argila, densidade, poder de flocculação, porosidade e compactação), encontraram resultados positivos. No entanto, esses efeitos devem ser diferentes, ou não, dos efeitos do biocarvão, inclusive devido ao tipo de matéria-prima usada no processo de pirólise, a qual influencia significativamente as propriedades do biocarvão produzido (Silva *et al.*, 2017). Portanto, como é necessário estudar os efeitos do biocarvão da cama de aviário nas propriedades químicas e físicas dos solos, foram realizados estudos em relação a esses assuntos, conforme o que está apresentado nos estudos de casos 5 e 6.

Segundo Mueller *et al.* (2013), a utilização de cama de aviário melhora a fertilidade dos solos, além de ser um excepcional condicionador, no entanto, há um risco de contaminação ambiental por inúmeros mecanismos de liberação de nutrientes deste resíduo, principalmente nitrogênio, para o solo e, conseqüentemente, para as águas subterrâneas. A aplicação do biocarvão ao solo, produzi-

do após a transformação e a reciclagem da cama de aviário, tem apresentado melhorias nas características químicas e físicas dos solos, além de promover aumento na produção de várias culturas. No entanto, há poucas informações sobre o movimento vertical e descendente dos elementos químicos pelo perfil do biocarvão aplicado em solos agrícolas. Neste contexto, foram avaliadas as alterações químicas do solo e a lixiviação de macronutrientes após a aplicação de biocarvão em latossolo vermelho amarelo (Estudo de Caso 7).

Do ponto de vista agrícola, os solos salinos e os solos sódicos são aqueles que apresentam excesso de sais e de sódio trocável, respectivamente. O excesso de sais limita severamente a produção agrícola, principalmente nas regiões áridas e semiáridas, onde cerca de 25% da área irrigada é salinizada (FAO, 2006). Os efeitos adversos da sodicidade do solo são muito graves e podem levar à degradação física e química das propriedades do solo, o que pode causar redução da produção agrícola (Singh; Singh, 2013). A recuperação de solos salinos/sódicos geralmente envolve dois processos: a lixiviação de sais solúveis (solos salinos) e a substituição de Na^+ por Ca^{2+} trocável (solos sódicos). Um volume excedente de água de irrigação e corretivos, como gesso, ácido sulfúrico, enxofre elementar e matéria orgânica, têm sido utilizados na recuperação desses solos. Recentemente, em várias pesquisas, tem sido usado biocarvão como um condicionador em solos afetados por sais (Elshaikh *et al.*, 2017; Sappor *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2014), no entanto, são escassas as pesquisas com biocarvão de cama de aviário. Por isso, são apresentados, no Estudo de Caso 8, os efeitos deste biocarvão na salinidade/sodicidade de um latossolo vermelho amarelo.

ESTUDO DE CASO 1

Uso de pó de rocha MB-4, biocarvão de cama de aviário, silicato e carbonato de cálcio para corrigir diferentes tipos de solo (Mendes *et al.*, 2015)¹

Para avaliar o efeito de biocarvão e MB-4 como agentes corretivos de pH em solos ácidos comparando com o carbonato de cálcio e a escória siderúrgica, foi conduzido um experimento no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEAg) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), utilizando o método de incubação em vasos por 100 dias. Para avaliar o comportamento desses materiais sobre o pH e as propriedades do solo e entender como eles neutralizam a acidez do solo, amostras de argissolo, latossolo e neossolo foram coletadas nos municípios de Campina Grande, Areia e Lagoa Seca, respectivamente, no Estado da Paraíba, Brasil, cujas características químicas, de acordo com a metodologia da Embrapa (2011), estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e classificação textural das amostras de solos usadas no experimento

(continua)...

ATRIBUTOS QUÍMICOS	ARGISSOLO	LATOSSOLO	NEOSSOLO
Cálcio (cmol _c kg ⁻¹)	2,02	2,09	0,78
Magnésio (cmol _c kg ⁻¹)	1,46	1,60	1,19
Sódio (cmol _c kg ⁻¹)	0,09	0,09	0,08
Potássio (cmol _c kg ⁻¹)	0,14	0,07	0,14

1 . MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; CHAVES, I. B. Using MB-4 rock powder, poultry litter biochar, silicate and calcium carbonate to amend different soil types. *Australian Journal of Crop Science*, v. 9, n. 10, p. 987-995, 2015.

...(continuação)

ATRIBUTOS QUÍMICOS	ARGISSOLO	LATOSSOLO	NEOSSOLO
Soma das bases (cmol _c kg ⁻¹)	3,71	3,85	2,19
Hidrogênio (cmol _c kg ⁻¹)	6,36	11,97	2,72
Alumínio (cmol _c kg ⁻¹)	0,40	0,40	0,20
CTC (cmol _c kg ⁻¹) ¹	10,07	16,22	5,11
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	11,90	31,50	9,60
Fósforo disponível (mg kg ⁻¹)	3,20	2,60	11,40
pH H ₂ O (1:2.5)	5,12	5,14	5,30
V (%) ²	36,84	23,74	42,85
Classe textural	Franco arenoso	Franco Arg. arenoso	Areia franca

¹= capacidade de troca catiônica; ²= porcentagem de saturação por bases
Elaborado pelos autores.

Os corretivos a serem testados: produzido por Agro silício Hascos Minerais com 35% de Cálcio; 6% de Magnésio; 10,535% de silício e 64,6% PRNT nomeado, nesta pesquisa como silicato; carbonato de cálcio PA administrado com PRNT 100%; pó de rocha, conhecido como MB-4, para ser testado em solos, produzido por MIBASA com 39,7% de SiO₂; 7,1% de Al₂O₃; 6,9% de Fe₂O₃; 5,9% de CaO; 17,8% de MgO; 1,5% de Na₂O; 0,8% de K₂O; 0,075% de P₂O₅; 0,2% de S; biocarvão produzido de cama de aviário apresenta a seguinte composição: pH (H₂O) = 10,1; N = 42,31 g kg⁻¹; P = 32,56 g kg⁻¹; K⁺ = 48,56 g kg⁻¹; Ca²⁺ = 57,75 g kg⁻¹; Mg²⁺ = 12,40 g kg⁻¹; Na = 14,37 g kg⁻¹; Fe = 137 g kg⁻¹; Cu = 812 g kg⁻¹; Zn = 700 g kg⁻¹; Mn = 862 g kg⁻¹.

Os tratamentos para argissolo e neossolo consistiram em cinco doses crescentes desses materiais, correspondentes às quantidades necessárias para aumentar a saturação do solo em torno das bases 40, 50, 60, 70 e 80%. Para o latossolo, foram utilizadas seis doses para elevar a saturação por bases em torno de 20, 40, 40, 50, 70 e 80%. A quantidade de carbonato de cálcio para atingir

os tratamentos foi calculada com base em 100% PRNT; no caso do silicato, também foram calculadas com base nas quantidades PRNT 64,6%, porém, não se conhece PRNT biocarvão e 4-MB, então se optou por utilizar o dobro das quantidades calculadas com base no carbonato de cálcio (Tabela 2).

Tabela 2 - Quantidade de materiais usados para alcançar diferentes porcentagens de saturação por base do solo

SOLO	PORCENTAGEM DE SATURAÇÃO POR BASES	QUANTIDADE DE MATERIAIS USADOS (g) PARA 0.3 kg DE SOLO			
		CARBONATO DE CÁLCIO	SILICATO	BIOCARVÃO	MB-4
Latossolo	20	0,0	0,0	0,0	0,0
	40	0,335	0,519	0,670	0,670
	50	0,540	0,839	1,080	1,080
	60	0,745	1,159	1,490	1,490
	70	0,955	1,478	1,910	1,910
	80	1,160	1,798	2,320	2,320
Argissolo	40	0,0	0,0	0,0	0,0
	50	0,133	0,207	0,267	0,267
	60	0,234	0,364	0,469	0,469
	70	0,336	0,521	0,672	0,672
	80	0,437	0,678	0,875	0,875
Neossolo	40	0,0	0,0	0,0	0,0
	50	0,036	0,056	0,072	0,072
	60	0,087	0,135	0,175	0,175
	70	0,138	0,214	0,276	0,276
	80	0,189	0,292	0,377	0,377

Elaborado pelos autores.

Amostras de trezentos gramas dos solos de estudo foram colocadas em potes plásticos (unidades experimentais) e depois misturadas com os materiais de acordo com os tratamentos. O solo e esses materiais foram misturados completamente e depois

umedecidos com água deionizada até aproximadamente 60% da capacidade de campo de água do solo. O tempo de incubação foi de 100 dias, e os solos foram analisados em 10 d, 40 d, 70 d e 100 d para determinar suas propriedades químicas. Os resultados foram analisados estatisticamente através das análises de variância (ANOVA), descrita por Ferreira (2011), usando o Software SAEG Euclides (1997). Os testes de multicomparação foram realizados usando o teste de Tukey a 5% e 1% de probabilidade.

Os resultados do argissolo indicaram que há um efeito significativo de diferentes materiais, biocarvão e MB-4, nos níveis de pH do solo aos 10 e 70 dias após a incubação, respectivamente, ao nível de 1% e 5% de probabilidade. As doses desses materiais tiveram efeito significativo sobre o pH do solo em todos os períodos de incubação ($p \leq 0,01$). No entanto, a interação de materiais e doses foi significativa para o nível de pH do solo apenas aos 10 e 100 dias de incubação.

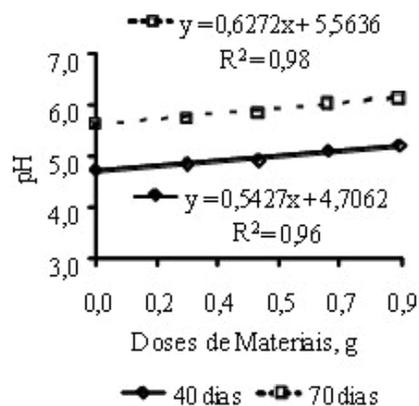
Aos 10 e 70 dias de incubação, os valores de pH do solo que receberam biocarvão foram superiores e inferiores aos do solo que recebeu MB-4, respectivamente. Nos outros períodos de incubação, os valores de pH foram semelhantes, embora valores maiores observados com biocarvão. O baixo efeito do MB-4 na reação do solo, provavelmente, se deve à baixíssima liberação de silício-MB-4, ou seja, a baixa neutralização de prótons (H^+) pelo ânion silicato (SiO_3^{2-}), presente no solo da solubilização desse produto. Em todos os períodos de incubação, os valores de pH do argissolo tratado com biocarvão e MB-4 aumentaram em função do aumento das doses desses materiais. Mesmo assim, os valores de biocarvão e MB-4 foram inferiores aos valores do pH do solo incubado com carbonato de cálcio e silicato. Os dados obtidos com o carbonato de cálcio e o silicato, especialmente com a última dose,

calculados para 80% de saturação de bases, foram usados como referência para avaliar o comportamento do biocarvão e do MB-4.

As finalidades da aplicação de carbonato e silicato de cálcio no solo foram semelhantes na correção da acidez do solo. Em geral, a aplicação de carbonato de cálcio pode melhorar o pH do solo. A comparação dos valores de pH do material de referência (adicional M) com biocarvão e MB-4 mostra que esses tratamentos têm valores mais baixos, mesmo que sejam aplicadas quantidades em doses duplas.

Não houve interação significativa entre material e doses para o período de 40 a 70 dias de incubação. Na Figura 1, é apresentado o comportamento linear do pH em relação às doses.

Figura 1 - Valores de pH devido ao efeito do material isolado aos 40 e 70 dias de incubação

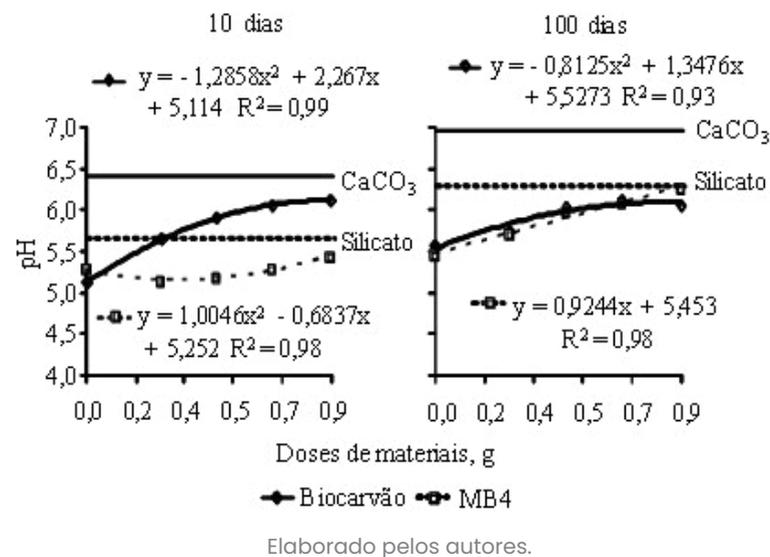


Elaborado pelos autores.

O comportamento dos valores de pH do solo com biocarvão e MB-4 variou com a concentração no solo e em diferentes tempos, que aos 10 dias de incubação, foram ajustadas equações polino-

miais de segundo grau; e aos 100 dias de incubação, os dados do biocarvão foram ajustados à equação polinomial de segundo grau; e do MB-4 foram ajustados à equação linear (Figura 2).

Figura 2 - Valores de pH devido à divisão de doses no material aos 10 e 100 dias de incubação



Elaborado pelos autores.

Os resultados do latossolo indicaram que houve efeito significativo de diferentes materiais (M), biocarvão e MB-4; e doses nos níveis de pH do solo em 10, 40, 70 e 100 dias de incubação ($p \leq 0,01$). A interação de materiais e doses foi significativa para os níveis de pH do solo. Da mesma forma, houve diferença significativa entre carbonato de cálcio e silicato (M adicional); e entre M com M adicional ao nível de 1% de probabilidade.

Com exceção dos 10 dias de incubação, os maiores valores de pH do solo foram obtidos com a aplicação do MB-4, ao contrário do que foi observado no argissolo. Mesmo assim, depois de apli-

car biocarvão e MB-4 nos solos e incubar por 100 dias, os solos corrigidos tinham um pH do solo significativamente mais alto do que as amostras de controle.

Em todos os períodos de incubação, os valores de pH aumentaram em função de maiores doses de agentes corretivos. Assim como ocorreu no argissolo, o carbonato de cálcio teve melhor efeito neutralizante sobre a acidez do solo do que o silicato, mas esses dois foram melhores que o biocarvão e o MB-4 no aumento do pH do solo.

Pôde-se observar que o comportamento dos valores de pH do solo com biocarvão e MB-4 variou com sua concentração no solo e em diferentes tempos (Figura 3). Os valores de pH do solo com tratamentos de biocarvão e MB-4 aumentaram em função de doses mais altas. No entanto, não atingiu os valores de silicato e carbonato de cálcio, usados como referência (Figura 3).

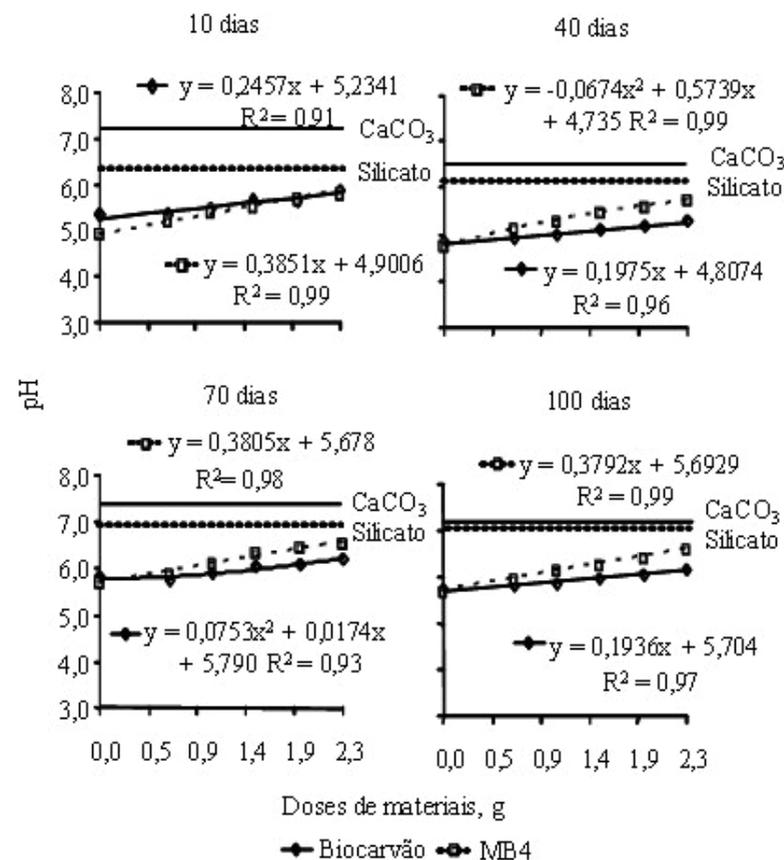
Com exceção dos valores de pH observados no neossolo em relação aos materiais (M) aos 10 dias de incubação, os resultados indicaram que houve efeito significativo de diferentes materiais (M), biocarvão e MB-4, e doses sobre níveis de pH do solo aos 10, 40, 70 e 100 dias após a incubação ($p \leq 0,01$).

A interação de materiais e doses foi significativa no nível de pH do solo ($p \leq 0,01$ e $0,05$). Da mesma forma, houve uma diferença significativa entre carbonato de cálcio e silicato (M adicional), porém somente com 10 dias de incubação e entre M com M adicional ($p \leq 0,01$).

Os valores de pH do solo foram aumentados ao longo do tempo de incubação após os tratamentos com biocarvão e MB-4 e em função do aumento das doses. Os maiores valores foram observados com a aplicação do MB-4, pois este material tem mais íons responsáveis pela neutralização da acidez do solo do que o biocarvão.

A diferença entre os valores de pH de unidades experimentais que receberam carbonato de cálcio e silicato era pequeno, mostrando que esses dois agentes corretivos têm efeitos semelhantes na neutralização da acidez do solo.

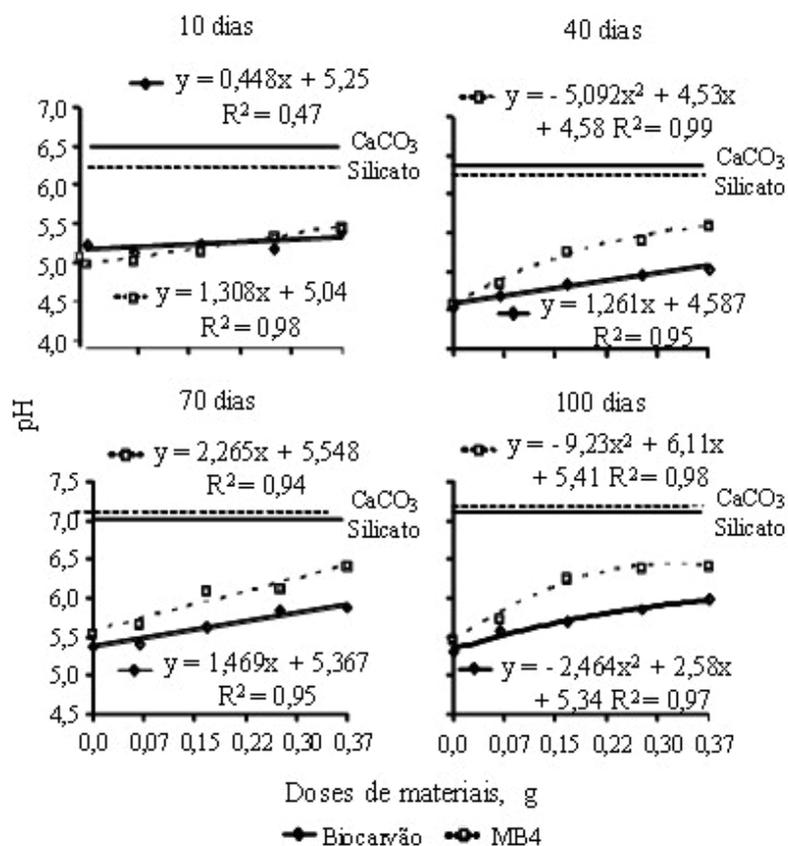
Figura 3 - Valores de pH devido à divisão de doses em material de 10 a 100 dias de incubação em latossolo



Elaborado pelos autores.

Em todos os períodos de incubação, os valores de pH do solo com material adicional (carbonato de cálcio e silicato) foram superiores aos valores de pH do solo com material (biocarvão e MB-4). O comportamento dos dados sobre a interação do biocarvão e MB-4 para doses em diferentes períodos de incubação é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Valores de pH devido à divisão de doses em material de 10 a 100 dias de incubação em neossolo



Elaborado pelos autores.

Além da variação do pH do solo em função dos corretivos, a soma das bases também variou. A soma das bases variou de 3,90 a 7,19 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; 3,64 a 4,35 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ e 2,03 a 2,53 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, após doses crescentes de biocarvão em Latossolo, Argissolo e Neossolo, respectivamente.

Praticamente, o nível de alumínio não se alterou quando o nível de hidrogênio diminuiu. Assim, a capacidade de troca catiônica (CTC) diminuiu ao contrário do observado por Jien e Wang (2013). Conseqüentemente, a porcentagem de saturação de bases reflete o aumento de bases em todos os solos e a diminuição da acidez potencial do solo. É importante notar que a maior contribuição para a soma das bases foi criada com os elementos sódio e potássio.

Esta pesquisa utilizou biocarvão de cama de aviário que provavelmente resultou em cinzas com teores mais elevados de potássio do que de sódio. Após doses crescentes de MB-4 em Latossolo, Argissolo e Neossolo, a soma de bases variou de 3,88 a 6,99 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; 3,56 a 4,91 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ e 2,10 a 2,53 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente. Ao contrário do biocarvão, neste caso, os elementos como cálcio e magnésio foram predominantes no solo sem praticamente variar os teores de sódio e potássio.

Da mesma forma, a soma das bases foi aumentada, o CTC diminuiu e, conseqüentemente, o percentual de saturação de base aumentou. A aplicação de MB-4 em solos, foi praticamente melhor que o biocarvão.

No entanto, em relação aos dados correspondentes ao carbonato de cálcio e silicato, observa-se que as quantidades de biocarvão aplicado e MB-4 (duas vezes as quantidades de carbonato de cálcio) não atingiram as porcentagens de bases trocáveis desejáveis. Provavelmente, se as quantidades utilizadas desses materiais fossem maiores, poderíamos obter maiores porcentagens de bases trocáveis.

Concluindo, pode-se dizer que os resultados deste estudo confirmaram a eficácia do biocarvão de cama de aviário, MB-4, silicato e carbonato de cálcio para melhorar as propriedades químicas do Argissolo, Latossolo e Neossolo, indicando com isso, que as melhorias nas características do solo variaram com variações na quantidade de corretivos adicionados ao solo e no tempo de incubação. E, finalmente, a sequência de maior eficiência na neutralização da acidez do solo = carbonato de cálcio > silicato > MB-4 > biocarvão.

■ ESTUDO DE CASO 2

Uso do biocarvão de cama de aviário e pó de rocha MB-4 na liberação de fósforo disponível para os solos (Mendes *et al.*, 2015)²

Partindo do pressuposto de que o fósforo ocorre na composição química do biocarvão de cama de aviário e do MB-4, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da aplicação desses materiais em três diferentes solos, latossolo, argissolo e neossolo, conforme a Tabela 1 do Estudo de Caso 1, no aumento da disponibilidade de fósforo para as culturas.

O experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação e Salinidade do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (LIS/DEAg/UF CG), utilizando o método de incubação em vasos por 100 dias. As características químicas do pó de rocha MB-4 e biocarvão de cama de aviário utilizados neste experimento são apresentadas no Estudo de Caso

2 . MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; SILVA, F. A. S.; FERNANDES, J. D. Using poultry litter biochar and rock dust MB-4 on release available phosphorus to soils. *Agricultural Sciences*, v. 6, n. 11, p. 1367-1374, 2015.

1, da mesma forma que as quantidades desses materiais utilizados são apresentados na Tabela 2 do estudo anterior.

Os experimentos com argissolo e neossolo foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2 × 5 (dois materiais: biocarvão e MR-4; cinco doses desses materiais) com três repetições; com amostras de latossolo, foi realizado em delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2 × 6, com três repetições.

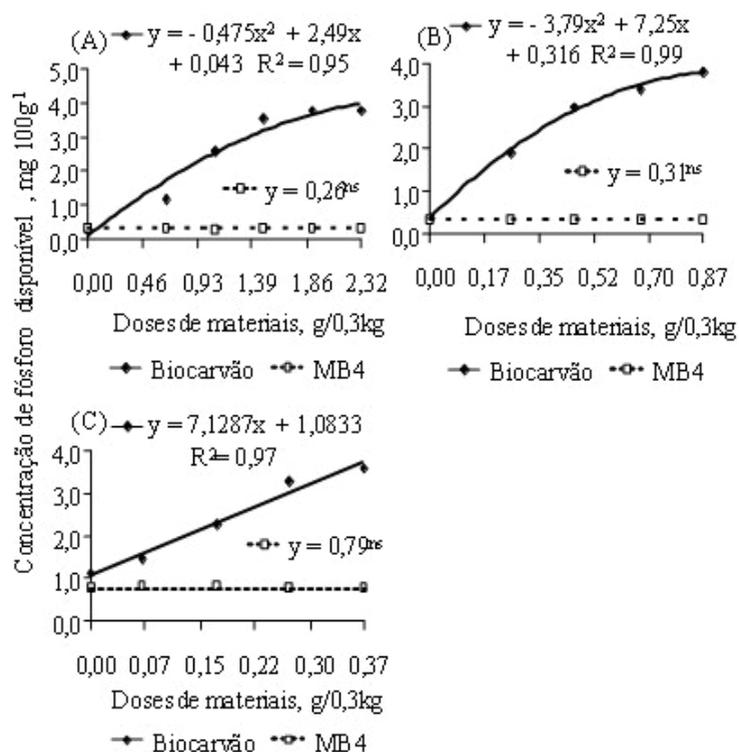
Amostras de trezentos gramas dos solos de estudo foram colocadas em potes plásticos (unidades experimentais) e depois misturadas com os materiais de acordo com os tratamentos. O solo e esses materiais foram misturados completamente e depois umedecidos com água deionizada até aproximadamente 60% da capacidade de campo de água do solo. As amostras dos solos foram analisadas 100 dias após a incubação para determinar o teor de fósforo dessas amostras. Para isso, utilizou 10 ml de amostra de solo, adicionado de 100 ml de extração de fósforo solução (H₂SO₄ 0,025N + HCl 0,05N). O fósforo foi determinado usando fotocolorímetro em um comprimento de onda de 600 mμ.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (Ferreira, 2011), com nível de significância determinado pelo teste “F”. As médias dos materiais, tratamentos adicionais e suas interações foram comparadas pelo teste de Tukey em p < 0,05, enquanto os efeitos das doses de MB-4 e biocarvão foram avaliados por análise de regressão, adotando como critério para escolha do modelo matemático dos coeficientes de regressão significativos de magnitude a 5%, pelo teste t.

Os materiais utilizados biocarvão e MB-4, as doses desses materiais e a interação entre esses fatores de variação apresentaram efeito significativo ao nível de 1% de probabilidade em relação

ao fósforo disponível nos três solos. No entanto, com o desdobramento dos dados, apenas as doses tiveram efeito significativo na interação com o biocarvão, ou seja, não houve diferença significativa nas doses do MB-4. Após a aplicação de biocarvão nos solos e a incubação por 100 d, as concentrações de fósforo disponível nos solos aumentaram em função das quantidades de biocarvão aplicadas. Esse aumento no latossolo e argissolo variou quadraticamente; e o comportamento do neossolo foi linear (Figura 1).

Figura 1 - Concentração de fósforo disponível em função das doses de biocarvão e MB-4 em latossolo (a), argissolo (b) e neossolo (c)



Elaborado pelos autores.

A concentração de fósforo disponível não aumentou em função das doses de MB-4, provavelmente devido à liberação muito baixa de silício-MB-4. Se o fósforo na cama de aviário for alto devido à qualidade da ração das galinhas, o teor de fósforo no biocarvão também parece alto. Isso foi observado neste trabalho, ou seja, o teor de fósforo no biocarvão era alto. Apesar de ter incubado as mesmas doses de biocarvão e MB-4 correspondentes a cada solo, as quantidades de fósforo disponíveis do biocarvão foram maiores que do MB-4, ou seja, o biocarvão foi mais eficiente em aumentar o fósforo no solo (Tabela 1).

Tabela 1 - Concentração de fósforo disponível (mg/100g) em função das doses de biocarvão e MB-4 em latossolo, argissolo e neossolo

Material	DOSES (g/kg)					
	LATOSSOLO					
	0,000	2,233	3,600	4,967	6,367	7,733
Biocarvão MB4	0,26a	1,15a	2,54a	3,52a	3,77a	3,76a
	0,27a	0,27b	0,26b	0,27b	0,26b	0,27b
Material	ARGISSOLO					
	0,000	0,890	1,563	2,240	2,917	
	0,33a	1,87a	2,97a	3,38a	3,77a	
Biocarvão MB4	0,31a	0,31b	0,31b	0,32b	0,31b	
Material	NEOSSOLO					
	0,000	0,240	0,583	0,920	1,257	
	0,92a	1,47a	2,24a	3,26a	3,57a	
Biocarvão MB4	0,78a	0,80b	0,81b	0,78b	0,78b	

Valores seguidos pela mesma letra dentro de uma coluna não são significativamente diferentes no nível $p < 0,05$ com base no teste de F.

Elaborado pelos autores.

A liberação de fósforo do biocarvão de cama de aviário em solos quase neutros ocorre em uma taxa mais lenta e constante durante um período de tempo mais longo do que a partir deste material em ácidos do solo. Por conta disso, muitos pesquisadores mostram que a mistura do biocarvão no solo com matéria orgânica (meio ácido) favorece a liberação dos elementos químicos que compõem o biocarvão. O pH dos solos, neste estudo, são muito semelhantes, mas os valores de matéria orgânica são diferentes, 31,50, 11,90 e 9,6 g·kg⁻¹ correspondendo a latossolo, argissolo e neossolo, respectivamente. Isso provavelmente afetou os resultados do fósforo disponível (Tabela 1).

Por isso, os resultados deste estudo confirmaram que o biocarvão da cama de aviário é uma fonte potencial de fósforo, principalmente para solos intemperizados. No entanto, durante o período de incubação, 100 dias, com a aplicação de doses crescentes de MB-4 nos solos, não houve melhora no fósforo disponível nos solos. O MB-4 não foi fonte de fósforo para o solo em curto prazo.

ESTUDO DE CASO 3

Interpretação das características químicas dos solos submetidos à incubação com biocarvão e pó de rocha MB-4 (Chaves; Mendes, 2016)³

Os resultados da incorporação de MB-4 com o biocarvão em solos ainda são incipientes e, algumas vezes, contraditórios. Por isso, foi conduzido, no LIS/DEAg/UFCG, um experimento objetivando avaliar o efeito desses produtos nas características químicas

3 . CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S. Interpretação das características químicas dos solos, submetidos à incubação com biocarvão e pó de rocha MB-4. *Espacios*, v. 37, n. 30, p. 18, 2016.

cas das amostras de argissolo, latossolo e neossolo, coletadas nos municípios Campina Grande, Areia e Lagoa Seca, respectivamente, do Estado da Paraíba (Tabela 1 do Estudo de Caso 1).

Os níveis adotados na interpretação dos resultados de determinados parâmetros químicos com suas respectivas unidades, adaptadas pelo sistema internacional de unidades, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites de interpretação do nível de fertilidade adotados pelos laboratórios de análise de solo, no Estado do Espírito Santo

ATRIBUTOS QUÍMICOS	CLASSIFICAÇÃO E NÍVEIS				
	MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO
Cálcio (cmolc kg ⁻¹)		≤ 1,5	1,6 - 4	0 > 4,0	
Magnésio (cmolc kg ⁻¹)		≤ 0,5	0,6 - 1,0	> 1,0	
Potássio (cmolc kg ⁻¹)		≤ 0,07	0,08-0,15	> 0,15	
Alumínio (cmolc kg ⁻¹)		≤ 0,3	0,4 - 1,0	> 1,0	
Acidez Potencial (cmolc kg ⁻¹)		≤ 2,5	2,6 - 5,0	> 5,0	
Fósforo Disponível (mg kg ⁻¹)*		≤20	21 - 30	> 30	
Fósforo Disponível (mg kg ⁻¹)**		≤10	11 - 20	> 20	
CTC (cmolc kg ⁻¹) ¹		≤ 4,5	4,6 - 10,0	> 10,0	
V (%) ²	≤ 25	26 - 50	51 - 70	71 - 90	> 90
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)		≤ 15	16 - 30	> 30	

PORCENTAGEM DE SÓDIO TROCÁVEL (%) ³	NÃO SÓDICO	LIGEIR/E SÓDICO	MÉDIA/E SÓDICO	FORTE/E SÓDICO	EXCESSIVA/E SÓDICO
	< 7	7 - 10	11-20	21-30	>30
pH H2O (1:2.5)		Acidez		Neutro	Alcalinidade
	Alta	Média	Fraca		Fraca Alta
	≤ 5,0	5,1 - 5,9	6,0 - 6,9	7,0	7,1 - 7,8 > 7,8

*, ** = textura arenosa, textura media, respectivamente; ¹= capacidade de troca catiônica; ²= porcentagem de saturação por bases; ³= Pizarro Cabello (1985; 1996). Dadalto e Fullin (2001).

O pó de rocha, conhecido como MB-4, para ser testado em solos, foi produzido por MIBASA com 39,7% de SiO₂; 7,1% de Al₂O₃; 6,9% de Fe₂O₃; 5,9% de CaO; 17,8% de MgO; 1,5% de Na₂O; 0,8% de K₂O; 0,075% de P₂O₅; 0,2% de S. O biocarvão produzido de cama de aviário apresenta a seguinte composição: pH (H₂O) = 10,1; N = 42,31 g kg⁻¹; P = 32,56 g kg⁻¹; K⁺ = 48,56 g kg⁻¹; Ca²⁺ = 57,75 g kg⁻¹; Mg²⁺ = 12,40 g kg⁻¹; Na = 14,37 g kg⁻¹; Fe = 137 g kg⁻¹; Cu = 812 g kg⁻¹; Zn = 700 g kg⁻¹; Mn = 862 g kg⁻¹.

Os tratamentos para o argissolo e o neossolo consistiram em cinco doses; e para o latossolo, seis doses crescentes destes materiais correspondentes ao dobro das quantidades necessárias para elevar a saturação por bases dos solos em torno de 40, 50, 60, 70 e 80%; e de 20, 40, 50, 60, 70 e 80%, respectivamente, calculados com base no carbonato de cálcio (PRNT 100%). Isto foi feito porque não é conhecido o PRNT do biocarvão e do MB-4 (Tabela 2).

Tabela 2 - Quantidades de biocarvão e de MB-4 aplicados aos solos para atingir diferentes porcentagens de saturação por bases

SOLO	PORCENTAGEM DE SATURAÇÃO POR BASES	QUANTIDADE DO MATERIAL (g) INCORPORADO AO SOLO (kg)	
		BIOCARVÃO	MB-4
Latossolo	20	0,0	0,0
	40	2,233	2,233
	50	3,600	3,600
	60	4,967	4,967
	70	6,367	6,367
	80	7,733	7,733
Argissolo	40	0,0	0,0
	50	0,890	0,890
	60	1,563	1,563
	70	2,240	2,240
Neossolo	80	2,917	2,917
	40	0,0	0,0
	50	0,240	0,240
	60	0,583	0,583
	70	0,920	0,920
	80	1,257	1,257

Elaborado pelos autores.

Os experimentos de incubação foram realizados para avaliar os efeitos do biocarvão e do MB-4 sobre as propriedades químicas dos solos. Para isto, foram colocados em vasos plásticos (unidades experimentais) trezentos gramas de cada amostra de solo misturados com esses materiais, de acordo com os tratamentos. Em seguida, estas misturas foram umedecidas com água deionizada em torno de 60% da capacidade de campo do solo, mantidas a uma temperatura de 28°C, e pesadas a cada cinco dias para manter a umidade constante. Após 100 dias de incubação, as amostras de solo foram secas ao ar e submetidas às análises químicas, de acordo com EMBRAPA (2011).

Os resultados analisados estatisticamente, através da análise de variância (ANOVA), mostraram que a aplicação de biocarvão em latossolo, neossolo e argissolo influenciou significativamente a 1% de probabilidade no teor de fósforo e na quantidade da matéria orgânica desses solos. Já a aplicação de MB-4 nos solos influenciou, de forma significativa, a 5% de probabilidade no teor de fósforo em latossolo e neossolo e a 1% de probabilidade na quantidade de matéria orgânica em todos os três solos (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo da análise de variância de fósforo e matéria orgânica em latossolo, neossolo e argissolo em decorrência de diferentes doses de biocarvão e MB-4

FV	GL	QUADRADO MÉDIO						
		LATOSSOLO		NEOSSOLO		ARGISSOLO		
		BIO	MB-4	BIO	MB-4	BIO	MB-4	
FÓSFORO								
Tratamento	5	4,44 **	0,00005*	4	2,31**	0,0004 *	3,85 **	0,00002ns
Resíduo	6	0,022	0,00001	5	0,011	0,00004	0,095	0,00003
MATÉRIA ORGÂNICA								
Tratamento	5	39,15**	20,05**	4	17,42**	1,09 **	22,48 **	16,09 **
Resíduo	6	0,165	0,168	5	0,077	0,068	0,10	0,315

** ; *; ns, significativo ao nível de 1% (p < 0,01) e de 5% (0,01 < p < 0,05) de probabilidade e não significativo, respectivamente.

Conforme a interpretação dos valores de fósforo nas amostras de solos, em relação ao nível de fertilidade (Tabela 1), observou-se que todos os três solos, antes de ser incubadas com condicionadores, apresentam-se com baixo nível de fertilidade. Entretanto, com a aplicação de biocarvão nestes solos, o nível da fertilidade melhorou. Por exemplo, a incubação das amostras de Latossolo com a primeira dose de biocarvão (2,233 g kg⁻¹) já foi suficiente para aumentar o teor de fósforo atingindo o nível médio (11-20 mg kg⁻¹); com as demais doses de biocarvão os teores de fósforo nos solos aumentaram atingindo o nível alto deste elemento. No caso do Argissolo, as quantidades de 1,56 e 2,24 g kg⁻¹ atingiram níveis médio e alto, respectivamente, de fósforo no solo. No Neossolo as quantidades de biocarvão para atingir os níveis médio e alto do fósforo no solo são bem menores do que as utilizadas nos outros dois solos, ou seja, foram necessários 0,58 e 0,92 g kg⁻¹ de biocarvão para tal (Tabela 4). Isto variou porque os solos apresentam diferentes características físico-químicas. Apesar disso, em todos eles, o nível de fertilidade aumentou decorrente da grande concentração de fósforo disponível no biocarvão o que faz diminuir a necessidade de adição de fertilizantes fosfatados ao solo quando aplicados juntamente com o biocarvão.

Ao contrário do biocarvão, o teor de fósforo no MB-4 é muito baixo e por isso não variou o nível de fertilidade dos solos com base no teor de fósforo, em função das doses crescentes de MB-4 aplicado ao solo.

O teor de matéria orgânica no Latossolo já era considerado alto antes da incubação com os condicionadores testados, mesmo assim os teores da mistura aumentaram. No caso do Argissolo, inicialmente o teor de matéria orgânica era baixo, e após a incubação com biocarvão, independentemente das doses, o teor aumentou

sendo classificado com o nível médio. Da mesma forma ocorreu no solo com a aplicação de MB-4. O teor de matéria orgânica do Neossolo, inicialmente era baixo e continuou sendo classificado como baixo em função de todas as doses dos condicionadores, com exceção da maior dose de biocarvão, que aumentou para o nível médio (Tabela 4).

Tabela 4 - Teor de fósforo disponível (mg kg⁻¹) e matéria orgânica (g kg⁻¹) em latossolo, argissolo e neossolo em função das doses de biocarvão e MB-4 e classificação dos dados

LATOSSOLO						
MATERIAL	DOSES, g kg ⁻¹					
	0,000	2,233	3,600	4,967	6,367	7,733
FÓSFORO DISPONÍVEL, mg kg ⁻¹						
Biocarvão	2,6	11,5	25,4	35,2	37,7	37,6
MB-4	2,7	2,7	2,6	2,7	2,60	2,7
Nível*	B/B	M/B	A/B	A/B	A/B	A/B
MATÉRIA ORGÂNICA, g kg ⁻¹						
Biocarvão	33,10	36,21	41,20	41,98	43,87	43,96
MB-4	31,81	32,84	33,53	37,50	37,58	39,65
Nível*	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A
ARGISSOLO						
MATERIAL	DOSES, g kg ⁻¹					
	0,000	0,890	1,563	2,240	2,917	
FÓSFORO DISPONÍVEL, mg kg ⁻¹						
Biocarvão	3,3	18,7	29,7	33,8	37,7	
MB-4	3,1	3,1	3,1	3,2	3,1	
Nível*	B/B	B/B	M/B	A/B	A/B	
MATÉRIA ORGÂNICA, g kg ⁻¹						
Biocarvão	14,48	17,07	19,91	20,77	23,10	
MB-4	14,83	14,74	16,29	18,10	21,5	
Nível*	B/B	M/B	M/M	M/M	M/M	
NEOSSOLO						
MATERIAL	DOSES, g kg ⁻¹					
	0,000	0,240	0,583	0,920	1,257	
FÓSFORO DISPONÍVEL, mg kg ⁻¹						
Biocarvão	11,2	14,7	22,7	32,6	35,7	
MB-4	7,8	8,0	8,1	7,8	7,8	
Nível*	B/B	B/B	M/B	A/B	A/B	
MATÉRIA ORGÂNICA, g kg ⁻¹						
Biocarvão	8,88	11,38	12,07	14,31	16,64	
MB-4	8,36	8,62	8,88	9,57	10,17	
Nível*	B/B	B/B	B/B	B/B	M/B	

*B, M, A = Baixo, Médio, Alta; níveis correspondentes a biocarvão/MB-4

Elaborado pelos autores.

Talvez se tivesse aplicado quantidades maiores de biocarvão neste solo, o teor de matéria orgânica teria aumentado. Mesmo tendo havido diferença significativa nos teores de matéria orgânica dos solos em função das doses de biocarvão e de MB-4, pode-se observar que a variação dos teores em função destas doses foi pequena. Talvez o tempo de incubação deste experimento não tenha sido suficiente para mineralizar os materiais.

As aplicações de biocarvão e MB-4 no latossolo, neossolo e argissolo tiveram efeito significativo ao nível de 1% de probabilidade em todos os cátions trocáveis, na acidez potencial e na capacidade de troca catiônica, com exceção do efeito MB-4 nos teores de potássio em neossolo.

Os elementos cálcio e magnésio foram os que predominaram nos solos, com pequena variação nos níveis de sódio e de potássio.

Tabela 5 - Teores em cmolc kg⁻¹ de cálcio, magnésio e potássio do neossolo, em função das doses de biocarvão e MB-4 e classificação dos dados

NEOSSOLO					
MATERIAL	DOSES, g kg ⁻¹				
	0,000	0,240	0,583	0,920	1,257
CÁLCIO, cmolc kg⁻¹					
Biocarvão	0,74	0,98	0,77	0,93	1,15
MB-4	0,69	0,57	0,78	1,08	1,25
Nível*	B/B	B/B	B/B	B/B	B/B
MAGNÉSIO, cmolc kg⁻¹					
Biocarvão	1,09	0,72	1,05	0,96	0,94
MB-4	1,85	1,09	1,02	1,05	1,09
Nível*	A/A	M/A	A/A	M/A	M/A
POTÁSSIO, cmolc kg⁻¹					
Biocarvão	0,14	0,16	0,20	0,20	0,30
MB-4	0,14	0,12	0,13	0,13	0,14
Nível*	M/M	A/M	A/M	A/M	A/M

B, M, A, NS Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto; não sódico; níveis correspondentes a biocarvão/MB-4. Elaborado pelos autores.

Apesar de os teores de cálcio nos solos terem aumentado em função das doses crescentes de biocarvão e, principalmente, de MB-4, estes teores no latossolo e no argissolo (Tabela 6 e 7) foram classificados como médios; e no neossolo como baixos (Tabela 5) e, continuaram no mesmo nível após a incubação dos solos com as doses crescentes de biocarvão e MB-4. Este comportamento foi semelhante nos dados de magnésio.

Tabela 6 - Teores em cmolc kg⁻¹ de cálcio, magnésio e potássio do latossolo em função das doses de biocarvão e MB-4 e classificação dos dados

LATOSSOLO						
MATERIAL	DOSES, g kg ⁻¹					
	0,000	2,233	3,600	4,967	6,367	7,733
CÁLCIO, cmolc kg⁻¹						
Biocarvão	2,07	2,75	3,31	3,52	3,66	3,74
MB-4	2,00	2,66	2,89	3,08	3,41	3,57
Nível*	M/M	M/M	M/M	M/M	M/M	M/M
MAGNÉSIO, cmolc kg⁻¹						
Biocarvão	1,67	1,11	2,24	1,87	2,04	2,16
MB-4	1,72	2,25	2,62	3,47	3,11	3,26
Nível*	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A
POTÁSSIO, cmolc kg⁻¹						
Biocarvão	0,07	0,37	0,60	0,72	0,83	0,88
MB-4	0,07	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
Nível*	B/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B

B, M, A, NS Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto; não sódico; níveis correspondentes a biocarvão/MB-4. Elaborado pelos autores.

Tabela 7 - Teores em cmolc kg^{-1} de cálcio, magnésio e potássio do argissolo em função das doses de biocarvão e MB-4 e classificação dos dados

MATERIAL	ARGISSOLO				
	DOSES, g kg^{-1}				
	0,000	0,890	1,563	2,240	2,917
CÁLCIO, cmolc kg^{-1}					
Biocarvão	1,99	2,36	2,01	1,95	1,91
MB-4	2,04	1,61	1,94	2,27	2,15
Nível*	M/M	M/M	M/M	M/M	M/M
MAGNÉSIO, cmolc kg^{-1}					
Biocarvão	1,49	0,45	1,01	1,21	1,61
MB-4	1,38	1,73	1,43	2,28	2,56
Nível*	A/A	B/A	A/A	A/A	A/A
POTÁSSIO, cmolc kg^{-1}					
Biocarvão	0,07	0,27	0,33	0,41	0,57
MB-4	0,07	0,14	0,14	0,14	0,14
Nível*	B/B	A/M	A/M	A/M	A/M

B, M, A, NS Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto; não sódico; níveis correspondentes a biocarvão/MB-4. Elaborado pelos autores.

Os solos, antes e depois da incubação, se caracterizaram como não sódicos. Mesmo assim, pode-se observar que a porcentagem de sódio trocável (Tabelas 8, 9 e 10), devido ao teor de sódio no solo, aumentou em função, principalmente, do biocarvão, que, apresentando na sua composição $14,37 \text{ g kg}^{-1}$ de sódio, é considerado um material alcalino.

Os valores da capacidade de troca catiônica potencial (CTC) do latossolo, neossolo e argissolo praticamente diminuíram em função das doses do biocarvão e do MB-4. Mesmo assim, conforme mostra a Tabela 1, o nível alto do CTC do latossolo não variou em função dessas doses (Tabela 8). No neossolo, do nível médio,

diminuiu para nível baixo (Tabela 10); e no argissolo, do nível alto, diminuiu para nível médio (Tabela 9). A alcalinidade desses materiais incrementou o pH dos solos (Mendes *et al.*, 2015) e, por isso, foi responsável, pelo menos em parte, pela diminuição da CTC potencial, principalmente pelo MB-4, que possui mais íons responsáveis pela neutralização da acidez do solo do que o biocarvão. Segundo Cheng *et al.* (2006), a formação de grupos carboxílicos decorrente do envelhecimento do biocarvão no solo e a ocorrência de reações de oxidação abiótica em sua superfície tendem a incrementar a CTC com o tempo.

Tabela 8 - Porcentagem de sódio trocável (%), teores em cmolc kg^{-1} da acidez potencial e capacidade de troca catiônica, porcentagem de saturação por bases (%) do latossolo em função das doses de biocarvão e MB-4 e classificação dos dados

	LATOSSOLO					
	PORCENTAGEM DE SÓDIO TROCÁVEL					
Biocarvão	0,50	1,63	1,92	1,94	2,22	2,87
MB-4	0,47	0,55	0,53	0,52	0,47	0,62
Nível*	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NS/NS
ACIDEZ POTENCIAL						
Biocarvão	13,58	8,80	9,30	8,98	8,51	8,19
MB-4	14,68	7,30	7,34	6,54	5,99	5,55
Nível*	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A
CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA						
Biocarvão	17,49	13,25	15,76	15,39	15,38	15,43
MB-4	18,57	12,33	12,97	13,21	12,62	12,52
Nível*	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A	A/A
PORCENTAGEM DE SATURAÇÃO POR BASES						
Biocarvão	22,31	33,59	41,01	41,68	44,70	46,89
MB-4	20,93	40,78	43,39	50,47	52,56	55,66
Nível*	MB/MB	B/B	B/B	B/M	B/M	B/M

*MB, B, M, A, NS Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto; não sódico; níveis correspondentes a biocarvão/MB-4. Elaborado pelos autores.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 8, a porcentagem de saturação por bases (V%) do latossolo, conforme a interpretação na Tabela 2, variou do nível muito baixo aos níveis baixo e médio, com a aplicação de biocarvão e MB-4, respectivamente. O V% do neossolo misturado com o biocarvão variou de baixo a médio, somente com a maior dose (1,257 g kg⁻¹) deste condicionador. No caso com MB-4, o V% foi elevado ao nível médio com a terceira dose (0,583 g kg⁻¹) (Tabela 8). Da mesma forma que ocorreu no neossolo, no argissolo, o V%, que era baixo, aumentou somente com a maior dose de biocarvão, atingindo o nível médio; e com o MB-4, o V% do solo atingiu o nível médio com a dose de 2,240 g kg⁻¹ (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9 - Porcentagem de sódio trocável (%), teores em cmolc kg⁻¹ da acidez potencial e capacidade de troca catiônica, porcentagem de saturação por bases (%) do argissolo em função das doses de biocarvão e MB-4 e classificação dos dados

ARGISSOLO					
PORCENTAGEM DE SÓDIO TROCÁVEL					
Biocarvão	0,81	1,77	2,01	2,20	3,18
MB-4	0,77	0,72	0,73	0,70	0,80
Nível*	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NS/NS
ACIDEZ POTENCIAL					
Biocarvão	7,14	4,94	4,42	4,36	4,13
MB-4	7,81	4,63	4,47	3,68	3,61
Nível*	A/A	M/M	M/M	M/M	M/M
CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA					
Biocarvão	10,78	8,17	7,94	8,12	8,48
MB-4	11,40	8,18	8,05	8,43	8,53
Nível*	A/A	M/M	M/M	M/M	M/M
PORCENTAGEM DE SATURAÇÃO POR BASES					
Biocarvão	33,75	39,55	44,34	46,23	51,35
MB-4	31,45	43,41	44,43	56,36	57,65
Nível*	B/B	B/B	B/B	B/M	M/M

*MB, B, M, A, NS Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto; não sódico; níveis correspondentes a biocarvão/MB-4. Elaborado pelos autores.

A porcentagem de saturação por bases (V%) é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo. Costuma-se

dizer que o solo que apresentar V% maior que 50% é considerado um solo fértil, chamado de “eutrófico”; solos com V% menor que 50% são considerados solos não férteis ou de baixa fertilidade, chamados de “distróficos”. Dessa forma, os solos misturados com o biocarvão e/ou MB-4 se tornaram eutróficos somente com as doses maiores destes materiais.

Assim, os tratamentos que foram definidos neste trabalho (Tabela 2), ou seja, quantidades de biocarvão e/ou MB-4 correspondentes ao dobro das quantidades de carbonato de cálcio para elevar o V% a 40, 50, 60, 70 e 80% no argissolo e neossolo; e a 20, 40, 50, 60, 70 e 80% no latossolo, tanto com o biocarvão como com o MB-4, não se apresentaram com eficácia, ou seja, as incubações dos solos com estes tratamentos não alcançaram os resultados planejados.

Tabela 10 - Porcentagem de sódio trocável (%), teores em cmolc kg⁻¹ da acidez potencial e capacidade de troca catiônica, porcentagem de saturação por bases (%) do neossolo em função das doses de biocarvão e MB-4 e classificação dos dados

NEOSSOLO					
PORCENTAGEM DE SÓDIO TROCÁVEL					
Biocarvão	1,71	1,28	1,63	2,38	3,49
MB-4	1,28	0,92	0,29	1,14	2,36
Nível*	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NS/NS	NS/NS
ACIDEZ POTENCIAL					
Biocarvão	3,05	2,68	2,39	2,29	2,28
MB-4	4,08	2,48	1,86	2,00	1,72
Nível*	M/M	M/B	B/B	B/B	B/B
CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA					
Biocarvão	5,12	4,60	4,49	4,49	4,84
MB-4	6,85	4,30	3,79	4,32	4,32
Nível*	M/M	M/B	B/B	B/B	M/B
PORCENTAGEM DE SATURAÇÃO POR BASES					
Biocarvão	40,34	41,78	46,70	48,90	52,97
MB-4	40,50	42,47	51,08	53,79	60,07
Nível*	B/B	B/B	B/M	B/M	M/M

*MB, B, M, A, NS Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto; não sódico; níveis correspondentes a biocarvão/MB-4. Elaborado pelos autores.

Provavelmente, esses materiais possuem pouco ou quase nada de íons responsáveis pela neutralização da acidez do solo. As maiores doses nos três solos, planejadas para atingir o V% em 80%, atingiram em torno de 50 a 60%, sendo que a resposta do MB-4 foi melhor do que a do biocarvão.

Dessa forma, pode-se dizer que a melhoria nas características químicas dos solos variou conforme as quantidades de biocarvão e MB-4 adicionadas aos solos; as características químicas aumentaram conforme os tratamentos, porém, variou pouco ou quase nada o nível da fertilidade dos solos; e as porcentagens de saturação por bases planejadas com a incubação de biocarvão e/ou MB-4 não foram atingidas.

ESTUDO DE CASO 4

Efeitos do biocarvão de cama de aviário sobre as propriedades eletroquímicas de solos eletronegativos (Chaves *et al.*, 2016)⁴

O ponto de carga zero (PCZ) é uma característica eletroquímica de grande importância em solos com predomínio de cargas dependentes de pH, as quais são influenciadas pela aplicação de material orgânica em solos. No entanto, é necessário saber se a aplicação de biocarvão ao solo tem o mesmo comportamento que a material orgânica.

Por isso, foi realizado um trabalho objetivando avaliar o PCZ, as cargas elétricas e o potencial superficial de solos do Estado da

⁴ . CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B. Effects of poultry litter biochar on electrochemical properties of electronegatives soils. *International Journal of Current Research*, v. 8, p. 40834-40837, 2016.

Paraíba, por meio da aplicação de biocarvão de cama de aviário. Assim, foi instalado um experimento de incubação com os três solos utilizados no Estudo de Caso 3 e o mesmo biocarvão de cama de aviário, durante 100 dias.

Os tratamentos para argissolo, latossolo e neossolo consistiram em quatro doses crescentes deste biocarvão, correspondentes ao dobro das quantidades necessárias para elevar a saturação por bases dos solos em torno de 50, 60, 70 e 80%, calculados com base no carbonato de cálcio (PRNT 100%). Isso foi feito porque não é conhecido o PRNT do biocarvão (Tabela 1).

Tabela 1 - Quantidades de biocarvão aplicadas aos solos para atingir diferentes porcentagens de saturação por bases (V%)

V%	ARGISSOLO	LATOSSOLO	NEOSSOLO
	QUANTIDADE DE BIOCÁRVÃO (g) INCORPORADO AO SOLO (kg)		
50	0,890	3,600	0,240
60	1,563	4,967	0,583
70	2,240	6,367	0,920
80	2,917	7,733	1,257

Elaborado pelos autores.

Nas unidades experimentais, vasos plásticos, foram colocados trezentos gramas de cada amostra de solo misturados com o biocarvão, de acordo com os tratamentos. Em seguida, estas misturas foram umedecidas com água deionizada em torno de 60% da capacidade de campo do solo, mantidas a uma temperatura de 28°C; e pesadas a cada cinco dias para manter a umidade constante. Após 100 dias de incubação, as amostras de solo foram secas ao ar e submetidas às análises de pH em H₂O (1:2,5) e em KCl (1:2,5). Em seguida, os valores de PCZ foram calculados através da fórmula $PCZ = (2 \times pH_{KCl}) - pH_{H_2O}$ (Benites; Mendonça, 1998).

Com os valores de pH, também foram calculados os valores de ΔpH através da fórmula $\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$. O valor do potencial elétrico de superfície (Ψ_0), expresso em mV, foi calculado utilizando-se a equação de Nernst, simplificada por Raij e Peech (1972) da seguinte forma: $\Psi_0 = 59,1 (\text{PCZ} - \text{pH})$. Os resultados foram analisados estatisticamente com Anova e posterior aplicação do teste de Tukey a 5% de probabilidade (biocarvão) e regressão (doses).

Os valores de pH das amostras de solo incubadas com biocarvão e os resultados do cálculo das propriedades eletroquímicas são apresentados na Tabela 2. Em todas as amostras de solo, os valores de PCZ foram inferiores ao $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (Tabela 2), resultando em valores negativos de potencial elétrico (Ψ_0). O sinal negativo e a magnitude de Ψ_0 estão relacionados com o sinal e a magnitude do ΔpH .

Tabela 2 - Propriedades eletroquímicas dos solos incubados com as doses de biocarvão necessárias para atingir diferentes porcentagens de saturação por bases

PROPRIEDADES ELETROQUÍMICAS	PORCENTAGEM DE SATURAÇÃO POR BASES (V%)			
	50	60	70	80
LATOSSOLO				
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	4,99	5,13	5,21	5,29
pH_{KCl}	4,38	4,46	4,57	4,67
ΔpH	-0,61	-0,67	-0,64	-0,62
PCZ	3,77	3,79	3,92	4,05
Ψ_0 (mV)	-71,51	-78,60	-75,65	-72,69
ARGISSOLO				
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	5,02	5,12	5,29	5,25
pH_{KCl}	4,15	4,29	4,42	4,53
ΔpH	-0,87	-0,83	-0,88	-0,72
PCZ	3,28	3,46	3,54	3,81
Ψ_0 (mV)	-102,83	-98,11	-103,42	-84,51
NEOSSOLO				
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	4,58	4,76	4,89	4,96
pH_{KCl}	3,95	4,09	4,22	4,34
ΔpH	-0,64	-0,68	-0,67	-0,62
PCZ	3,31	3,41	3,54	3,72
Ψ_0 (mV)	-75,06	-79,78	-79,19	-73,28

Elaborado pelos autores.

O sinal negativo de ΔpH indica que há predominância de cargas negativas nas três amostras de solos. Neste caso, a capacidade de troca catiônica (CTC) desses solos excede a capacidade de troca aniônica (CTA) em condições de pH natural. No entanto, a magnitude do ΔpH diminuindo de acordo com o aumento das doses de biocarvão mostrou uma redução da CTC.

Da mesma forma, a magnitude do potencial elétrico superficial, Ψ_0 , também diminuiu conforme a aplicação de biocarvão nos solos e, conseqüentemente, os valores do PCZ aumentaram (Tabela 2). Esse comportamento foi confirmado pelas correlações entre os valores do PCZ e aqueles do ΔpH e do Ψ_0 , os quais variaram inversamente, de forma significativa no latossolo e argissolo (Tabela 3).

Tabela 3 - Coeficientes de correlação entre PCZ e atributos dos solos estudados

VARIÁVEIS	LATOSSOLO	ARGISSOLO	NEOSSOLO
	PCZ	PCZ	PCZ
ΔpH	-0,888*	-0,889*	-0,719ns
Ψ_0	-0,889*	-0,897*	-0,711ns
CTC	-0,373ns	-0,552ns	-0,329ns
MO	0,965**	0,978**	0,995**
Biocarvão	0,975**	0,979**	0,995**

*, **, ns, significativo ao nível de 5 e 1% de probabilidade, e, não significativo, respectivamente. Elaborado pelos autores.

A correlação entre os valores de PCZ e CTC não foi significativa nos solos, mas o sinal negativo confirma a variação inversa entre esses valores. Os valores de PCZ correlacionaram-se positivamente a 1% de probabilidade com os valores de matéria orgânica

ca (MO) e biocarvão aplicados nos três solos. Esse comportamento discorda da literatura, que aponta que a matéria orgânica e, consequentemente, o carbono orgânico, tende a diminuir o valor do PCZ. Segundo Raij e Peech (1972), a diminuição do valor do PCZ foi atribuída à adsorção de ânions orgânicos na matriz mineral do solo, o que não ocorre com a aplicação de biocarvão no solo. Provavelmente não ocorre em biocarvão grupos reativos da matéria orgânica, principalmente grupos carboxílicos, que, quando dissociados, originam cargas negativas na faixa de pH comum para o solo (Schnitzer, 1986). O biocarvão aplicado ao solo, devido a sua alcalinidade, neutraliza a acidez potencial (H+Al) dos solos, aumentando o pH destes. E mesmo aumentando os níveis de cátions trocáveis, diminui a CTC devido à diminuição da acidez potencial (Tabela 4).

A pirólise da cama de aviário alterou a qualidade dos compostos de carbono no biocarvão, também ocasionou o aumento da estabilidade do carbono neste produto, diminuindo a taxa de mineralização do biocarvão quando aplicado no solo e, consequentemente, sendo menos eficaz na geração de cargas no solo, em comparação com a aplicação de cama de aviário

Tabela 4 - Acidez potencial e capacidade de troca catiônica (CTC), em cmol. kg⁻¹, no solo sem biocarvão e no solo incubado com a maior dose do biocarvão

SOLO	SEM BIOCARVÃO		MAIOR DOSE DE BIOCARVÃO	
	ACIDEZ POTENCIAL	CTC	ACIDEZ POTENCIAL	CTC
Latossolo	13,58	17,49	8,19	15,43
Argissolo	7,14	10,78	4,13	8,48
Neossolo	5,12	3,05	4,84	2,28

Elaborado pelos autores.

Provavelmente por esses motivos não houve aumento do ΔpH e, portanto, não diminuiu o valor do PCZ. Segundo Andrade *et al.* (2015), o carbono do biocarvão é recalcitrante no ambiente, portanto, incrementos adicionais de CTC devem ser esperados ao longo do tempo, principalmente para reaplicação do biocarvão na mesma área.

Por isso, as propriedades eletroquímicas das amostras desses solos analisados foram afetadas pela aplicação do biocarvão, ou seja, essa aplicação em solos diminuiu os valores, em módulo, do ΔpH e Ψ₀, da CTC e elevou o PCZ.

■ ESTUDO DE CASO 5

Alterações nas propriedades físicas e químicas do solo com uso de biocarvão (Mendes *et al.*, 2021)⁵

No Brasil, devido à sua grande disponibilidade, resíduos de cama de aviário têm sido utilizados como matéria-prima para a fabricação de biocarvão, porém, ainda em uma forma experimental e com poucos resultados a respeito dos efeitos nas propriedades químicas e físicas dos solos.

Dessa forma, foi instalado um experimento no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS) do Departamento de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Campina Grande (PB),

5 . MENDES, J. S.; FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; GUERRA, H. O. C.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B. Chemical and physical changes of soil amended with biochar. **Water Air Soil Pollution**, v. 232, p. 338, 2021.

com doses crescentes de biocarvão de cama de aviário aplicadas em argissolo, coletadas na camada superficial (0-20 cm), com o intuito de avaliar os efeitos do biocarvão nas propriedades químicas e físicas desse solo. O biocarvão utilizado foi produzido no LIS, submetendo os resíduos de cama de aviário a uma pirólise lenta a 350°C por 3 horas, a uma taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹ em um mufla. Após a pirólise, amostras desse biocarvão foram analisadas em relação às propriedades químicas (Brasil, 2014).

A morfologia dos poros do biocarvão foi visualizada em imagens obtidas por um microscópio eletrônico SEM (Hitachi TM-1000). A superfície específica foi obtida com o Brunauer-Emmett-Teller (BET) método. Análises de difração de raios-X também foram realizadas em temperatura ambiente, com um XRD-7000 Aparelho Shimadzu, usando radiação K α de cobre (1,5418 Å), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. A densidade aparente foi analisada de acordo com os métodos adotados por Teixeira *et al.* (2017). Amostras de argissolo também foram analisadas em relação às propriedades químicas e físicas de acordo com os métodos adotados por Teixeira *et al.* (2017).

Para avaliar o efeito do biocarvão nas propriedades químicas do solo, 1,0 kg de solo foi colocado em sacos plásticos (unidades experimentais), misturado com biocarvão de acordo com os tratamentos (0, 0,353, 0,706, 1,059, 1,412 e 1,765 g, correspondendo a 0, 2,02, 4,05, 6,07, 8,10 e 10,12 t ha⁻¹, respectivamente) e incubado por 100 dias. Essa mistura foi mantida a 60% da capacidade do campo, adicionando água deionizada. As doses de biocarvão utilizadas corresponderam a duas vezes as quantidades necessárias

para elevar a saturação por bases do solo em torno de 0, 63, 69, 75, 81 e 87%, calculada com base no poder relativo de neutralização total (PRNT) do carbonato de cálcio (PRNT 100%). Isso foi feito porque o PRNT para biocarvão não é conhecido.

A determinação do efeito do biocarvão nas propriedades físicas do solo seguiu a mesma metodologia de incubação descrita anteriormente, porém, agora com 300 g de solo, maiores doses de biocarvão e um período de incubação de 60 dias. A diminuição das amostras de solo, a redução do período de incubação e o aumento das doses de biocarvão seguiram a sugestão de Chaves *et al.* (2018), com o objetivo de facilitar as determinações das propriedades físicas de solo. O cálculo para determinar as novas doses foi realizado visando aumentar a concentração de matéria orgânica do solo na camada arável (primeiros 20 cm de profundidade) de 18,8 g kg⁻¹ (tratamento de controle) para 25,0; 31,2; 37,4; 43,6 e 49,8 g kg⁻¹, que correspondeu a uma aplicação de 12,39; 24,78; 37,17; 49,56 e 61,95 t ha⁻¹, respectivamente.

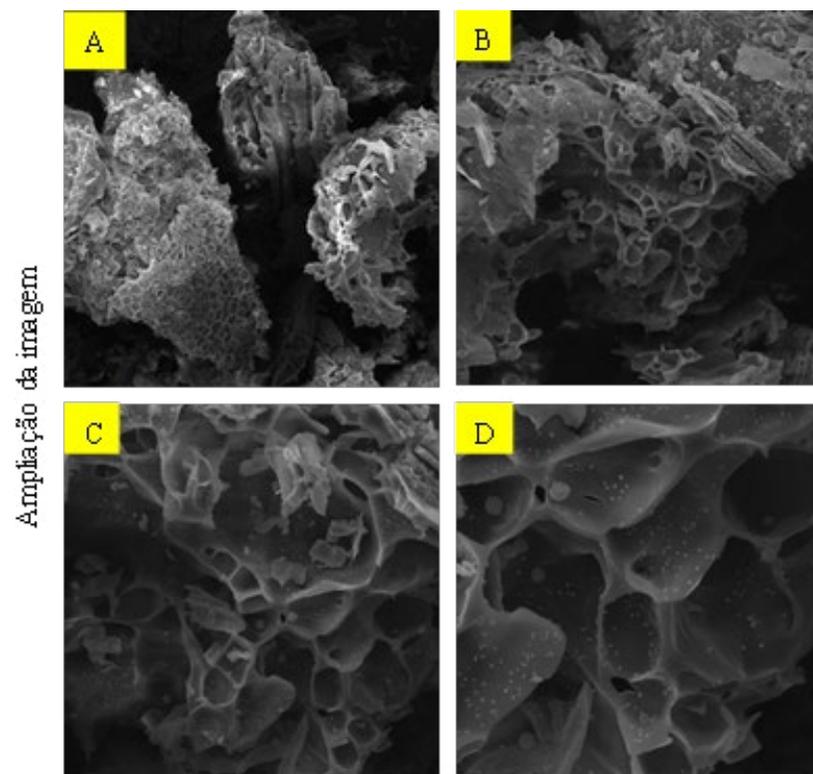
As duas incubações foram montadas usando um delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições.

Os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) e à análise de regressão, utilizando o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2011). Para atender aos pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, os valores das variáveis acidez potencial, sódio, potássio e ponto de murcha permanente foram transformados em $1/\sqrt{x}$, $1/x$, \sqrt{x} e e , respectivamente. Para atender aos pressupostos de normalidade para a capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e concentração de

areia, silte e argila, bem como a densidade de partículas, foi aplicado o teste estatístico não paramétrico de Kruskal-Wallis.

O solo estudado apresentou os seguintes atributos químicos: pH=5,35; Ca=2,78 cmolc kg⁻¹; Mg=1,26 cmolc kg⁻¹; Na=0,11 cmolc kg⁻¹; K=0,17 cmolc kg⁻¹; H+Al=3,27 cmolc kg⁻¹; carbono orgânico=18,8 g kg⁻¹; P=1,27 mg kg⁻¹; e CTC=7,56 cmolc kg⁻¹. O solo tinha uma acidez média, concentração média de carbono orgânico e cátions trocáveis, média capacidade de troca de cátions (CTC) e porcentagem de saturação por bases (V%); a concentração de fósforo foi baixa. Os atributos físicos: areia = 841,7 g kg⁻¹; silte = 83,6 g kg⁻¹; argila = 74,7 g kg⁻¹, densidade aparente=1,38 g cm⁻³; densidade de partículas = 2,70 g cm⁻³; porosidade = 48,88%; teor de umidade (base de peso seco) do ponto de murcha (15 atm) = 4,66%; capacidade de campo (0,33 atm) = 11,81%; e água disponível para as plantas = 8,96%. De acordo com sua distribuição granulométrica, o solo foi classificado como um franco arenoso. O biocarvão de cama de frango apresentou os seguintes atributos: pH = 9,44; CE = 7,33 dS m⁻¹; N = 2,25%; P₂O₅ = 4,08%; K₂O = 4,35%; Ca = 5,04%; Mg = 1,28%; S = 0,41%; B = 0,01%; Zn = 0,05%; Cu = 0,01%; Mn = 0,05%; Fe = 0,72%; umidade = 4,52%; carbono orgânico = 42,22%; e razão C/N = 18,76. Este biocarvão tem um pH extremamente alto e provavelmente um alto potencial de calagem em solos ácidos; porém, também pode alcalinizar o solo devido ao aumento do pH nos solos. As imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície do biocarvão da cama de aviário (Figura 1) mostram que não há relativa uniformidade dos poros em alguns pontos da amostra.

Figura 1 - Microscopia eletrônica de varredura de biocarvão de cama de aviário pirrolisado a 350°C. Imagem ampliada 250x (A), 500x (B), 1000x (C) e 2000x (D)

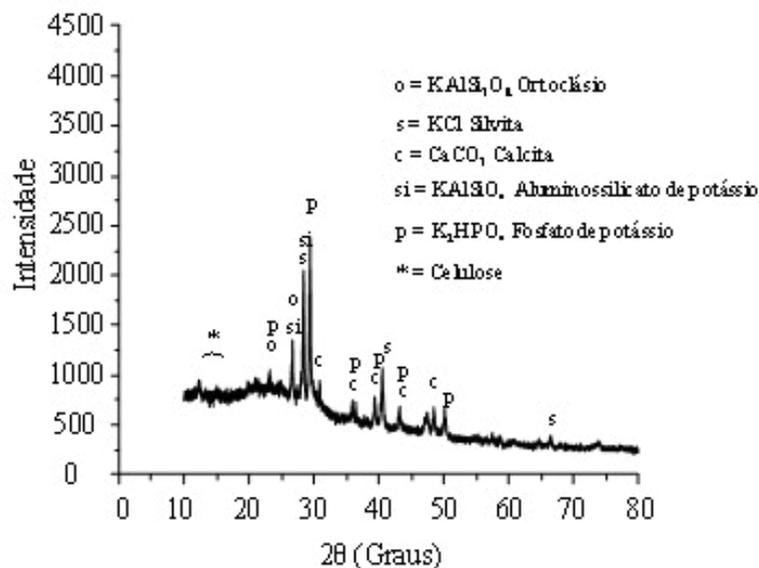


Elaborado pelos autores.

O método BET com adsorção de N₂ mostrou que o biocarvão tinha tamanho médio de poros de aproximadamente 14,8 nm, característico de mesoporos (2 a 50 nm); e uma superfície específica de 3,37 m² g⁻¹. Os padrões de difração de raios X (DRX) do biocar-

vão da cama de aviário (Figura 2) eram complexos, mostrando padrões de pico largos com algum grau de ordem em curto alcance, indicando um material amorfo. Tais características dificultaram a atribuição de picos menores para específicos minerais.

Figura 2 - Padrão de difração de raios-x do biocarvão de cama de aviário



Elaborado pelos autores.

Observam-se que os picos mais fortes em 2θ $28,346^\circ$ ($d=3,146 \text{ \AA}$) e $40,09^\circ$ ($d=2,225 \text{ \AA}$) indicam a presença de componentes inorgânicos com o potássio em sua constituição, como a silvita (KCl, PDF 041-1476); e a 2θ $28,790^\circ$ ($d=3,098 \text{ \AA}$) para silicato de potássio e alumínio (KAlSiO₄, PDF 050-0437). A presença de calcita (CaCO₃) evidencia, como relatado anteriormente, o caráter alcalino de biocarvão de cama de aviário. Compostos de

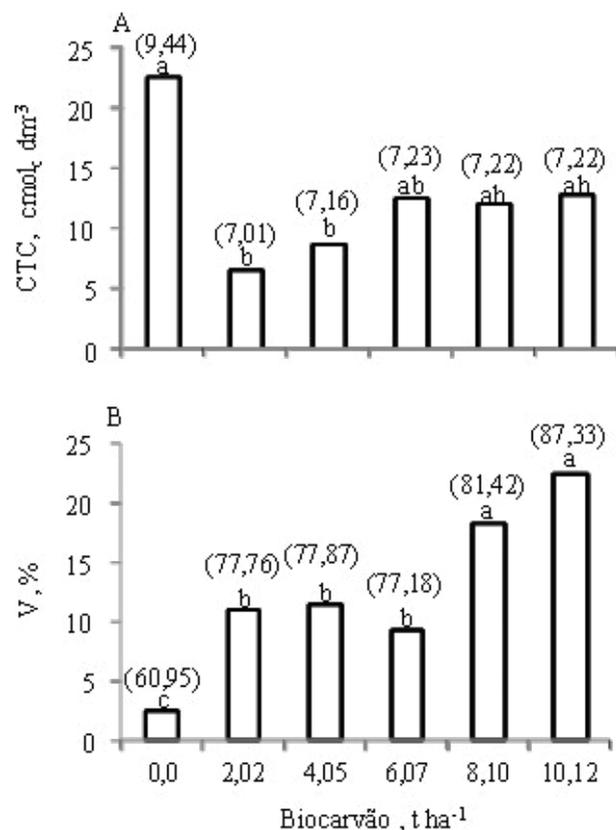
feldspato [Ortoclásio (KAlSi₃O₈)] e fosfato de potássio (K₂(HPO₄)) também foram identificados, confirmando uma concentração considerável de P, K, Ca e Mg.

Conforme as análises estatísticas dos resultados do solo após a incubação com biocarvão por 100 dias, foi constatado que as doses de biocarvão influenciaram significativamente as propriedades químicas do solo, aumentando a fertilidade do solo, com exceção dos teores de cálcio e magnésio.

De modo geral, podemos resumir os efeitos do biocarvão no solo da seguinte maneira: - houve um aumento do pH do solo de 5,35 (controle) para 5,85 com a maior dose de biocarvão; - houve uma redução significativa da acidez potencial de 75,33% entre o tratamento controle e a dose 10,12 t ha⁻¹ de biocarvão; - o alumínio foi encontrado apenas no tratamento controle (ausência de biocarvão) na concentração de 0,11 cmol_c dm⁻³; - a condutividade elétrica aumentou de 40,8% em relação à testemunha (ausência de biocarvão); - a aplicação da maior dose de biocarvão promoveu, quando comparada ao tratamento controle, um aumento no teor de fósforo do solo em 330%; - a concentração máxima de potássio, 0,43 cmol_c dm⁻³, foi observada com a dose de 10,12 t ha⁻¹; - houve um aumento significativo do teor de sódio na taxa de 0,0093 cmol_c dm⁻³ para cada tonelada de biocarvão aplicada; - os teores de cálcio e magnésio não foram influenciados pelo biocarvão, cujas médias foram 3,72 e 1,67 cmol_c dm⁻³, respectivamente; - a soma das bases ajustou um modelo de regressão polinomial de segunda ordem, tendo o menor valor (5,48 cmol_c dm⁻³) com a utilização de 3,59 t ha⁻¹ de biocarvão e o maior (6,29 cmol_c dm⁻³) com a maior dose de biocarvão, este último correspondendo a um aumento de 10,07% quando comparado ao tratamento controle; - houve aumento do carbono orgânico na taxa de 0,46 g kg⁻¹ por t ha⁻¹ de biocarvão.

A maior capacidade de troca catiônica (CTC) foi encontrada no tratamento controle (9,44 cmolc dm^{-3}) (Figura 3A), atribuída principalmente à elevada acidez potencial (H + Al).

Figura 3 – Capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação de bases (V) dependendo da aplicação de doses de biocarvão



Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Kruskal Wallis em $p \leq 0,05$. Os valores entre parênteses correspondem às médias observadas. Elaborado pelos autores.

Com a aplicação de $2,02 \text{ t ha}^{-1}$, a CTC do solo diminuiu 25,74% ($7,01 \text{ cmol c dm}^{-3}$), devido à diminuição da acidez potencial. A aplicação de biocarvão em doses maiores superiores a $2,02 \text{ t ha}^{-1}$ aumentaram a CTC do solo, porém sem diferenças significativas entre si.

A aplicação de biocarvão no solo aumentou a saturação por bases, sendo observado um aumento de 33,58% e 43,28% com as duas maiores doses ($8,09$ e $10,12 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente), quando comparado com o tratamento testemunha (Figura 3B), sem diferença significativa entre eles; entretanto, essas maiores doses diferiram significativamente com as bases de saturação observadas com as demais doses de biocarvão, apresentando o menor valor com o tratamento sem biocarvão (controle).

Embora, como indicado anteriormente, a aplicação de doses crescentes de biocarvão tenha diminuído a acidez potencial, mantidos os valores de cálcio e magnésio semelhantes e aumentados os valores de potássio e sódio no solo, a diminuição da acidez potencial foi maior do que o aumento das bases trocáveis no solo. Assim, embora o aumento da CTC com os tratamentos de biocarvão tenha sido pequeno, sugere uma melhora na fertilidade do solo, aumentando o número de cátions trocáveis no solo.

Em relação às mudanças nas propriedades físicas do solo, foi observado que todas as propriedades físicas do solo avaliadas neste estudo foram significativamente influenciadas pela aplicação de biocarvão, ou seja: - o solo incubado com o biocarvão apresentou alteração na densidade do solo com redução linear significativa de 13,70%, quando comparado ao tratamento controle com a maior dose ($61,95 \text{ t ha}^{-1}$); - a porosidade do solo foi influenciada pela diminuição da densidade do solo, aumentan-

do linearmente a uma taxa de 0,1134 % por t ha⁻¹ de biocarvão aplicado. Comparando o tratamento controle com a maior dose, o aumento da porosidade foi de 14,15%; a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível no solo para as plantas aumentaram linearmente com a aplicação do biocarvão. O aumento da capacidade de campo e o do ponto de murcha permanente, com a maior dose de biocarvão, foram de 17,79% e 39,78%, respectivamente, quando comparados ao tratamento testemunha. O aumento dessas propriedades resultou em maior água disponível, aumentando a uma taxa de 0,1447% por t ha⁻¹ de biocarvão, quando comparado ao tratamento controle. Esse aumento da disponibilidade hídrica para as plantas pode resultar, portanto, em um melhor crescimento e produtividade das plantas.

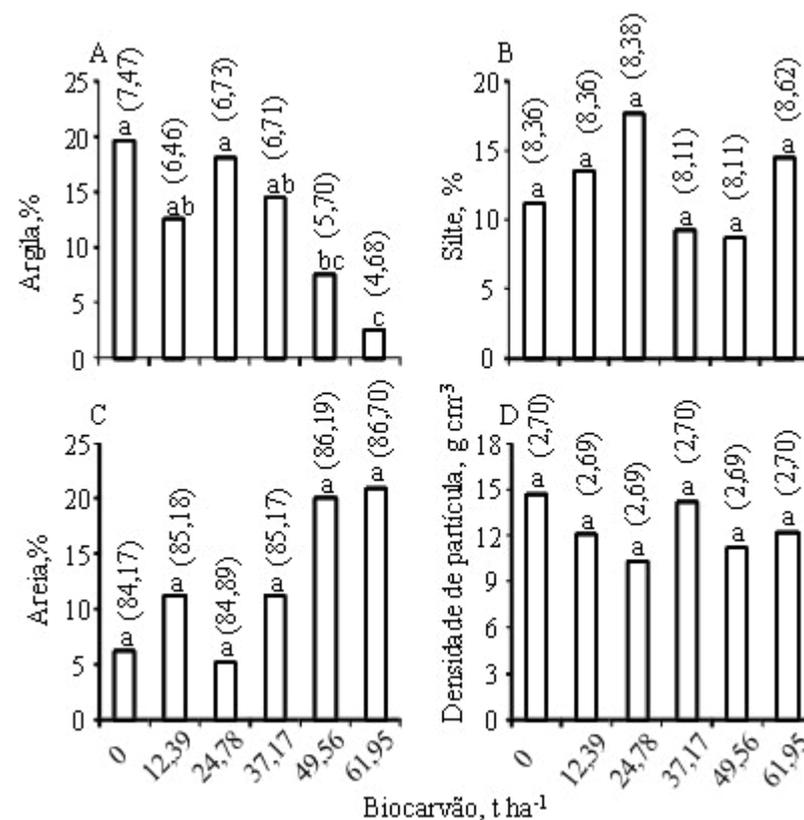
Analisando a distribuição granulométrica do solo, observou-se que apenas o teor de argila foi afetado significativamente pelo aumento do biocarvão, com redução de 37,35% quando comparada a dose de 61,95 t ha⁻¹ aplicada ao solo com o tratamento testemunha (Figura 4A). Os teores de silte e areia não variaram estatisticamente com a dose de biocarvão, embora, para a areia, pareça haver uma tendência de aumento da quantidade com as maiores doses de biocarvão (Figuras 4B e 4C).

Analisando a Figura 4D, pôde-se observar que as doses de biocarvão aplicadas não promoveram mudanças significativas na densidade de partículas do solo, o que pode ser devido às pequenas quantidades de biocarvão aplicadas no solo.

Apesar da grande diferença entre a densidade de partículas do biocarvão (1,10 g cm⁻³) e a do solo (2,73 g cm⁻³), aparentemente o biocarvão não teve influência marcante na densidade de partículas da mistura. Com base nos resultados apresentados,

a aplicação de biocarvão de cama de aviário ao solo demonstra grande potencial como condicionador de solo, melhorando a sua qualidade.

Figura 4 - Argila (A), lodo (B), areia (C) e densidade de partículas do solo (D) incubado com diferentes doses de biocarvão



Nota: Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Kruskal-Wallis em p ≤ 0,05. Os valores entre parênteses correspondem às médias observadas. Elaborado pelos autores.

ESTUDO DE CASO 6

Efeito do biocarvão de cama de aviário sobre as propriedades físicas do argissolo. (Chaves *et al.*, 2018)⁶

Um estudo foi realizado para investigar o efeito do biocarvão de cama de aviário em análises granulométricas, densidade aparente, porosidade e capacidade de água disponível de um argissolo vermelho amarelo eutrófico típico, localizado no município Lagoa Seca, Estado da Paraíba, Brasil. Este solo apresentou os seguintes atributos, segundo Embrapa (2011): pH (H₂O) = 5,7; condutividade elétrica = 0,16 (mmhos cm⁻¹; Ca = 1,56 cmol_c kg⁻¹; Mg = 1,18 cmol_c kg⁻¹; Na = 0,06 cmol_c kg⁻¹; K = 0,26 cmol_c kg⁻¹; H+Al = 1,27 cmol_c kg⁻¹; carbono orgânico = 8,6 g kg⁻¹; P = 4,9 mg kg⁻¹; areia = 736,0 g kg⁻¹; silte = 100,3 g kg⁻¹; argila = 163,7 g kg⁻¹; densidade aparente = 1,29; porosidade = 51,32%.

O biocarvão de cama de aviário utilizado neste estudo apresentou os seguintes atributos, de acordo com a metodologia de Andrade e Abreu (2006): pH H₂O (1:2.5) = 10,2; Ca = 48,3 g kg⁻¹; Mg = 14,6 g kg⁻¹; Na = 7,3 g kg⁻¹; K = 47,16 g kg⁻¹; P = 29,4 g kg⁻¹; CE = 12690 mS cm⁻¹; areia = 836,8 g kg⁻¹; silte = 100,0 g kg⁻¹; argila = 63,2 g kg⁻¹.

Para obter uma impressão dos poros do biocarvão, utilizou-se um microscópio óptico da marca Hirox, modelo KH-1300, e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Hitachi, com modelo TM-1000.

Para avaliar o efeito do biocarvão nas propriedades físicas do solo, seis doses de biocarvão (0; 1,6; 2,3; 3,1; 3,9 e 4,6 g, corres-

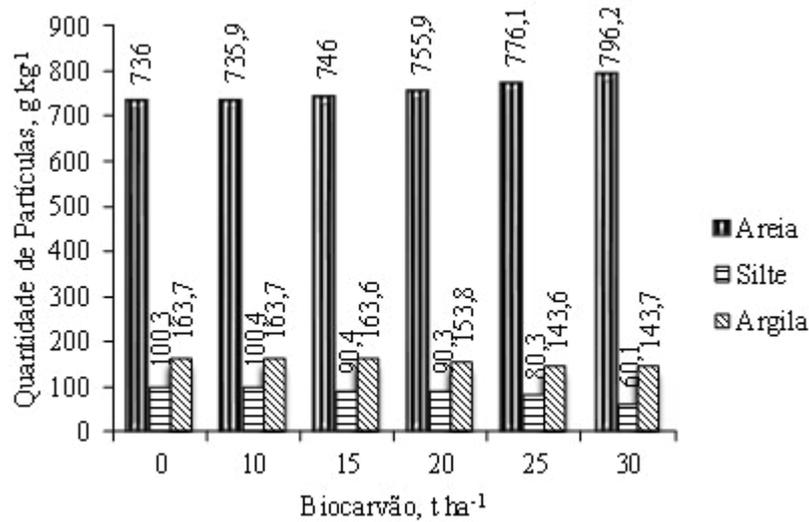
pondente a 0; 10; 15; 20; 25 e 30 toneladas ha⁻¹) foram incubadas em amostras do solo (0,4 kg) durante 60 dias. Todos os ensaios foram realizados em duplicado. Após este período, as propriedades físicas das amostras de solo foram realizadas de acordo com a metodologia descrita em Embrapa (2011). O tamanho da partícula foi analisado pelo método do densímetro, também conhecido como método do hidrômetro, proposto por Bouyoucos. A densidade aparente (a) foi determinada pelo método do tubo de ensaio graduado; e a densidade de partícula (b) pelo método do balão volumétrico. A porosidade total foi calculada como [(b-a) / b] x 100; e os teores de umidade das amostras foram medidos em diferentes potenciais matriciais (1,52; 1,01; 0,51; 0,10; 0,033 e 0,01 MPa). A umidade das amostras foi determinada pelo Richard extrator (EMBRAPA, 2011).

Conforme a Figura 1, doses de biocarvão influenciaram a granulometria do solo misturado com biocarvão, ou seja, a quantidade de areia aumentou cerca de 8,18%, enquanto as quantidades de silte e argila diminuíram cerca de 40,08 e 12,22%, respectivamente. Provavelmente essa variação está de acordo com o comportamento do biocarvão; embora este material seja orgânico, quando analisado em relação ao comportamento textural, apresentou 836,8; 100,0 e 63,2 g kg⁻¹ de areia, silte e argila.

Na verdade, o biocarvão não é formado por essas partículas minerais, mas, de acordo com o tamanho das partículas de biocarvão, se comporta como se fossem as partículas minerais em relação ao tamanho das partículas. Portanto, a aplicação crescente de biocarvão ao solo aumentou a quantidade de partículas com tamanho correspondente à areia na análise granulométrica da mistura de solo com biocarvão.

6 . CHAVES, L. H. G.; LIMA, W. B.; CHAVES, I. B.; BURITI, J. S.; FOOK, M. V. L.; SOUZA, J. W. Effect of poultry litter biochar on Ultisol physical properties. *African Journal of Agricultural Research*, v. 13, p. 9, p. 412-418, 2018.

Figura 1 - Distribuição granulométrica da mistura de solo com biocarvão



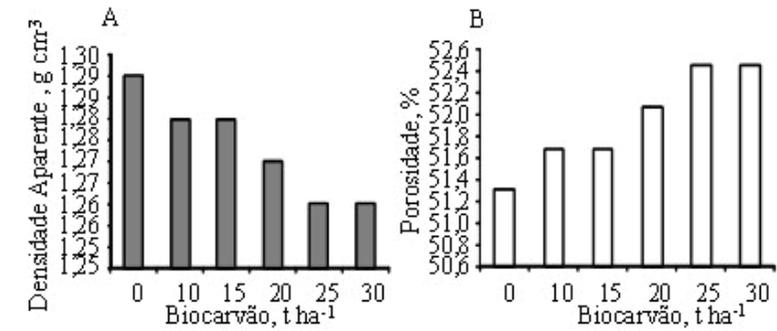
Elaborado pelos autores.

A densidade aparente (Figura 2A) e o espaço poroso (Figura 2B) do solo diminuiu e aumentou, respectivamente. De acordo com Mukherjee e Lal (2013), a densidade aparente varia inversamente com a porosidade em função da aplicação de biocarvão, isso ocorre porque a porosidade do biocarvão é muito alta e, quando usado no solo, diminui significativamente a densidade aparente, aumentando o volume dos poros. Quanto maior o número de poros (macroporos) que o solo apresenta, menor sua densidade.

Através da microscopia ótica e eletrônica, podemos observar as diferentes formas do biocarvão utilizado neste trabalho (Figuras 3 e 4). Nas imagens, podem ser observadas as formas e a

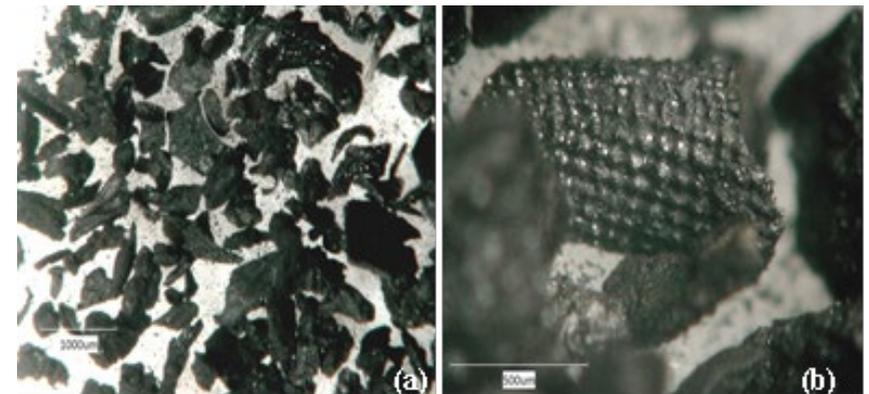
distribuição das partículas (Figura 3), bem como uma estrutura topográfica com elevada rugosidade (Figura 3b).

Figura 2 - Mudanças na densidade do solo (A) e percentual de porosidade (B) do solo corrigido com doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

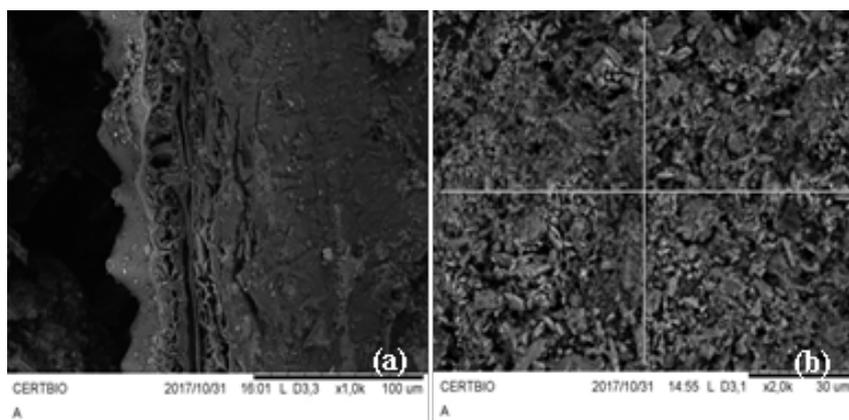
Figura 3 - Fotomicrografias das partículas do biocarvão obtidas por MO (a) com aumento de 60X; (b) com aumento de 200X



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base na Figura 4, observa-se que a morfologia da amostra de biocarvão apresentou uma superfície heterogênea, dividida em partes lisas e outras rugosas, apresentando sulcos resultantes dos poros superficiais na maior parte de sua extensão.

Figura 4 - Fotomicrografias das partículas do biocarvão obtidas por MEV: (a) com aumento de 1000X; (b) com aumento de 2000X



Elaborado pelos autores.

De acordo com a análise espectroscopia de energia dispersiva (DES), esta amostra apresentou potássio, 3,5%; cálcio, 2,3%; nitrogênio, 6,0%, cloreto, 0,6%, alumínio, 0,8%, fósforo, 0,6%, magnésio, 0,6%, sódio, 0,6%, silício 0,2% e enxofre, 0,1%, com predominância de 69,9% de carbono e 14,9% de oxigênio.

Com relação à variação de densidade, houve um decréscimo de 2,32% do menor (0 t biocarvão ha⁻¹) para o maior tratamento (30 t biocarvão ha⁻¹), atingindo 1,26 g cm⁻³.

A maior dose de biocarvão misturado com o solo exibiu maior porosidade (52,45%) do que o controle (51,32%), porém esse aumento correspondeu a apenas 2,2%. De acordo com Herath et al. (2013), esse aumento da porosidade depende do tipo de biocarvão usado e do tipo de solo onde o biocarvão foi aplicado. Em geral, o aumento na porosidade do solo é devido à alta natureza porosa do biocarvão, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4 (Mukherjee; Lal, 2013).

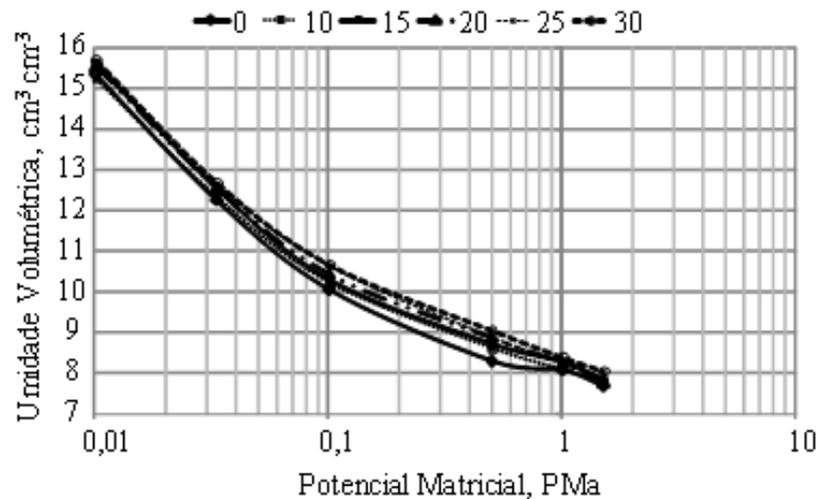
As amostras com maior dose de biocarvão mostram claramente, na curva de retenção (Figura 5), um aumento no teor de umidade em relação à amostra de controle em todos os potenciais matriciais, embora o maior aumento tenha sido observado em 0,5065 PMa.

A maior variação de água disponível, de acordo com as doses de biocarvão em relação à testemunha, correspondeu a 1,2% na dose de 15 t ha⁻¹ de biocarvão.

Neste trabalho, os efeitos do biocarvão nas propriedades físicas do solo foram muito pequenos, provavelmente, devido à pouca quantidade de biocarvão aplicado ao solo, cerca apenas de 1% do peso do solo.

No caso do pequeno aumento de água disponível no solo, isso também pode ter sido influenciado pelo pequeno aumento da porosidade do solo com a aplicação do biocarvão e/ou curto tempo de incubação do biocarvão no solo. Mesmo assim, esse pequeno aumento na disponibilidade hídrica pode resultar no crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas nesse solo, devido à melhoria das propriedades físicas.

Figura 5 - Curva de retenção de água no solo com diferentes doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

De modo geral, a aplicação de biocarvão ao solo melhorou as suas propriedades físicas, ou seja, modificou a análise granulométrica, levou a uma diminuição na densidade aparente, aumentou o volume total de poros e aumentou o teor de água, principalmente, no potencial mátrico 0,5065 MPa. A dose de biocarvão de 30 ton ha⁻¹ foi melhor na densidade e porosidade do solo; na retenção de água, a melhor dose de biocarvão foi de 15 ton ha⁻¹.

ESTUDO DE CASO 7

Alterações químicas do solo e avaliação da mobilidade de macronutrientes em latossolo tratado com biocarvão. (Fernandes *et al.*, 2018)⁷

Para avaliar o efeito de um biocarvão de cama de aviário nas características químicas do solo, ou seja, no complexo sortivo de um latossolo vermelho amarelo, foi conduzido um experimento no LIS/DEAG/UFCCG, utilizando colunas de solo descritas a seguir. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas corresponderam às seis doses de biocarvão (0; 7,85; 11,77; 15,7; 19,62 e 23,55 g/0,00785m², de acordo com 0, 10, 15, 20, 25 e 30 t ha⁻¹), e as subparcelas foram as profundidades do solo (0-10 e 10-20 cm).

O biocarvão da cama de aviário utilizado apresentou os seguintes atributos, de acordo com a metodologia Brasil (2014): pH = 9,45, P₂O₅ = 7,78%, K₂O = 4,90%, Ca = 6,83%, Mg = 1,34%, Na = 0,73%, S = 0,74%, Fe = 0,46%, Mn = 0,09%, Cu = 0,04%, Zn = 0,08%, B = 0,01%, matéria orgânica = 39,77%.

A amostra de solo utilizada foi coletada na camada superficial (0-0,20 m) de um latossolo vermelho amarelo, localizado no município de Areia, Estado da Paraíba, Brasil, com os seguintes atributos conforme metodologia Embrapa (2011): argila = 305,5

7 . FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B.; TITO, G. A. Soil chemical amendments and the macronutrients mobility evaluation in Oxisol treated with biochar. *Journal of Agricultural Science*, v. 10, n. 10, p. 238-247, 2018.

g kg⁻¹, silte = 262,0 g kg⁻¹, areia = 432,5 g kg⁻¹, pH (H₂O) = 5,30, Ca = 0,93 cmol_c kg⁻¹, Mg = 0,55 cmol_c kg⁻¹, Na = 0,02 cmol_c kg⁻¹, K = 0,04 cmol_c kg⁻¹, H = 1,83 cmol_c kg⁻¹, Al = 1,8 cmol_c kg⁻¹, P = 3,3 mg kg⁻¹, matéria orgânica = 13,6 g kg⁻¹.

A coluna de solo foi preparada com tubo de PVC com diâmetro de 10 cm e comprimento de 22 cm. A amostra de solo foi colocada na coluna e compactada, batendo na base da coluna até que a altura do solo atingisse 20 cm; nos tratamentos, o biocarvão foi incorporado nos 5 cm superiores do solo nas colunas, a fim de simular a disposição desse material na superfície, como normalmente a matéria orgânica é aplicada ao solo. Os outros 2cm da parte superior não foram preenchidos com terra para facilitar a adição de água durante as percolações. A parte inferior das colunas foi vedada com tela para reter o solo nas colunas e facilitar a drenagem do lixiviado, que foi coletado em recipientes colocados abaixo delas. A coluna foi colocada em bandejas contendo água para atingir a capacidade de campo através da ascensão capilar. Após 24 horas, em cada coluna, foi aplicado um volume de 40,0 mL de água deionizada diariamente (durante 30 dias), simulando uma precipitação mensal de 168,15 mm (média para a cidade de Campina Grande em abril).

A solução lixiviada foi coletada diariamente durante o período experimental (30 dias) e acondicionada em reservatórios de 1000 mL para análise química completa (APHA, 2012). Após esse período, cada coluna foi seccionada em duas partes de 10 cm cada (0-10 cm, denominado “topo”, 10-20 cm, denominado “base”), secas à temperatura ambiente, homogeneizadas e amostradas para análises químicas (EMBRAPA, 2011).

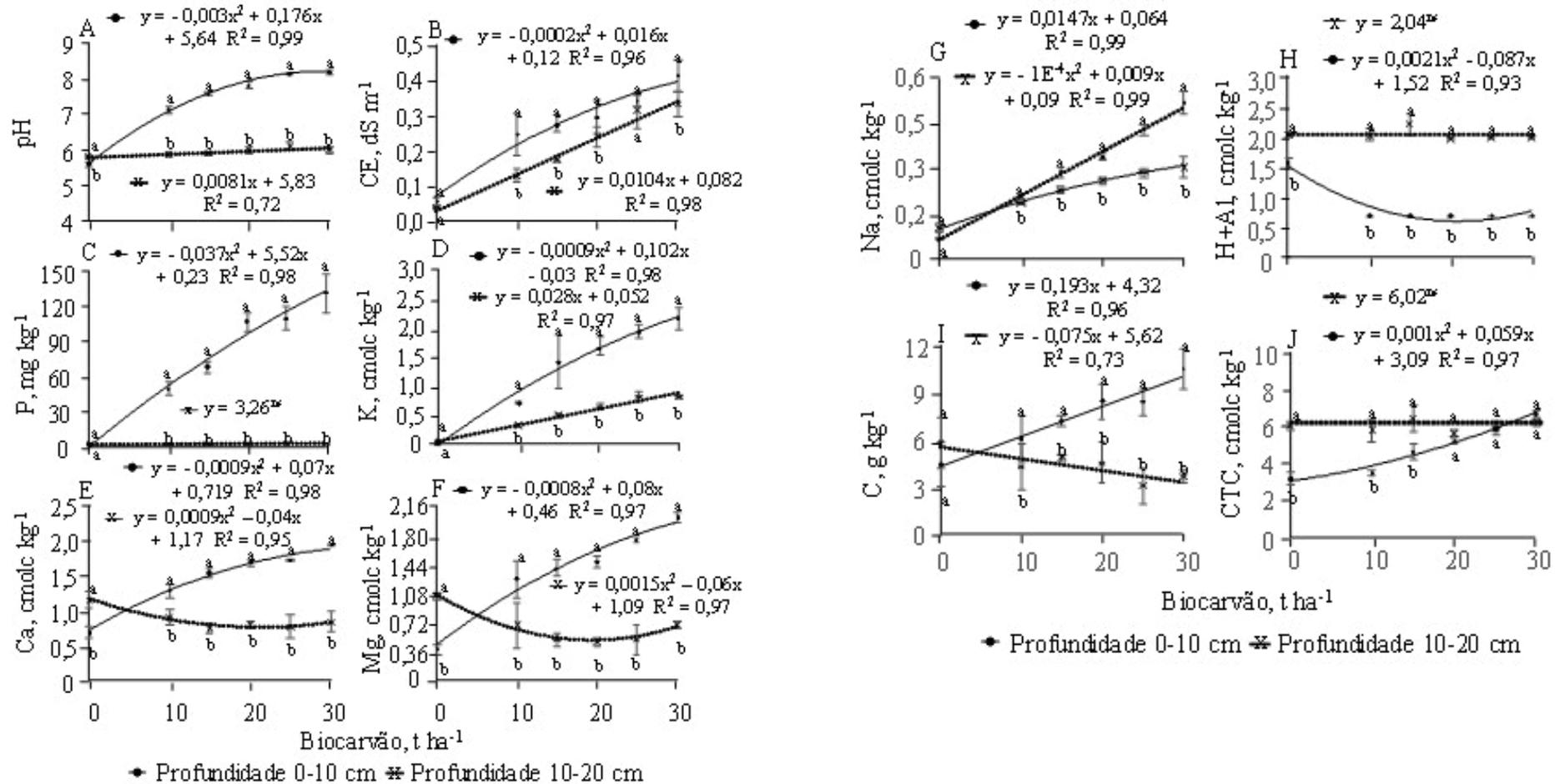
Os dados do lixiviado e do solo foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com aplicação do software SISVAR (Ferreira, 2011). Com a significância das doses, as médias dos parâmetros avaliados no solo (parcelas) e no lixiviado foram submetidas à análise de regressão. Esses parâmetros também foram analisados no solo de acordo com as duas profundidades (subparcelas), comparando suas médias entre si dentro da mesma dose pelo teste “t”.

Conforme a ANOVA, as doses de biocarvão, as profundidades do solo e a interação dessas fontes de variação influenciaram significativamente pH, condutividade elétrica (CE), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), sódio (Na), potássio (K), carbono (C), acidez potencial (H+Al) e capacidade de troca catiônica (CTC) nas duas camadas do solo.

Como mostrado na Figura 1A, o pH praticamente não variou no solo sem biocarvão, no entanto, o biocarvão aplicado ao solo aumentou o pH do solo nas duas camadas analisadas (topo e base). No entanto, mudanças mais significativas foram observadas no topo, cujo valor máximo de pH calculado atingiu 8,22, aplicando 29,28 t ha⁻¹ (Figura 1A).

Na base da coluna, as médias de pH foram ajustadas ao modelo linear, apresentando um aumento de 0,0081 unidades para cada tonelada de biocarvão/hectare, ou seja, esses valores de pH permaneceram relativamente inalterados independentemente das doses aplicadas. Esse resultado mostra que as reações de neutralização da acidez do solo ocorrem na camada de incorporação do biocarvão. Em relação a esse atributo químico, o pH médio estatisticamente significativo no solo superficial foi maior do que o observado no solo base, independentemente dos níveis de biocarvão aplicados (Figura 1A).

Figura 1 - Comportamento dos parâmetros químicos no topo e na base da coluna de solo em função de doses crescentes de biocarvão



Nota: As barras verticais representam o erro padrão e as médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre as profundidades dentro da mesma dose de biocarvão. Elaborado pelos autores.

Segundo Sparks (2003), mudanças no pH do solo ocorrem quando os cátions do biocarvão deslocam o alumínio (Al) dos sítios de troca de argila e/ou matéria orgânica e então reagem com espécies monoméricas solúveis de Al. Além disso, dependendo da biomassa a ser utilizada na preparação do biocarvão, cátions básicos como Ca, K, Mg e Si podem formar óxidos alcalinos ou carbonatos durante o processo de pirólise e, uma vez liberados no meio ambiente, reagem com H⁺ e monoméricos Al, aumentando o pH do solo e diminuindo a acidez trocável (Novak *et al.*, 2009).

A condutividade elétrica apresentou comportamento semelhante ao do pH do solo, cujas médias aumentaram em função da aplicação de doses crescentes de biocarvão. Os valores médios de condutividade elétrica (CE) do solo superficial foram ajustados ao modelo de regressão polinomial de segunda ordem, cujo valor máximo observado correspondeu a 0,48 dS m⁻¹, com aplicação de dose superestimada em 44 t ha⁻¹. Na base, a maior CE (0,39 dS m⁻¹) foi verificada com a aplicação de 30 t ha⁻¹ de biocarvão. Comparando-se os valores de CE entre as duas profundidades analisadas, pode-se constatar que apenas na ausência e na dose de 25 t ha⁻¹ de biocarvão suas médias não diferem entre si (Figura 1B).

O aumento da condutividade elétrica nas amostras de solo está relacionado ao aumento das bases trocáveis (potássio, cálcio, magnésio e sódio) disponíveis no biocarvão. No topo, houve um aumento significativo dessas bases, porém, na base, apenas os teores de potássio e sódio (Figuras 1D e 1G) aumentaram em função das doses de biocarvão. Além disso, o aumento das cargas elétricas negativas do solo, promovidas pela elevação do pH, contribuiu para a diminuição da mobilidade desses elementos. É evidente que o aumento nos valores de CE devido à aplicação de biocarvão no solo dependerá do material de origem do biocarvão.

O fósforo no solo da camada superior da coluna foi influenciado pela adição do biocarvão, apresentando concentração máxima de 205,92 mg, aplicando-se 74,56 t ha⁻¹ de biocarvão. Esse comportamento não foi observado quando o solo foi analisado na base, ou seja, os teores de fósforo não diferiram estatisticamente entre as doses, apresentando concentração média de 3,26 mg dm⁻³, praticamente igual à testemunha. O teor de fósforo analisado diferiu entre as profundidades com exceção da ausência de biocarvão (Figura 1C). Isso se deve à fixação do fósforo ao solo, não havendo lixiviação desse elemento ao longo da coluna. A alta concentração de P na biomassa utilizada nesta pesquisa (7,78%) e o aumento do pH do solo promovido pelo esse resíduo, principalmente no topo, influenciaram positivamente o aumento do P do solo.

A aplicação de biochar influenciou significativamente o teor de potássio, apresentando no topo uma concentração máxima de 2,87 cmolc dm⁻³, com dose superestimada de 56,77 t ha⁻¹. O teor desse elemento no solo na base da coluna aumentou a uma taxa de 0,03 cmolc dm⁻³ para cada tonelada de biocarvão aplicada (Figura 1D).

O teor de sódio aumentou proporcionalmente com a aplicação do biocarvão, de forma a apresentar concentração de 0,34 e 0,50 cmolc dm⁻³ no topo e na base da coluna de solo, respectivamente, nas dosagens de 49,5 e 30 t ha⁻¹ (Figura 1G). Avaliando o efeito da profundidade dentro de cada nível de biocarvão, verifica-se que houve diferença significativa tanto em relação ao potássio (Figura 1D) quanto ao sódio (Figura 1G), exceto na ausência de biocarvão.

O cálcio e o magnésio na ausência do biocarvão apresentaram teores mais elevados na base da coluna do solo, porém, quando aplicado o biocarvão, observou-se uma diminuição na mobilidade desses nutrientes, com teores mais elevados no topo da coluna. Os teores médios de cálcio e magnésio no topo da coluna foram

ajustados ao modelo de regressão polinomial de segunda ordem, cujos valores máximos corresponderam a 1,97 e 2,23 cmolc dm^{-3} , aplicando-se 37,27 e 47,13 t ha^{-1} , respectivamente (Figuras 1E e 1F). O conteúdo desses elementos diferiu entre as profundidades, independentemente dos níveis de biocarvão aplicados.

Apesar de ter diminuído o teor dos elementos analisados na base da coluna, houve uma mobilidade deles de acordo com a seguinte sequência: $\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{P}$, cujos valores percentuais em relação às quantidades de cada elemento aplicado com a dose de 30 t ha^{-1} de biocarvão correspondeu a 41,22%; 30,43%; 25,52%; 11,11% e 0,18%, respectivamente. O Na e o K competiram com o Ca pelos sítios de troca na superfície do solo por serem cátions monovalentes e terem concentração 9,4 e 1,4 vezes menor em relação ao Ca, respectivamente, o que provocou maior fluxo vertical na coluna de lixiviação.

É importante ressaltar que o solo utilizado nesta pesquisa é um latossolo vermelho amarelo, apresentando como características alto grau de intemperismo, lixiviação intensa, argilas com baixa atividade e baixos valores de capacidade de troca catiônica (CTC) e pH (EMBRAPA, 2013).

Como esperado, a aplicação de biocarvão no solo mostrou um aumento na concentração de carbono orgânico no topo da coluna, com diferença significativa no conteúdo entre as profundidades com exceção da ausência de biocarvão (Figura 1I). No topo, com a aplicação de 30 t ha^{-1} , o teor de carbono orgânico aumentou 134,26% em relação ao controle, o que reflete positivamente a capacidade de troca catiônica (CTC), fundamental para o latossolo, que tem predominância de baixa argila de atividade.

A capacidade de troca catiônica do solo aumentou em função das doses crescentes do biochar apenas na parte superior do solo,

cujas maiores médias calculadas corresponderam a 6,76 cmolc dm^{-3} , com a aplicação de 30 t ha^{-1} (Figura 1J). Na base da coluna, a CTC média correspondeu a 6,02 cmolc dm^{-3} . Os valores de CTC diferiram estatisticamente entre as camadas analisadas nas três primeiras doses (0; 5 e 10 t ha^{-1}) (Figura 1J).

Ainda com relação à CTC, os cátions básicos foram os principais responsáveis pelo seu aumento no topo, enquanto na base, a acidez potencial foi determinante para manter o mesmo valor da CTC, independentemente da dose de biocarvão aplicada. Esses resultados sugerem que a adição de biocarvão aumenta a capacidade dos solos de reter nutrientes, aumentando a probabilidade de serem absorvidos pelas raízes das plantas, reduzindo assim a lixiviação e o transporte de nutrientes para reservatórios superficiais ou subterrâneos.

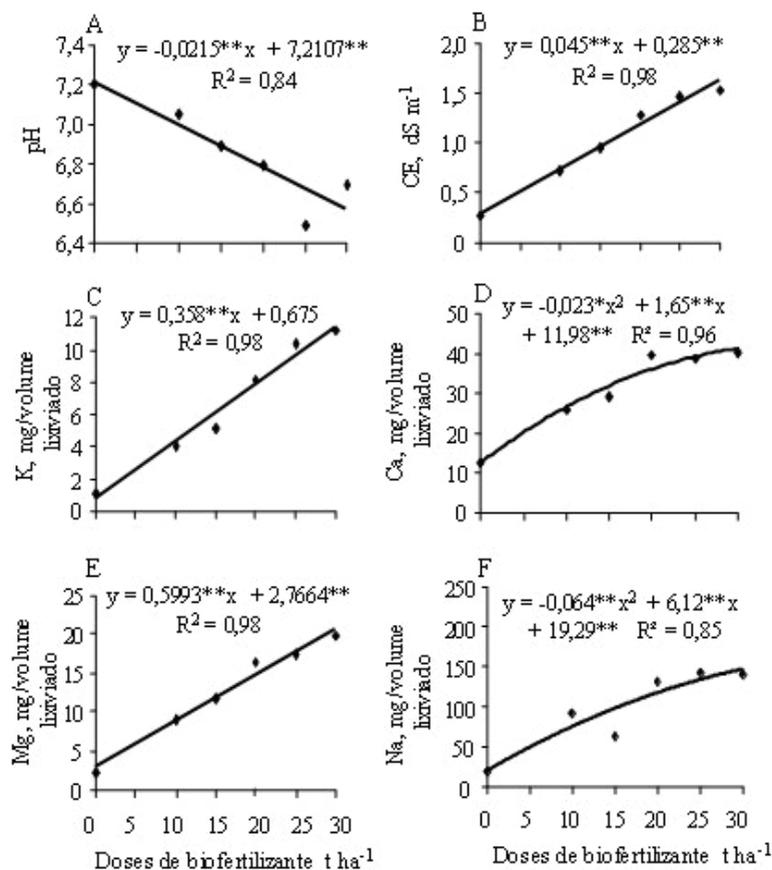
Doses crescentes de biocarvão aplicadas ao solo influenciaram significativamente os teores dos elementos químicos analisados no lixiviado ao nível de $p < 0,01$, exceto o fósforo.

Com exceção do pH e do bicarbonato, os parâmetros químicos do lixiviado aumentaram significativamente em função das doses do biocarvão e, conseqüentemente, da liberação dos elementos químicos presentes no biocarvão para a solução do solo (Figura 2). Essa liberação aumentou a concentração dos elementos na solução do solo (Figuras 2C, 2D, 2E e 2F) e, significativamente, a condutividade elétrica do lixiviado (Figura 2B), cuja média observada com a aplicação de 30 t ha^{-1} de biocarvão foi 473,58% maior que a média da testemunha (0 t ha^{-1}).

A diminuição do pH do lixiviado para 6,6 com o uso do biocarvão 30 t ha^{-1} (Figura 2A) foi provavelmente causada pela remoção do Al e do H do complexo sortivo e lixiviados para a solução do solo pelos cátions básicos da estrutura do biocarvão. De acordo

com a maior mobilidade de Al e H na coluna de lixiviação, suas concentrações aumentaram na base (profundidade de 10-20 cm) quando comparadas ao topo (profundidade de 0-10 cm), independentemente da dose aplicada (Figura 1 H). Isso, provavelmente, devido à troca catiônica do Al pelo Ca e pelo Mg do biocarvão, liberando H pela hidrólise do Al, reduzindo assim o pH do efluente.

Figura 2 - Condutividade elétrica, pH e teores de cálcio, magnésio, potássio, fósforo e carbonato no lixiviado devido à aplicação de diferentes doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

As médias de cálcio e sódio foram ajustadas ao modelo de regressão polinomial de segunda ordem (Figuras 2D e 2F), cujos teores máximos foram superestimados em 42,07 mg/lixiviado (36,57 t ha⁻¹) e 165,59 mg/lixiviado (47,81 t ha⁻¹), respectivamente.

Os teores de potássio e magnésio aumentaram linearmente em função das doses aplicadas de biocarvão (Figuras 2C e 2E), atingindo, na maior dosagem, médias de 172,04 e 20,74 mg de K e Mg, respectivamente, sendo as duas últimas médias correspondentes à valores não transformados. Além disso, as médias não transformadas do bicarbonato apresentaram comportamento semelhante ao observado para o pH, ou seja, diminuíram em função das doses aplicadas, o que era esperado já que a presença desse íon está associada à alcalinidade da água (Figura 2G).

A condutividade elétrica do lixiviado também foi significativamente influenciada pelo biocarvão, cuja média observada com a dose de 30 t ha⁻¹ de biocarvão foi 473,58% maior em relação à testemunha (0 t ha⁻¹) (Figura 2B). Isso ocorreu porque a aplicação do biocarvão aumentou a concentração dos nutrientes na solução, favorecendo seu deslocamento vertical com o fluxo descendente de água.

Embora o teor dos nutrientes analisados tenha aumentado de acordo com as doses de biocarvão, a quantidade total de cálcio, magnésio e potássio presentes no lixiviado correspondeu a apenas 1,81; 5,70 e 0,93%, respectivamente, fornecidos pela dose de 30 t ha⁻¹, após a subtração da quantidade de lixiviado do tratamento testemunha.

Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem que, mesmo com a lixiviação dos elementos químicos, a aplicação do biocarvão aumenta a capacidade dos solos de reter esses elementos, reduzindo assim o risco de serem lixiviados e transportados para reservatórios subterrâneos.

Em geral, pôde-se concluir que o biocarvão pode atuar como agente de calagem, neutralizando o pH da solução e reduzindo os valores de acidez trocável. Da mesma forma, o biocarvão causou melhorias significativas na fertilidade do solo.

ESTUDO DE CASO 8

Alterações na salinidade do solo com o uso de diferentes doses de biocarvão. (Fernandes *et al.*, 2019)⁸

Para avaliar o efeito de um biocarvão de cama de aviário na salinidade/sodicidade de um latossolo vermelho amarelo, foi conduzido um experimento no LIS/DEAg/UFCG utilizando colunas de solo e os procedimentos descritos no Estudo de Caso 7.

O delineamento experimental foi o mesmo que o anterior, ou seja, inteiramente casualizado, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas corresponderam às seis doses de biocarvão (0; 7,85; 11,77; 15,7; 19,62 e 23,55 g/0,00785m², de acordo com 0, 10, 15, 20, 25 e 30 t ha⁻¹); e as subparcelas foram as profundidades do solo (0-10 e 10-20 cm).

Após 30 dias da instalação e condução do experimento, cada coluna foi seccionada em duas partes, de 10 cm cada (0-10 cm, denominado “topo” e 10-20 cm, denominado “base”), secas à temperatura ambiente, peneiradas em 2 malhas mm. Em seguida, amostras de solo foram analisadas quanto à salinidade do solo, medindo-se no extrato de saturação a condutividade elétrica (CEes) e os cátions solúveis: sódio, potássio, cálcio e magnésio. O indicador utilizado para determinar a sodicidade foi o percentual de sódio trocável

⁸ FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B.; TITO, G. A. Alterations in soil salinity with the use of different biochar dose. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 42, n. 1, p. 89-98, 2019.

(PST), baseado na razão entre o sódio trocável, extraído do solo pelo método Mehlich 1 e quantificado no extrato por fotometria de chama, e a capacidade de troca catiônica (CTC). A porcentagem de sódio trocável foi determinada a partir da equação 1.

$$\text{PST} = \frac{Na^+}{CEC} \times 100$$

Onde: PST - porcentual de sódio trocável, %; Na⁺ - teor de sódio trocável, cmolc dm⁻³; CTC - capacidade de troca catiônica, cmolc dm⁻³. Também foi determinada a razão de adsorção de sódio (RAS), definida pela relação entre a concentração de Na⁺ e Ca⁺² + Mg⁺², conforme equação 2.

$$\text{SAR} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}}$$

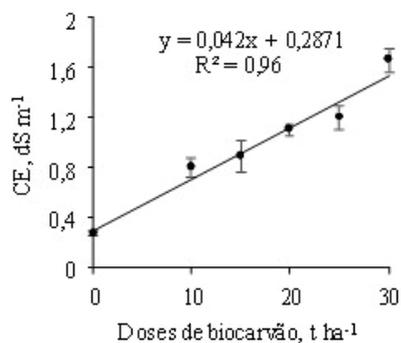
Os dados do solo foram submetidos à análise de variância (ANOVA) aplicando o software SISVAR (Ferreira, 2011). Com a significância das doses, as médias dos parâmetros avaliados no solo (parcelas) foram submetidas à análise de regressão. Esses parâmetros também foram analisados no solo de acordo com as duas profundidades (subparcelas), comparando suas médias entre si dentro da mesma dose pelo teste “t”.

A partir da análise de variância, verificou-se que as doses de biocarvão promoveram efeito significativo na condutividade elétrica (CEes), a qual foi ajustada de forma linear com um aumento de aproximadamente 0,042 dS m⁻¹ por unidade de aumento (t ha⁻¹) de biocarvão aplicado (Figura 1). Ainda com relação à Figura 1, com a aplicação da maior dose (30 t ha⁻¹), a CEes foi estimada em 1,55 dS m⁻¹, correspondendo a um aumento de 439,9%, quando comparado a CEes da testemunha absoluta.

Em geral, os efeitos da salinidade são praticamente insignificantes em extratos com leituras menor ou igual a 2 dS m^{-1} (Hoekstra *et al.*, 2002). Embora este nível crítico não tenha sido excedido com a aplicação do biocarvão, o aumento da CE de $0,287 \text{ dS m}^{-1}$ (testemunha) para $1,55 \text{ dS m}^{-1}$ (30 t ha^{-1}) é preocupante, haja vista o curto período no qual o ensaio foi conduzido.

Não foram observadas variações significativas da salinidade do solo em função das camadas analisadas. A justificativa para tal comportamento pode estar associada à concentração e à solubilidade dos nutrientes presentes no biocarvão que promoveram, além do aumento da salinidade, um maior fluxo de solutos e lixiviação dos sais para camadas mais profundas do solo.

Figura 1 - Condutividade elétrica em função da aplicação das doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

O biocarvão promoveu uma elevação no pH do solo, principalmente na primeira camada de avaliação, cujo maior valor estimado correspondeu a 7,87 com a aplicação de $26,17 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 2A). A alcalinidade do biocarvão favoreceu esse aumento, além do mais, a presença de cálcio (Ca^{2+}) e bicarbonato (HCO_3^-) pode ter promovido a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) no solo, au-

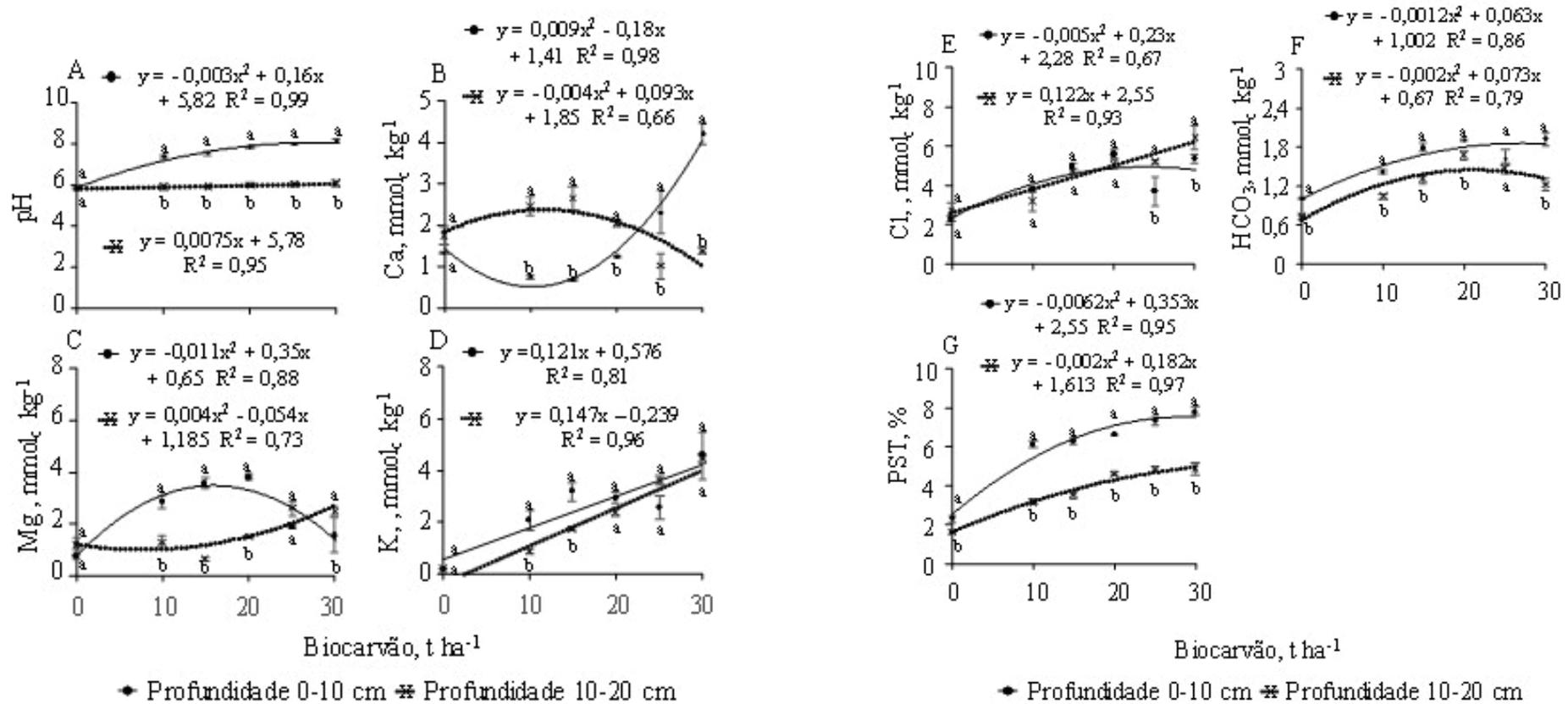
mentando a concentração de hidroxilas (OH^-) (Sappor *et al.*, 2017). Ainda com relação à Figura 2A, na profundidade de 10-20cm, o pH do solo aumentou com acréscimo de 0,0075 unidades (t ha^{-1}) de biocarvão aplicado. A menor influência das doses na variação do pH observada na segunda camada evidencia que as reações químicas ocorrem preferencialmente na camada superficial, local em que foi aplicado o biocarvão, razão que levou, com exceção da testemunha, a uma diferença estatística deste atributo do solo entre as profundidades analisadas dentro de cada dose aplicada.

A menor concentração de cálcio ($0,48 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) foi estimada na camada superficial do solo (0-10cm) com o uso de $10,16 \text{ t ha}^{-1}$, porém, quando se aplicaram doses superiores a esta, verificou-se acréscimo no teor desse nutriente, cuja maior média correspondeu a $4,02 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ com uma dose de 30 t ha^{-1} (Figura 2B). Na segunda camada de avaliação, a maior concentração de Ca foi estimada em $2,4 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ com $11,63 \text{ t ha}^{-1}$ de biocarvão. Ainda com relação à Figura 2B, verifica-se que a profundidade não promoveu diferença significativa apenas na ausência de biocarvão, apresentando a camada superficial, as maiores concentrações de Ca apenas com o uso das duas maiores dosagens de biocarvão.

As médias dos teores de magnésio, independentemente da profundidade analisada, apresentaram comportamento oposto ao observado para cálcio (Figura 2C), ou seja, o aumento na concentração de cálcio no extrato de saturação diminuiu a de magnésio, e vice-versa. Esse comportamento pode ser resultado de antagonismo entre esses nutrientes, de forma que o cálcio teve preferência para ser precipitado.

A adição de cátions bivalentes, a exemplo de Ca^{2+} e Mg^{2+} , é essencial na recuperação de solos afetados por sais, compensando o excesso de Na^+ trocável. E o biocarvão utilizado nesta pesquisa mostra-se capaz de desempenhar um papel positivo a esse respeito.

Figura 2 - Comportamento dos parâmetros químicos na primeira e segunda camada da coluna do solo avaliados em função de doses crescentes de biocarvão



Nota: As barras verticais representam o erro padrão e as médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente entre as profundidades dentro da mesma dose de biocarvão. Elaborado pelos autores.

O potássio apresentou comportamento semelhante em ambas as profundidades analisadas, de modo que o maior teor deste elemento foi obtido com o uso de 30 t ha⁻¹, com médias de 4,20 e 4,17 mmol_c kg⁻¹ para a primeira e a segunda camada de avaliação, respectivamente (Figura 2D). Ainda com relação a esta figura, as concentrações de K diferiram entre as profundidades nas dosagens de 10 e 15 t ha⁻¹. Como o biocarvão aumentou a salinidade do solo em decorrência da disponibilidade de nutrientes, o potássio competiu com o cálcio e o magnésio pelos sítios de troca, sendo assim, acréscimos na concentração de K no extrato de saturação nas duas profundidades em função das doses aplicadas evidenciam a sua mobilidade na coluna de lixiviação.

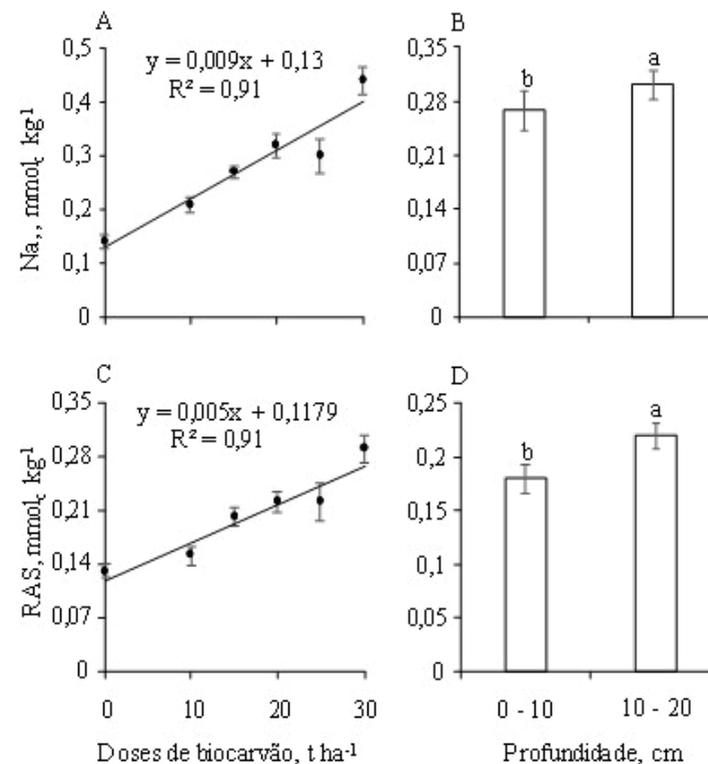
O biocarvão também promoveu acréscimos nos teores de cloretos e bicarbonatos. A máxima concentração de cloreto na primeira camada correspondeu a 5,02 mmol_c kg⁻¹ com 24,15 t ha⁻¹, na camada subsequente, seu teor aumentou proporcionalmente com a aplicação das doses, cujo acréscimo unitário correspondeu a 0,1224 mmol_c kg⁻¹ por t ha⁻¹ de biocarvão aplicado (Figura 2E). Quanto ao bicarbonato (Figura 2F), suas médias ajustaram-se, independentemente da camada avaliada, ao modelo de regressão polinomial de segunda ordem, cujos valores máximos estimados corresponderam a 1,83 e 1,45 mmol_c kg⁻¹ na primeira e na segunda camada de avaliação, respectivamente.

Com relação à percentagem de sódio trocável (PST), a aplicação do biocarvão aumentou consideravelmente este parâmetro em ambas as camadas analisadas, alcançando valores máximos de 7,74% e 5,23% na primeira e na segunda profundidade, respectivamente, o que representa um acréscimo de 203,53% e 224,18% quando comparada à testemunha absoluta (Figura 2G). Ainda com relação à Figura 2G, as médias do PST foram maiores na primeira

profundidade, diferindo significativamente daquelas registradas na segunda camada, independentemente da dose aplicada.

O sódio e a razão de adsorção de sódio (RAS) apresentaram comportamento semelhante, ou seja, seus teores foram superiores nos tratamentos que receberam o biocarvão, apresentando como maiores médias 0,40 e 0,27 mmol_c kg⁻¹, respectivamente, com o uso de 30 t ha⁻¹ (Figuras 3A e 3C).

Figura 3 - Relação de adsorção de sódio e teor de sódio em função das doses de biocarvão e das profundidades analisadas na coluna de lixiviação



Elaborado pelos autores.

Quando analisada a influência das camadas, verifica-se que as concentrações de Na⁺ e RAS foram superiores na profundidade de 10-20cm (Figuras 3B e 3D). Este resultado sugere que o sódio apresentou uma boa mobilidade dentro da coluna de lixiviação. Isto porque o enriquecimento de sítios trocáveis do perfil do solo com Ca²⁺ e Mg²⁺ pode diminuir a concentração de Na⁺ trocável nesses locais, tornando-o solúvel na solução do solo e, conseqüentemente, mais susceptível à lixiviação.

Em razão do incremento de sódio, os parâmetros percentagem de sódio trocável (PST) e razão de adsorção de sódio (RAS) apresentaram médias superiores nos tratamentos que receberam o biocarvão, o que vem propiciar maior possibilidade de problemas com sodicidade do solo, o que sugere cautela quanto ao seu uso.

Os solos afetados por sais são geralmente classificados com base na condutividade elétrica do extrato saturado (CEes), na percentagem de sódio trocável (PST) e de pH (Richard, 1954). Com base nessas propriedades, o solo utilizado neste trabalho foi classificado no término do experimento, independentemente da dose aplicada e da profundidade analisada, como normal, por apresentar CE < 4 dS m⁻¹, PST < 15 e pH do solo menor que 8,5. Porém, mesmo não havendo problemas de sais, o aumento em todos os parâmetros analisados num curto período (30 dias) aponta para cuidados quanto ao uso do biocarvão.

Os dados atuais sobre salinização ou recuperação de solos afetados por sal com adição de biocarvão são inconsistentes e é difícil comparar os estudos existentes na literatura entre si. Isso é provavelmente devido à grande variação entre os biocarvões e os solos usados na literatura. Além disso, há falta de experimentos de campo a longo prazo para verificar os mecanismos observados em estudos existentes em vasos ou incubação.

Com base no exposto, pode-se concluir que o biocarvão aumentou todos os parâmetros de salinidade analisados, entretanto, independentemente da dose aplicada e da profundidade analisada, o solo foi classificado como normal; e são necessárias novas pesquisas para avaliar o efeito de diferentes doses de biocarvão de esterco de aviário por um período maior de incubação, utilizando solos com diferentes estágios de salinidade, a fim de verificar possíveis alterações nas propriedades físico-químicas do solo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. A.; BIBAR, M. P. S.; COSCIONE, A. R.; PIRES, A. M. M.; SOARES, A. G. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, p. 407-416, 2015.
- ANDRADE, J. C.; ABREU, M. F. **Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agroambientais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2006. 177p.
- APPEL, C.; MA, L. Q.; RHUE, R. D.; KENNELLEY, E. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. **Geoderma**, v. 113, p. 77-93, 2003.
- ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; IOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Nor-

thern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field Crops Research**, v. 111, n. 1-2, p. 81-84, 2009.

ATKINSON, C. J.; FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant Soil**, v. 337, p. 1-18, 2010.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 215-21, 1998.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Coordenação de Apoio Laboratorial, Murilo Carlos Muniz Veras (Org.), MAPA/DAS/CGAL, Brasília, 2014. 220p.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo e na disponibilidade de cálcio, magnésio e fósforo. **Revista Caatinga**, Mossoró, RN, v. 21, n. 5, p. 75-82, 2008.

CHENG, C. H.; LEHMANN, J.; THIES, J. E.; BURTON, S. D.; ENGE-LHARD, M. H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. **Organic Geochemistry**, v. 37, p. 1477-1488, 2006.

DADALTO, G. G.; FULLIN, E. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo 4ª aproximação**. Vitória, ES: SEEA/INCAPER, 2001. 266p.

ELSHAIKH, N. A.; ZHIPENG, L.; DONGLI, S.; TIMM, L. C. Increasing the okra salt threshold value with biochar amendments. **Journal of Plant Interactions**, v. 13, n. 1, p. 51-63, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual e métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 574p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2013. 353p.

EUCLIDES, R. F. **Manual de utilização do programa SAEG: sistema para análises estatísticas e genéticas**. 2. ed. Viçosa: UFV, 1997.

FAO. **Water in agriculture: opportunity untapped**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

FERREIRA, D. F. Sisvar: sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

FONTES, M. P. F.; ALLEONI, L. R. F. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 63, n. 6, p. 589-608, 2006.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos alta-

mente intemperizados. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 58, p. 627-646, 2001.

HERATH, H. M. S. K.; ARBESTAIN, M. C.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. **Geoderma**, v. 209-210, p. 188-197, 2013.

HOEKSTRA, N. J.; BOSKER, T.; LANTINGA, E. A. Effects of cattle dung from farms with different feeding strategies on germination and initial root growth of cress (*Lepidium sativum* L.). **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 93, n. 1-3, p. 189-196, 2002.

JIEN, S. H.; WANG, C. S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, v. 110, p. 225-233, 2013.

KIMETU, J. M.; LEHMANN, J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, p. 577-585, 2010.

KONONOVA, M. M. Organic Matter and soil fertility. **Soviet Soil Science**, v. 16, p. 71-86, 1984.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 403-427, 2006.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANG, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTARD, J. O.; THIES, J.; LUIZA, F. J.; PETERSON, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in

soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 70, p. 1719-1730, 2006.

MIBASA. Disponível em: http://www.mibasa.com.br/camp_continua.htm.

MUELLER, S.; WAMSER, A. F.; SUZUKI, A.; BECKER, W. F. Produtividade de tomate sob adubação orgânica e complementação com adubos minerais. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, n. 1, p. 86-92, 2013.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, p. 313-339, 2013.

NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, M. A. S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal. **Soil Science**, v. 174, p. 105-112, 2009.

PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G. H.; MOURA, W. F.; CORRÊA, G. F. Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 265-274, 2003.

RAIJ, B. V.; PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 36, p. 587-593, 1972.

RICHARD, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington D.C.: Agricultural Handbook, 60, U.S. Salinity Laboratory, 1954. 160p.

SANVONG, C.; SUPPADIT, T. The Characteristic of pelleted broiler litter biochar derived from pilot scale pyrolysis reactor and 200-liter-oil-drum kiln. **Journal of Energy Technologies and Policy**, v. 3, n. 10, p. 34-38, 2013.

SAPPOR, D. K.; OSEI, B. A.; AHMED, M. R. Reclaiming Sodium Affected Soil: the potential of organic amendments. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 16, n. 2, p. 1-11, 2017.

SCHNITZER, M. Binding of humic substances by the soil colloids. *In*: HUANG, P. M.; SCHNITZER M. (Eds.). **Interactions of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science Society of America. 1986. p. 77-102.

SILVA, I. C. B.; BASÍLIO, J. J. N.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; SAMPAIO, R. A.; FRAZÃO, L. A. Biochar from different residues on soil properties and common bean production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 74, n. 5, p. 378-382, 2017.

SILVA, I. C. B.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; SAMPAIO, R. A. Crescimento e produção de feijoeiro adubado com biocarvão. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 47, 2017.

SINGH, A. P.; SINGH, A. R. Seasonal changes in the physico-chemical attributes of salt affected habitat. **India Journal of Science Research**, v. 4, n. 1, p. 105-115, 2013.

SIQUEIRA, C. **Eletroquímica de solos tropicais de carga variável**: efeitos da matéria orgânica. 1985. Tese (Doutorado em

Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372p.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2003. 352p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1980. 234p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 574p.

UEHARA, G.; GILLMAN, G. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals I. Theory. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 250-252, 1980.

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.

WU, Y.; XU, G.; SHAO, H. B. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil. **Solid Earth**, v. 5, p. 665-671, 2014.

CAPÍTULO 4

Mineralização de carbono orgânico do biocarvão e do composto orgânico de cama de aviário em um argissolo

Gilvanise Alves Tito

Josely Dantas Fernandes

Lúcia Helena Garófalo Chaves

A mineralização da matéria orgânica, essencial para a dinâmica do carbono no solo, depende da temperatura, do teor de água no solo, das características do solo e das atividades microbianas, como a respiração. Poucos estudos de incubação de curto prazo mostraram que o biochar no solo pode ser degradado por processos fotoquímicos e microbiológicos (Novak *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2015). A respiração microbiana é quantificada por meio da oxidação da matéria orgânica do solo e emissão de CO₂ (Silva *et al.*, 2013) e indica melhoria e melhor qualidade da mineralização dos nutrientes do solo. Foi observado que, quando o biocarvão é aplicado ao solo, ~10-20% do material mineralizam em CO₂, e compostos aromáticos e alifáticos podem precipitar, formando moléculas mais complexas, aumentando assim a resistência à decomposição microbiana (Jeffery *et al.*, 2010).

Pouco se sabe sobre a vida do biocarvão no solo, principalmente por dois motivos: 1) a recalcitrância do biocarvão depende de uma série de fatores, incluindo o tipo de biomassa utilizada

na pirólise, as condições de produção, as propriedades do solo e o clima; 2) a quantificação da estabilidade do biocarvão requer observações de longo prazo, que é mais do que os períodos tradicionais normalmente considerados em experimentos.

O carbono lábil tem uma vida média de 1 a 5 anos, enquanto o carbono orgânico inerte, como o biocarvão, pode durar milhares de anos (Winsley, 2007). O tempo médio de residência do biocarvão varia entre 4 e 29 anos, dependendo do tipo de solo e da qualidade do biocarvão (Steinbeiss *et al.*, 2009). Foi relatado que a taxa de degradação do biocarvão depende mais da temperatura e da duração da combustão do que dos materiais de origem (Zimmerman, 2010). O tamanho das partículas dos biocarvões é um parâmetro importante para sua capacidade de reagir com as partículas do solo (Laird *et al.*, 2009) e acredita-se que afeta sua resistência à mineralização microbiana (Manyà, 2012).

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi estudar e comparar a mineralização do carbono de diferentes doses de composto orgânico de cama de aviário e seu biocarvão em um argissolo. Sendo assim, este trabalho foi realizado partindo-se da hipótese de que a estabilidade de carbono no biocarvão da cama de aviário é superior à encontrada no composto orgânico também produzido da cama de aviário. Assim, objetivou este estudo comparar a mineralização de carbono em um argissolo com aplicação de doses crescentes de biocarvão e composto orgânico obtidos a partir de cama de aviário.

Para o trabalho experimental realizado no LIS/UFMG, foi utilizado um argissolo acizentado distrófico, com as seguintes características físico-químicas, conforme Teixeira *et al.* (2017): clas-

sificação textural como areia franca; 869,6 g kg⁻¹ de areia; 90,4g kg⁻¹ de silte e 40,0 g kg⁻¹ de argila, densidade do solo = 1,46 g cm³; densidade das partículas = 2,69 g cm³; porosidade total = 45,73 %; pH (H₂O) = 5,42; Ca = 2,20 cmol_c kg⁻¹; Mg = 2,40 cmol_c kg⁻¹; Na = 0,04 cmol_c kg⁻¹; K = 0,11 cmol_c kg⁻¹; H + Al = 2,38 cmol_c kg⁻¹; MO = 17,9 g kg⁻¹; P = 3,8 mg kg⁻¹; CTC = 7,13 cmol_c kg⁻¹.

Para produzir biocarvão, a cama de aviário (uma mistura de bagaço de cana-de-açúcar e dejeção de frango) foi acondicionada em cadinho tampado, para diminuir o O₂, e levado a uma mufla, em temperatura de 350°C, durante 3 horas. O biocarvão, retirado da mufla após o resfriamento total, em torno de 24 horas, foi caracterizado quimicamente, de acordo com o manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos (Brasil, 2014), apresentando os seguintes resultados: Nitrogênio Total (g kg⁻¹) = 30,6; Fósforo (P₂O₅) Total (%) = 5,76; Potássio (K₂O) (%) = 6,61; Ca (%) = 5,27; Mg (%) = 1,08; pH = 8,97; Carbono orgânico (g kg⁻¹) = 400,2; Relação Carbono/Nitrogênio = 13,08 e CTC (cmol_c kg⁻¹) = 58,61.

O composto orgânico foi obtido através da incubação da cama de aviário, com umidade próxima à capacidade de campo durante 120 dias, até se decompor e formar um material húmico. Depois de seco e peneirado (malha 2mm), foi caracterizado quimicamente, de acordo com o manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos (Brasil, 2014), apresentando os seguintes resultados: Nitrogênio Total (g kg⁻¹) = 24,00; Fósforo (P₂O₅) Total (%) = 5,71; Potássio (K₂O) (%) = 4,19; Ca (%) = 6,22; Mg (%) = 1,08; pH = 9,37; Carbono orgânico (g kg⁻¹) = 237,30; Relação Carbono/Nitrogênio = 9,93 e CTC (cmol_c kg⁻¹) = 82,47.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com 2 substratos (composto orgânico e biocarvão) e 5 doses desses substratos (0 (controle); 0,39; 0,77; 1,16 e 1,55 g equivalentes a 0; 5; 10; 15 e 20 t ha⁻¹) com 3 repetições, totalizando 30 unidades experimentais, utilizadas na medida do C-CO₂ evoluído.

As doses dos dois substratos foram misturadas com 200 g de solo e acondicionados em potes respirométricos de 1,3 L, hermeticamente fechados, para não haver entrada do CO₂ do ar externo ou saída do CO₂ produzido internamente. Após a mistura dos devidos tratamentos, foi adicionada água destilada de modo a elevar a umidade do solo a 60% da capacidade de campo. Em cada pote, contendo os tratamentos, foi colocado um copo com capacidade para 50 ml com 20 ml da solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹, para adsorver o C-CO₂ liberado pela mistura de solo com tratamento, trocado a cada avaliação. Esses potes permaneceram durante 61 dias no escuro, em uma câmara fechada, com temperatura constante de 27°C. A evolução de C-CO₂ foi avaliada aos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 19, 27, 37 e 60 dias após o início da incubação.

A quantificação do carbono liberado na forma de CO₂ foi determinada através da titulação do NaOH contido nos copos, com solução padronizada de HCl 0,4 mol L⁻¹, utilizando como indicador 2 gotas de fenolftaleína a 1%, após a precipitação prévia do carbonato mediante a adição de 0,5 ml de solução de BaCl₂ 1,5 mol L⁻¹.

O cálculo do carbono mineralizado seguiu metodologia sugerida por Hopkins (2008). O conteúdo de CO₂ que reagiu com a solução de NaOH durante a incubação foi calculado utilizando a seguinte equação 1.

$$\text{CO}_2 \text{ reagido} = 0,5 \times (((V_{\text{NaOH}} \times C_{\text{NaOH}})/1000) - ((V_{\text{HCl}} \times C_{\text{HCl}})/1000)) \quad (1)$$

Onde VNaOH é o volume inicial de NaOH (mL); CNaOH é a concentração molar inicial de NaOH; VHCl é o volume de HCl usado na titulação (mL); e CHCl é a concentração molar de HCl usada na titulação.

Uma vez quantificado o conteúdo de CO₂, calculou-se o carbono mineralizado pela equação 2.

$$C_{\text{mineralizado}} = \text{CO}_2 \text{ reagido} / (\text{massa do solo em g} \times \text{tempo de incubação em h}) \quad (2)$$

A cinética de mineralização do C foi ajustada a dois modelos: no primeiro, utilizou-se a equação exponencial de primeira ordem (Murwira *et al.*, 1990):

$$C_m = C_o (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (3)$$

Onde: C_m é o C orgânico cumulativo mineralizado (mg C-CO₂ kg⁻¹) no tempo t (dias); C_o representa a quantidade de C potencialmente mineralizável total (mg kg⁻¹); e k é a constante de taxa de mineralização (dia⁻¹).

O segundo modelo descreve a mineralização líquida através de duas reações simultâneas (Molina *et al.* 1980):

$$C_m = C_1 (1 - e^{-k_1 \cdot t}) + C_2 (1 - e^{-k_2 \cdot t}) \quad (4)$$

Em que: C₁ e C₂ representam as frações (pools) ativas e resistentes que se decompõem a taxas específicas de k₁ e k₂. A soma

de C_1 e C_2 tem o mesmo significado físico que C_0 no modelo exponencial de primeira ordem (Foo; Hameed, 2010).

Os parâmetros de ambos os modelos foram calculados por regressão linear com a ferramenta Microsoft Office Excel SOLVER, usando o erro de soma quadrada (SQE) que representa o erro de soma quadrada das diferenças entre o carbono mineralizado experimental e calculado (Foo; Hameed, 2010). Os coeficientes de determinação R^2 e o SQE foram usados para comparar os ajustes do modelo.

A meia-vida de mineralização do carbono foi calculada usando a equação sugerida por Sposito (2008):

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{k} \quad (5)$$

A meia-vida de mineralização do carbono é o tempo necessário para a mineralização de metade do carbono potencialmente mineralizável (C_0) durante os 60 dias de incubação

A fração de mineralização (FM) foi calculada no final do período de incubação usando a seguinte equação:

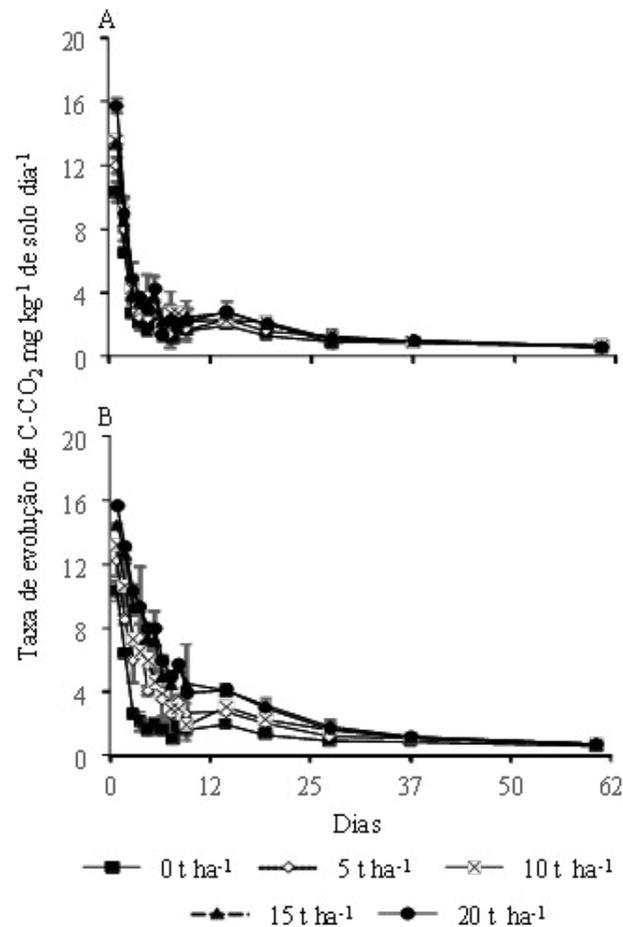
$$FM = 100C_m/C_a \quad (6)$$

A fração de mineralização corresponde ao carbono adicionado pelo biocarvão e pelo composto orgânico; C_m , a diferença entre o $C-CO_2$ liberado e acumulado no tratamento e na testemunha ($mg\ kg^{-1}$); e C_a a quantidade de carbono adicionado pelas doses de biochar e pelo composto orgânico ($mg\ kg^{-1}$).

De acordo com as análises, a maior liberação de $C-CO_2$ foi verificada após o primeiro dia de incubação com a aplicação da maior dose de biocarvão e do composto de cama de aviário, cujas médias foram praticamente as mesmas, cerca de $15,7\ mg\ kg^{-1}$ (Figuras 1A e 1B, respectivamente). No entanto, as taxas de evolução de $C-CO_2$ dos solos que receberam as doses de biocarvão exibiram, após o sexto dia de incubação, um comportamento semelhante, cujos valores foram próximos entre si e com estabilização na evolução de $C-CO_2$ após o 25º dia de avaliação (Figura 1A). É importante destacar que fluxos semelhantes de $C-CO_2$ entre o solo incubado com biocarvão e o controle ($0\ t\ ha^{-1}$ de biocarvão), em diversas datas de avaliação, são indicativos de que o material pirolisado não influenciou negativamente a atividade microbiana.

Nos solos que receberam o composto de cama de aviário, percebe-se, até o período do 19º dia de incubação, uma diferenciação entre as taxas de evolução de $C-CO_2$ apresentando com os tratamentos controle e $20\ t\ ha^{-1}$ a menor e a maior emissão do gás, respectivamente (Figura 1B). Sabe-se que a relação C/N dos substratos influenciam a degradação destes durante o processo de mineralização; os valores desta relação do composto (9,93) e do biocarvão (13,08) utilizados neste estudo, além das condições de temperatura ($27^\circ C$) e umidade (60%), promoveram condições favoráveis para a atividade microbiana e, conseqüentemente, a mineralização do C no solo (Araújo *et al.*, 2020).

Figura 1 - Valores médios de C, como CO₂ (C-CO₂), em função do tempo de até 60 dias de incubação de amostras de solo, misturadas com biocarvão de cama de aviário (A) e composto de cama de aviário (B) em função do tempo



Nota: Barras verticais correspondem ao erro padrão.
Elaborado pelos autores.

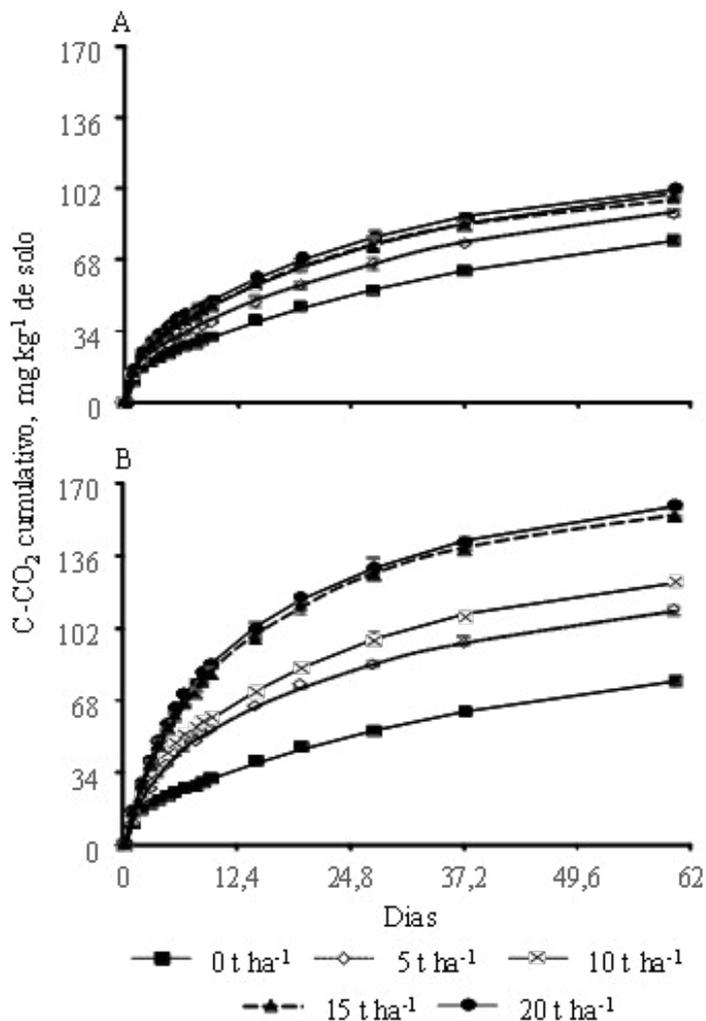
De maneira geral, durante o período de incubação de 60 dias, a evolução diária de C-CO₂, independentemente dos tratamentos aplicados, foi caracterizada por uma taxa inicial mais rápida e uma taxa subsequente mais lenta, cujas menores médias foram observadas nos últimos períodos de incubação. Diminuição rápida na taxa de evolução de C-CO₂ com o tempo indica a presença de diferentes frações orgânicas contidas no biocarvão e no composto.

O biocarvão apresenta uma fração degradável, que foi facilmente esgotada no início da incubação; e uma fração recalcitrante, que permaneceu depois que as fontes lábeis de carbono foram mineralizadas. Quanto ao composto orgânico, a diferença na taxa de evolução de C-CO₂ entre as doses, até o 19º dia de incubação, evidencia que este substrato apresenta uma maior fração de carbono degradável se comparado ao biocarvão.

Durante os 60 dias de incubação, verificou-se aumento acumulativo na quantidade de C-CO₂ desprendido em função da aplicação de doses crescentes dos substratos biocarvão e composto de cama de aviário (Figuras 2A e 2B).

No entanto, comparando a evolução de produção de C-CO₂ entre os substratos na dose de 20 t ha⁻¹, verificou-se que o solo incubado com o composto (158,84 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo) promoveu um acréscimo de 55,84% quando comparado ao tratamento que recebeu o biocarvão (101,92 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo).

Figura 2 - Quantidades de carbono liberado, acumulado por 60 dias, na forma de CO₂ (C-CO₂), em função da aplicação de diferentes doses de biocarvão de cama de aviário (A) e de composto de cama de aviário (B)



Nota: Barras verticais correspondem ao erro padrão.
Elaborado pelos autores.

Ainda com relação à Figura 2A, durante os primeiros cinco dias de incubação e independentemente das doses aplicadas de biocarvão, verificou-se semelhante acúmulo de C-CO₂; nos demais períodos de incubação, apesar de haver um maior desprendimento de C-CO₂ usando-se as maiores doses, suas médias foram próximas ao obtido no tratamento controle. Comportamento semelhante não foi observado com o uso do composto, ou seja, independentemente das doses, o valor acumulado de C-CO₂ foi praticamente o mesmo apenas nos primeiros três dias de incubação, diferindo posteriormente, com maior liberação nos tratamentos que receberam as doses 15 e 20 t ha⁻¹ (Figura 2B). O incremento de 106,02% verificado na quantidade de C-CO₂ liberada entre as doses 20 t ha⁻¹ de composto (158,84 mg kg⁻¹) e o tratamento controle (77,1 mg kg⁻¹) indica a contribuição positiva deste substrato na atividade microbiana edáfica, o que é consistente com o observado por Steiner *et al.* (2011).

Os valores das frações mineralizadas (FM) em função das doses de biocarvão e composto de cama de aviário, após 60 dias de incubação, são apresentadas na Tabela 1. O composto, quando comparado ao biocarvão, proporcionou as maiores taxas de mineralização em todas as doses aplicadas, cujo maior valor correspondeu a 7,21% do total de C adicionado com o uso de 5 t ha⁻¹.

Ainda com relação à Tabela 1, verifica-se, entre as doses de biocarvão, que a aplicação de 5 t ha⁻¹ promoveu a maior FM, com 1,69% do C mineralizado. Contudo, os valores de FM diminuíram à medida que se aumentou a dose de biocarvão. Os baixos valores de fração de mineralização observados com o uso deste último substrato reforçam a suposição de que há compostos recalcitrantes em sua estrutura, isto é, de difícil degradação biológica no solo (Sagrilo *et al.*, 2015). Valor superior de fração de mineralização

foi obtido por Sigua *et al.* (2014), que determinaram que 4,3% do total de C do biocarvão de cama de frango foi liberado como CO₂, após mistura com solo a 5.110 mg kg⁻¹ de C e incubação por 50 dias.

Tabela 1 - Fração de mineralização (FM, %) do biocarvão e do composto em função das diferentes doses de aplicação após 60 dias de incubação

DOSE	C-ADICIONADO	C-LIBERADO(1)	C _M	FM ⁽¹⁾
t ha ⁻¹	-----mg kg ⁻¹ -----			%
Biocarvão				
0	-	77,29 (±3,06)	-	-
5	780,39	90,50 (±5,22)	13,22	1,69 (±0,91)
10	1540,77	100,77 (±1,86)	23,48	1,52 (±0,15)
15	2321,16	96,54 (±1,06)	19,25	0,83 (±0,17)
20	3101,55	102,32 (±5,77)	25,03	0,81 (±0,15)
Composto				
0	-	77,29 (±3,06)	-	-
5	462,74	110,66 (±4,13)	33,37	7,21 (±1,55)
10	913,61	124,00 (±6,22)	46,71	5,11 (±0,89)
15	1376,34	153,35 (±5,11)	76,06	5,53 (±0,44)
20	1839,08	159,12 (±0,81)	81,83	4,45 (±0,21)

FM (%) = 100C_M/Ca; ⁽¹⁾ Média ± erro-padrão; C_M = quantidade de carbono mineralizado calculado pela diferença entre C-CO₂ liberado acumulado no tratamento e no controle e Ca = quantidade de carbono adicionado.

Elaborado pelos autores.

Embora tenha ocorrido um incremento nas quantidades acumuladas de C-CO₂ em função das doses crescentes dos substratos utilizados (Figuras 2A e 2B), os valores de FM, que são calculados em relação ao total de C adicionado via dose do substrato, dimi-

nuíram (Tabela 1). Tal tendência se justifica pelo incremento no teor de carbono causado pela adição dos substratos, que superou a necessidade metabólica dos microrganismos que não são capazes de degradar o C orgânico excedente. Além disso, a ação oxidante dos microrganismos gera alta demanda de O₂, ocasionando baixa aeração no substrato, prejudicando assim o consumo do C orgânico remanescente (Khalil *et al.*, 2002).

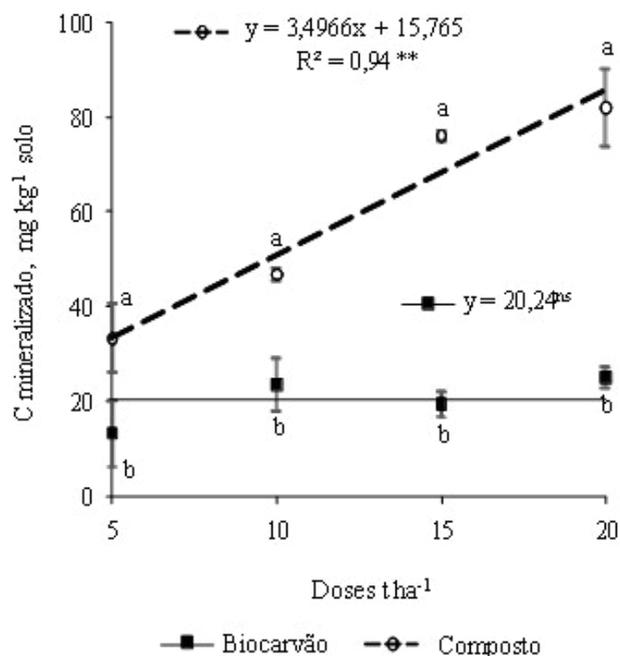
O C potencialmente mineralizável (C_m) dos substratos foi avaliado pela diferença entre C-CO₂ liberado e acumulado no tratamento e no controle (Tabela 1). Na menor dose aplicada, o compartimento mineralizável da cama de aviário incubada com solo foi 64,27% maior do que o verificado para o biocarvão, e a diferença entre as fontes de C aumentou com o incremento da dose (Figura 3). A mineralização do C aumentou significativamente (p < 0,01) a uma taxa de 3,496 mg kg⁻¹ por t ha⁻¹ de composto de cama de aviário aplicado, atingindo o maior valor utilizando-se a maior dose, ou seja, 20 t ha⁻¹. O aumento da atividade microbiana com o uso do composto é decorrente da maior disponibilidade de C orgânico (lábil) para a microbiota do solo, quando comparado ao biocarvão, que não promoveu aumento significativo na mineralização do C com a aplicação das doses.

Apesar de o biocarvão apresentar um teor de C (400 g kg⁻¹) superior ao composto de cama de aviário (237,30 g kg⁻¹), não foi observado para o biocarvão uma maior mineralização do carbono, o que pode ser justificado pelo processo de pirólise.

Isto porque, durante esse processo, há perda de voláteis, ou seja, de compostos lábeis tais como: metanol, ácido acético, CO, H₂ e CO₂, moléculas com pequenas massas moleculares (ácidos graxos, óleos e resinas), além da decomposição das hemiceluloses e da liberação de água (Zhao *et al.*, 2013). Portanto, a maior esta-

bilidade de C no biocarvão é resultante de perdas variáveis de H, O, C e N durante a pirólise, em que se preserva relativamente mais C e, assim, se reduzem as relações H/C, O/C e (O+N)/C (Novak *et al.*, 2009).

Figura 3 - Carbono mineralizado e acumulado em 60 dias de incubação em resposta às doses de biocarvão e composto de cama de aviário



**_{ns} Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F. Barras verticais correspondem ao erro padrão, e médias seguidas de letras diferentes indicam que o biocarvão difere do composto dentro da mesma dose. Elaborado pelos autores.

Após a pirólise, o biocarvão de cama de aviário apresenta incremento de compostos aromáticos em sua constituição e redução dos grupos: alquilas, metilenos e carboidratos (celulose e hemicelulose), em que estes últimos tendem a zero a temperaturas acima de 350oC (Cimò *et al.*, 2014). Os resultados de mineralização de C nos materiais avaliados corroboram, pelo menos em parte, a afirmação de Lehmann *et al.* (2006) de que produtos pirolisados são mais eficazes para sequestrar C no solo e auxiliar a mitigação do efeito estufa.

Conforme a Figura 3, o maior teor de C mineralizado, 85,70 mg kg⁻¹ de solo, foi observado com o uso de 20 t ha⁻¹ do composto de cama de aviário (equivalente a 3101,55 mg kg⁻¹ de carbono).

Os resultados médios de C-CO₂ mineralizado ajustaram-se satisfatoriamente aos modelos de cinética química de primeira ordem e com duas reações simultâneas (Tabela 2). Ambos os modelos foram usados para descrever os padrões de mineralização de carbono em amostras de solo incubadas com biocarvão e composto de cama de aviário com diferentes dosagens. O coeficiente de determinação (R²) e a soma do quadrado dos erros (SQE) evidenciam a eficiência do ajuste, comparando os dados experimentais com as estimativas do modelo. Entre os modelos testados, aquele com duas reações simultâneas foi o mais eficiente, descrevendo 99% da variação da mineralização do C em função do período (dias) e das condições de incubação. Esse modelo também apresentou os menores valores de SQE independentemente do substrato e da dose utilizada.

Tabela 2 - Parâmetros de cinética química e meia-vida de mineralização ($t_{1/2}$) obtidos a partir dos ajustes dos dados de carbono liberado a equações de cinética química de primeira ordem com uma e duas fases

DOSE t ha ⁻¹	MODELO DE PRIMEIRA ORDEM					MODELO DE DUAS REAÇÕES SIMULTÂNEAS									
	C ₀ mg kg ⁻¹	K dia ⁻¹	T _(1/2) dia	R ²	SQE	C ₁ mg kg ⁻¹	K ₁ dia ⁻¹	T _{(1/2)1} dia	C ₂ mg kg ⁻¹	K ₂ dia ⁻¹	T _{(1/2)2} dia	R ²	SQE	C ₁ /C ₂ (%)	K ₁ /K ₂
-----Biocarvão-----															
0	70,78	0,0664	10	0,96	377,8	14,84	1,017	1	81,12	0,024	29	0,99	3,26	18,3	42,4
5	83,31	0,0714	10	0,96	456,7	17,23	0,976	1	87,57	0,030	23	0,99	2,79	19,7	32,5
10	90,93	0,0822	8	0,96	516,4	21,45	0,762	1	90,15	0,034	20	0,99	11,42	23,8	22,4
15	88,41	0,0820	8	0,97	418,5	18,36	0,916	1	85,40	0,039	18	0,99	12,21	21,5	23,5
20	92,38	0,0889	8	0,96	608,7	22,45	0,925	1	88,80	0,037	18	0,99	8,12	25,3	25,0
-----Composto-----															
0	70,78	0,0664	10	0,96	377,8	14,84	1,017	1	81,12	0,024	29	0,99	3,26	18,3	42,4
5	100,74	0,0868	8	0,98	389,4	31,56	0,347	2	91,95	0,032	21	0,99	8,70	34,3	10,8
10	113,06	0,0865	8	0,97	546,1	33,22	0,397	2	104,89	0,033	21	0,99	6,44	31,7	12,0
15	144,36	0,0871	8	0,99	361,8	38,34	0,308	2	122,45	0,046	15	0,99	13,56	31,3	6,7
20	148,10	0,0927	7	0,99	421,9	54,65	0,248	3	115,37	0,039	18	0,99	11,57	47,4	6,4

R² = coeficiente de determinação; SQE = soma dos quadrados dos erros; C₀ = carbono potencialmente mineralizável em 60 dias; k = constante de velocidade da reação de degradação do carbono; C₁, K₁ e t_{(1/2)1} = carbono potencialmente mineralizável, constante de velocidade da reação de degradação do carbono e meia-vida durante a primeira fase do processo de degradação, respectivamente; C₂, K₂ e t_{(1/2)2} = carbono potencialmente mineralizável, constante de velocidade da reação de degradação do carbono e meia-vida durante a segunda fase do processo de degradação, respectivamente.

Elaborado pelos autores.

Ainda com relação à Tabela 2, o modelo com duas reações simultâneas sugere que o processo de mineralização do C foi bi-fásico, indicando que ocorreu em dois estágios principais: no primeiro, caracterizado por aumento inicial na atividade microbiana, em que o C orgânico facilmente degradável (C₁) foi rapidamente exaurido; e no segundo estágio, os microrganismos passaram a usar o carbono mais recalcitrante (C₂) até que um novo estado estacionário fosse estabelecido no sistema (Figura 2).

De acordo com Dodor *et al.* (2019), a proporção entre as frações de C orgânico lábil e recalcitrante em um substrato orgânico determina sua taxa de mineralização e seu potencial de emissão de CO₂ quando aplicado aos solos. A menor relação entre (C₁/C₂), verificado para o biocarvão, sugere que este apresenta em sua constituição uma maior fração de compostos recalcitrantes e uma menor de C lábil (Smith *et al.* 2010). Além do mais, o C lábil degradado na primeira fase era formado por compostos alifáticos

voláteis de menor tamanho, baixo número de carbono em sua estrutura e presença de grupos oxigenados; já na segunda fase, por apresentar, independentemente da dose, valores de C_2 maior que a C_1 , a mineralização foi mais lenta, devido à existência de carbono mais estável, compostos aromáticos não voláteis e com baixa concentração de oxigênio em sua estrutura.

Quanto ao composto de cama de aviário, verifica-se, na Tabela 2, que o solo incubado com este substrato apresentou uma fração de carbono potencialmente mineralizável nas duas fases C_1 e C_2 , superior ao verificado no biocarvão independentemente da dose aplicada. A maior relação entre (C_1/C_2), especialmente na dose de 20 t ha^{-1} , ou seja, 47,4%, é justificada pela presença de maior teor de C lábil. O aumento observado na mineralização de C com o aumento das taxas de aplicação, especialmente no composto, foi devido ao aumento da oferta de C prontamente mineralizável (Cross; Sohi, 2011; Fernández *et al.*, 2014). Ainda com relação a esses resultados, percebe-se que a pirólise concentrou C na massa final do biocarvão ($400,2 \text{ g kg}^{-1}$) e alterou a característica dos compostos de C presentes, em comparação ao material original.

De modo geral, a primeira fase de degradação dos compostos orgânicos foi caracterizada por uma elevada velocidade (K_1), superior a K_2 , independentemente do substrato utilizado na incubação e da dose aplicada (Tabela 2). Comparando os substratos entre si, verifica-se que os maiores valores de K_1 para o solo incubado com biocarvão foram resultado da menor concentração de C lábil nele presente; já na segunda fase, apesar de o composto apresentar maior concentração de C potencialmente mineralizável,

os valores de K_2 foram semelhantes ao observado no biocarvão independentemente da dose aplicada.

A diferença entre as velocidades de degradação do C proveniente dos substratos, na primeira e segunda fases do processo, pode ser percebida pelos valores da relação K_1/K_2 (Tabela 2). Esses valores são um indicativo de quantas vezes a velocidade da primeira fase foi superior à da segunda fase. Esses resultados novamente evidenciaram que os solos incubados com biocarvão apresentaram, na primeira fase, uma rápida mineralização da fração prontamente biodegradável, deixando para um segundo momento as frações mais resistentes à degradação com velocidade mais lenta (K_2) e meia-vida ($t_{1/2}$) mais longa conforme Zhao *et al.* (2015).

Os valores de $t_{1/2}$, calculados nos tratamentos incubados com biocarvão indicam, independentemente da dose aplicada, que, na primeira fase, metade do carbono foi degradado no primeiro dia de incubação. Já nos tratamentos que receberam o composto, o valor de $t_{1/2}$ aumentou em função da dose, alcançando com o uso de 20 t ha^{-1} a maior média, ou seja, três dias. Na segunda fase, os maiores valores de $t_{1/2}$ evidenciam que os compostos de carbono presentes em ambos substratos, por serem mais resistentes à degradação, necessitam de maior período para que ocorra a mineralização.

O conjunto de parâmetros e informações obtido a partir do ajuste dos dados às equações de cinética química permite afirmar que o biocarvão possui uma fração de carbono mais estabilizada, em comparação ao composto de cama de aviário, apresentando ainda restrita quantidade de compostos prontamente degradá-

veis pela microbiota do solo com o passar dos dias. Contudo, por apresentar uma rápida mineralização inicial, o biocarvão pode liberar nutrientes necessários às plantas já nos primeiros dias de incubação.

Com base no exposto, a atividade microbiana do solo aumentou com a aplicação das doses crescentes dos substratos do biocarvão e do composto de cama de aviário. No entanto, as maiores degradações do C-CO₂ foram observadas nos tratamentos que receberam o composto de cama de aviário, ao ponto que se observou efeito significativo das doses aplicadas deste substrato no carbono mineralizável. O processo de mineralização do carbono adicionado por meio do biocarvão e do composto de cama de aviário é dividido em duas fases distintas: a primeira com mineralização intensa, caracterizada por uma meia-vida curta; e, na sequência, por outra mais lenta, observando-se a tendência de redução e estabilização do fluxo de C-CO₂.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. D. M.; FEITOSA, M. M.; PRIMO, A. A.; TANIGUCHI, C. A. K.; SOUZA, H. A. Mineralization of nitrogen and carbon from organic compost from animal production waste. **Revista Caatinga**, Mossoró, RN, v. 33, n. 2, p. 310-320, 2020.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Ministé-

rio da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Coordenação de Apoio Laboratorial, Murilo Carlos Muniz Veras (Org.). Brasília: MAPA/DAS/CGAL, 2014. 220p.

CROSS, A.; SOHI, S. P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 2127-2134, 2011.

DODOR, D. E.; AMANOR, Y. J.; ASAMOAH-BEDIAKO, A.; MACCARTHY, D. S.; DOVIE, D. B. K. Kinetics of Carbon Mineralization and Sequestration of Sole and/or Co-amended Biochar and Cattle Manure in a Sandy Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 20, p. 2593-2609, 2019.

FERNÁNDEZ, J. M.; NIETO, M. A.; LÓPEZ-DE-SÁ, E. G.; GASCÓ, G.; MÉNDEZ, A.; PLAZA, C. Carbon dioxide emissions from semi-arid soils amended with biochar alone or combined with mineral and organic fertilizers. **Science of the Total Environment**, v. 482-483, p. 1-7, 2014.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

HOPKINS, D. W. Carbon mineralization. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Eds.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**, 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 621-626.

JEFFERY, L. S.; COLIINS, H. P.; BAILEY, V. L. The effect of young biochar on soil respiration. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, p. 2345-2347, 2010.

KHALIL, M. I.; ROSENANI, A. B.; VAN CLEEMPUT, O.; BOECKX, P.; SHAMAHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Nitrous oxide production from an Ultisol of the humid tropics treated with different nitrogen sources and moisture regimes. **Biology and Fertility of Soils**, v. 36, p. 59-65, 2002.

LAIRD, D. A.; BROWN, R. C.; AMONETTE, J. E.; LEHMANN, J. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and bio-char. **Bioproducts and Biorefining**, v. 3, p. 547-562, 2009.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 395-419, 2006.

MANYÀ, J. J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 15, p. 7939-7954, 2012.

MOLINA, J. A. E.; CLAP, C. E.; LARSON, W. E. Potentially mineralizable nitrogen in soil: the simple exponential model does not apply to the first 12 weeks of incubation. **Soil Science Society America Journal**, v. 44, p. 442-443, 1980.

MURWIRA, H. K.; KIRCHMANN, H.; SWIFT, M. J. The effect of moisture on the decomposition rate of cattle manure. **Plant and Soil**, v. 122, p. 197-199, 1990.

NOVAK, J. M.; LIMA, I.; XING, B.; GASKIN, J. W.; STEINER, C.; DAS, K. C.; AHMEDNA, M.; REHRAH, D.; WATTS, D. W.; BUSSCHER, W. J.; SCHOMBERG, H. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. **Annals of Environmental Science**, v. 3, p. 195-206, 2009.

SAGRILO, E.; JEFFERY, S.; HOFFLAND, E.; KUYPER, T. W. Emission of CO₂ from biochar-amended soils and implications for soil organic carbon. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 7, n. 6, p. 1294-1304, 2015.

SIGUA, G. C.; NOVAK, J. M.; WATTS, D. W.; CANTRELL, K. B.; SHUMAKER, P. D.; SZÖGI, A. A.; JOHNSON, M. G. Carbon mineralization in two Ultisols amended with different sources and particle sizes of pyrolyzed biochar. **Chemosphere**, v. 103, p. 3133-3141, 2014.

SILVA, J. M.; ALBURQUERQUE, L. S. D.; SANTOS, T. M. C. D.; OLIVEIRA, J. U. L. D.; GUEDES, E. L. F. Mineralização de vermicompostos estimada pela respiração microbiana. **Revista Verde**, Juazeiro, BA, v. 8, p. 132-135, 2013.

SPOSITO, G. **The Chemistry of Soils**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2008.

STEINBEISS, S.; GLEIXNER, G.; ANTONIETTI, M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 6, p. 1301-1310, 2009.

STEINER, C.; MELEAR, N.; HARRIS, K.; DAS, K. C. Biochar as bulking agent for poultry litter composting. **Carbon Management**, v. 2, n. 3, p. 227-230, 2011.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573p.

WINSLEY, P. Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. **New Zealand Science Review**, v. 64, n. 1, p. 5-10, 2007.

ZHAO, L.; CAO, X.; MAŠEK, O.; ZIMMERMAN, A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 256/257, p. 1-9, 2013.

ZHAO, R.; COLES, N.; WU, J. Carbon mineralization following additions of fresh and aged biochar to an infertile soil. **Catena**, v. 125, p. 183-189, 2015.

ZIMMERMAN, A. R. Abiotic and microbial oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon (Biochar). **Environmental Science & Technology**, v. 44, p. 1295-1301, 2010.

CAPÍTULO 5

Fenômeno de adsorção com biocarvão de cama de aviário

Washington Benevenuto de Lima

Josely Dantas Fernandes

Lúcia Helena Garófalo Chaves

A dsorção de fósforo (P) em solos é controlada pela presença de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), que ocorrem principalmente em solos altamente intemperizados. Uma forma de minimizar esse problema é aumentar o pH do solo, pois esse fenômeno aumenta a dissociação da hidroxila (OH) nas extremidades e superfícies das partículas minerais ou da matéria orgânica, resultando no aumento de sua carga líquida negativa e, conseqüentemente, redução da adsorção de fósforo (Fernandes *et al.*, 2018).

Assim, acredita-se que a aplicação de biocarvão no solo atua como fertilizante e, devido à sua alcalinidade, pode atuar como condicionador do solo. Esses autores demonstraram que a aplicação de biocarvão no solo aumentou a disponibilidade de P devido tanto ao fornecimento direto de P como fonte de P quanto à redução da adsorção de P em óxidos de Fe.

No entanto, pouco se sabe sobre a adsorção e/ou disponibilidade de P após a aplicação de biocarvão de cama de aviário no solo. Assim, como hipótese, acredita-se que esse biocarvão, principalmente devido ao aumento do pH do solo, reduza a adsorção de

P, aumentando a disponibilidade de P no solo. Segundo Martinez *et al.* (2017), após oito dessorções consecutivas, observaram que o biocarvão de *Eucalyptus globulus* aumentou a liberação de fósforo em relação ao solo natural, entre 78 e 84%, promovendo assim uma maior disponibilidade desse elemento ao longo do tempo.

A adsorção de fósforo pode ser investigada usando estudos cinéticos (pseudoprimeira e pseudossegunda ordem) e isotermas lineares e não lineares (Zhang *et al.*, 2015). Os modelos de Langmuir e Freundlich comumente usados são úteis na descrição de isotermas de adsorção e fornecem fatores eficazes na previsão das características de adsorção de nutrientes.

Além de ser usado como fertilizante agrícola, pode ser usado como condicionador, com extensa área de superfície, sugerindo que pode atuar como um sorvente de superfície e, assim, desempenhar um papel importante no controle de contaminantes, como metais pesados, zinco, no meio ambiente (Sanvong; Suppadit, 2013).

Para remover o metal pesado da solução aquosa e/ou solo, alguns métodos comuns, incluindo precipitação, troca iônica, destilação, oxidação, redução, filtração, tratamento eletroquímico, evaporação, etc., foram investigados, no entanto, o processo de adsorção tem sido usado como uma maneira eficaz e econômica de remover metais pesados nas últimas décadas (Babel; Kurniawan, 2003; Yaacoubi *et al.*, 2014). A adsorção é um método bastante popular devido à sua simplicidade e alta eficiência.

Numerosas pesquisas foram realizadas com biocarvão para examinar seu potencial para a remoção de íons de metais pesados. Melo *et al.* (2015) descobriram que o biocarvão derivado da palha da cana-de-açúcar aumentou a sorção de Cd e Zn em dois solos

tropicais contaminados com metais pesados. Da mesma forma, Namgay *et al.* (2010) mostraram que a aplicação de biocarvão de madeira no solo tem o potencial de reduzir a disponibilidade de oligoelementos para as plantas. E Chen *et al.* (2011) observaram que o biocarvão derivado de resíduos vegetais ou agrícolas pode atuar como sorvente de superfície eficaz. Lima *et al.* (2017), por sua vez, mostraram que as propriedades físico-químicas do biocarvão de cama de aviário favoreceram a adsorção de zinco em solo argissolo e entissol.

O fenômeno de adsorção de íons metálicos pode ser estudado através das isotermas de adsorção, que são equações matemáticas que descrevem as relações entre a massa da substância adsorvida (adsorvato) pelo sólido (adsorvente) e a concentração da substância na solução em equilíbrio (Dias *et al.*, 2001). Entre os diversos modelos que descrevem a adsorção do solo, os mais citados na literatura são os propostos por Langmuir e Freundlich (Sposito, 1989).

Segundo Nascimento e Fontes (2004), as isotermas de Langmuir e Freundlich têm se mostrado adequadas para o estudo da adsorção de zinco em solos brasileiros, mas a isoterma de Freundlich foi a que melhor se ajustou aos dados de adsorção de zinco encontrados por Arias *et al.* (2005).

Segundo Sanchez *et al.* (1999), o fenômeno de adsorção depende de vários fatores, como pH, tipo e concentração do metal adsorvido, tempo de adsorção, força iônica da solução, além das características do adsorvente. Lacin *et al.* (2005) constataram que o pH tem efeitos positivos na adsorção de zinco, ou seja, segundo Arias *et al.* (2005), o aumento do pH do solo aumenta a capacidade de adsorção de zinco.

Em relação à adsorção de cádmio, há poucas informações sobre isso pelo biocarvão da cama de aviário, portanto, vários testes e tempo de experimentação são necessários para avaliar os principais fatores que influenciam o processo de adsorção desse metal pesado.

Para superar esses problemas, a metodologia de superfície de resposta (MSR), um método alternativo com um número mínimo de testes, pode ser uma alternativa adequada. O MSR é uma compilação de métodos matemáticos e estatísticos, úteis para ajustar os modelos e analisar os problemas em que parâmetros independentes controlam o(s) parâmetro(s) dependente(s) (Saffari, 2018).

De acordo com o que foi dito sobre a adsorção de fósforo e metais pesados utilizando biocarvão de cama de aviário, neste capítulo, são apresentados três casos de estudo relativos à adsorção de fósforo, zinco e cádmio.

■ ESTUDO DE CASO 1

Disponibilidade de fósforo no solo incubado com biocarvão: estudo de adsorção (Fernandes *et al.*, 2022)¹

Para avaliar o processo de adsorção de P pelo argissolo distrófico incubado com diferentes doses de biocarvão de cama de aviário por meio do estudo cinético e isotérmico, um experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação e Salinidade - LIS do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal

¹ . FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; DANTAS, E. R. B.; TITO, G. A.; GUERRA, H. O. C. Phosphorus availability in soil incubated with biochar: adsorption study. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 1, p. 206-215, 2022.

de Campina Grande - UFCG, utilizando o solo coletado no município de Lagoa Seca, Paraíba, Brasil, na camada de 0-20 cm de profundidade.

Essa amostra foi caracterizada quimicamente, conforme Teixeira *et al.* (2017), e apresentou os seguintes resultados: pH (H₂O) = 5,35; Ca = 2,78 cmolc kg⁻¹; Mg = 1,26 cmolc kg⁻¹; Na = 0,11 cmolc kg⁻¹; K = 0,17 cmolc kg⁻¹; H+ Al = 3,27 cmolc kg⁻¹; carbono orgânico = 18,8 g kg⁻¹; P = 1,27 mg kg⁻¹ e CTC = 7,59 cmolc kg⁻¹.

O biocarvão utilizado neste estudo foi produzido no LIS a partir de cama de aviário resultante da criação de frangos de corte, sob pirólise lenta a 350°C, com os seguintes atributos químicos: pH = 9,44; CE = 7,33 dS m⁻¹; P₂O₅ = 4,08%; K₂O = 4,35%; Ca = 5,04%; Mg = 1,28%; S = 0,41%; Fe = 0,72%; Mn = 0,05%; Cu = 0,01%; Zn = 0,05%; B = 0,01%; carbono orgânico = 42,22%; C/N = 18,76 e Ponto de Carga Zero (PCZ) = 8,43. É um material amorfo, poroso, com predominância de poros de tamanho médio, aproximadamente 14,8 nm, com área superficial de 3,37 m² g⁻¹. De acordo com as análises de difração de raios X, foram identificados compostos de feldspato [Ortoclasio (KAlSi₃O₈)] e fosfato de potássio (K₂(HPO₄)), confirmando o resultado da análise química do biocarvão, que tinha um teor considerável de P, K, Ca e Mg.

Para avaliar o efeito do biocarvão na adsorção de fósforo, utilizou-se o método de incubação colocando amostras de solo (0,3 kg) em sacos plásticos misturados com biocarvão nas seguintes dosagens: 0,0; 12,39; 24,78; 37,17; 49,56 e 61,95 t ha⁻¹. O cálculo para determinação das doses foi realizado de forma a elevar o teor de matéria orgânica do solo na camada arável (primeiros 20 cm de profundidade) de 18,8 g kg⁻¹ (tratamento controle) para 25,0; 31,2; 37,4; 43,6 e 49,8 g kg⁻¹. O ensaio de incubação foi realizado com quatro repetições.

Para promover a liberação de fósforo pelo biocarvão e a neutralização da acidez do solo, doses crescentes de biocarvão foram incorporadas às amostras de solo e incubadas por um período de 60 dias, mantendo sua umidade em torno de 70%, com adição de água deionizada. Após esse período, essas amostras foram utilizadas no estudo cinético e de adsorção de fósforo.

Para avaliar a cinética de adsorção de P, foram adicionados 400 mL de solução de 52,5 mg L⁻¹ de P em erlenmeyer de 500 mL contendo 5g de solo incubado com as diferentes doses de biocarvão. As amostras foram deixadas em agitador horizontal a 120 rpm, a 25 ± 2°C por 48 horas. Durante o ensaio, alíquotas de 20 mL das amostras foram retiradas nos intervalos de tempo 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,1; 1,5; 2,0; 3,0; 6,0; 12,0; 24,0 e 48,0 h, filtradas; e por colorimetria, foi dosado o P, segundo Braga e Defelipo (1972). O experimento foi realizado em duplicata.

A eficiência do processo foi determinada de acordo com a equação 1; e a quantidade adsorvida de metal foi calculada de acordo com a equação 2.

$$\blacksquare T = \frac{C_i - C_t}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

$$\blacksquare q_e = \frac{V}{M} (C_i - C_t) \quad (2)$$

Em que: T é a taxa de remoção do íon fosfato (%); C_i é a concentração inicial do íon fosfato na solução (mg L⁻¹); C_t é a concentração de equilíbrio dos íons fosfato após a adsorção (mg L⁻¹); q_e é a quantidade adsorvida por massa de adsorvente (mg g⁻¹); V é o volume de efluente (L); e M é a massa do adsorvente (g).

Para representar os dados experimentais cinéticos da adsorção do fósforo pelo solo incubado, foram empregados os modelos cinéticos de pseudoprimeira (Lagergren, 1898), e pseudossegunda ordem (Ho *et al.*, 1996), de acordo com as equações 3 e 4, respectivamente.

$$\blacksquare qt = q_{eq} (1 - e^{-K_1 t}) \quad (3)$$

$$\blacksquare qt = \frac{(q_{eq})^2 \cdot K_2 \cdot t}{1 + (q_{eq} \cdot K_2 \cdot t)} \quad (4)$$

Em que: K₁ e K₂ são as constantes da taxa de adsorção de pseudoprimeira (h⁻¹) e segunda ordem (g mg⁻¹ h⁻¹), respectivamente; q_t é a quantidade adsorvida por grama de adsorvente em um tempo t (h) qualquer (mg g⁻¹); q_{eq} é a quantidade adsorvida por grama de adsorvente no equilíbrio (mg g⁻¹); e t representa o tempo (h). Os valores de q_e, K₁ e K₂ foram estimados usando o método de regressão não linear, utilizando a ferramenta SOLVER, seguindo a metodologia da soma do quadrado dos erros (Foo; Hameed, 2010).

O fósforo-remanescente (P_{rem}) foi determinado agitando em 120 rpm uma solução de 60 mg L⁻¹ de P em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, por uma hora, em uma relação de solo solução 1:10 (Alvarez; Fonseca, 1990). Após a agitação, foram separadas a fase sólida e a líquida, e na solução de equilíbrio, foi determinada a concentração de P, utilizando-se o método do ácido ascórbico, modificado por Braga e Defelipo (1972). As doses para a determinação da Capacidade Máxima de Adsorção (CMAP) foram calculadas com base no teor de P_{rem} e variaram de 0 a 150 mg L⁻¹ (Alvarez; Fonseca, 1990). Os pontos para ajuste da isoterma de Langmuir foram obtidos adi-

cionando-se 25 mL de solução de KH_2PO_4 , preparada com CaCl_2 10 mmol L^{-1} , contendo P nas doses indicadas, em amostras de 2,5 g de solo incubado com diferentes doses de biocarvão. Após 24 horas de agitação, as amostras foram filtradas e o fósforo na solução de equilíbrio, quantificado por colorimetria (Braga; Defelipo, 1972).

Para descrever o fenômeno de adsorção de P, foram utilizadas as equações de Langmuir (equação 5) e Freundlich (equação 6).

$$q_{\text{eq}} = \frac{q_{\text{máx}} \cdot C_{\text{eq}} \cdot K_L}{1 + (K_L \cdot C_{\text{eq}})} \quad (5)$$

$$q_{\text{eq}} = K_f \cdot (C_{\text{eq}})^{1/n} \quad (6)$$

Em que: q_{eq} é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}); C_{eq} é a concentração de adsorvato no equilíbrio (mg L^{-1}); $q_{\text{máx}}$ corresponde à capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1}); $1/n$ é a constante relacionada à heterogeneidade da superfície; e K_L e K_f são as constantes de energia de adsorção de Langmuir (L mg^{-1}) e a constante de capacidade de adsorção de Freundlich (L mg^{-1}), respectivamente.

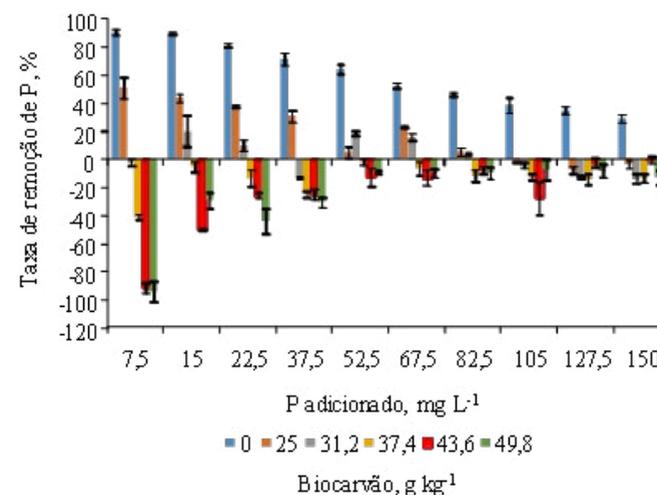
Para a taxa de remoção de fósforo, o desdobramento das doses de biocarvão dentro de cada nível de fósforo adicionado foi analisado pelo teste de Scott-Knott, usando o software estatístico SISVAR 5.7.

O ajuste dos dados experimentais pelas equações 5 e 6 foi realizado através de regressão não linear, utilizando a ferramenta SOLVER da Microsoft Office Excel, bem como a metodologia da soma do quadrado dos erros, a qual representa a soma do quadrado das diferenças entre os valores experimentais e calculados (Foo; Hameed, 2010).

A qualidade dos ajustes dos modelos de adsorção e de cinética foi determinada pela comparação dos valores dos coeficientes de determinação (R^2) e soma de quadrados dos erros (SQE). Os modelos que apresentaram o maior R^2 e a menor SQE foram considerados os mais adequados para descrever os processos de adsorção e cinética.

A taxa de remoção de P após 24 horas, nas diferentes concentrações utilizadas no estudo de adsorção em função da aplicação de doses de biocarvão, é apresentada na Figura 1. Percebe-se que as maiores taxas de remoção, independentemente da concentração de P aplicada, foram obtidas utilizando o solo na ausência de biocarvão, cujas remoções foram superiores a 60% até a adição de $52,5 \text{ mg L}^{-1}$ de P.

Figura 1 - Taxas de remoção de P nas diferentes concentrações utilizadas no estudo de adsorção pelo solo incubado com doses de biocarvão



Nota: Barras representam o erro padrão. Elaborado pelos autores.

A capacidade do solo em remover P variou com as doses de biocarvão e as suas concentrações nas soluções de tratamento. De maneira geral, a taxa de remoção de P diminuiu a partir do momento em que o solo foi incubado com biocarvão, assumindo valores negativos, independentemente da concentração de P adicionada, com o uso de doses de biocarvão superiores a 24,8 t ha⁻¹. Esse comportamento indica que o solo com essas doses não foi capaz de remover P, porque, acima destas doses, a concentração de P na solução de equilíbrio superou a capacidade de remoção P pelo solo, permanecendo na solução.

Com o aumento da concentração de P em solução, houve uma diminuição na remoção de P com o uso das maiores doses de biocarvão (Figura 2). Isso ocorreu, provavelmente, pela mesma razão anterior, ou seja, a capacidade de remoção do solo também diminuiu com o aumento da concentração de P na solução de solo (P adicionado pela solução de tratamentos + P liberado pelo biocarvão), aumentando o P em equilíbrio. Tomando-se como exemplo a aplicação de 150 mg L⁻¹ de P, a concentração de P remanescente correspondeu a 106,64; 155,50; 173,33; 170,36; 150,96 e 169,89 mg L⁻¹ de P com a aplicação de 0; 25; 31,2; 37,4; 43,6; 49,8 e 49,8 g kg⁻¹ de biocarvão, respectivamente. Neste caso, apenas no tratamento controle (ausência de biocarvão), houve remoção de P, caracterizando assim a adsorção deste elemento pelo adsorvente (solo).

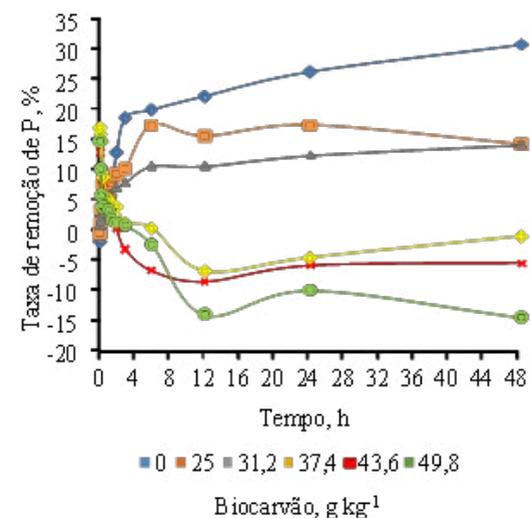
Embora a maioria dos estudos tenha demonstrado que o biocarvão pode aumentar o teor de P no solo, devido ao fornecimento direto de P atuando como fonte de P e/ou a redução da adsorção de P em óxidos de Fe, alguns estudos mostraram que não há efeito significativo; e outros mostraram que o biocarvão pode até reduzir o P disponível no solo, provavelmente devido às características da matéria-prima utilizada na produção do biocarvão.

Até o momento, variações na disponibilidade de P em solos alterados por biocarvão não são claramente entendidas. Entretanto, é razoável afirmar que o impacto do biocarvão na disponibilidade de P nos solos é afetado pelas características inerentes ao biocarvão (por exemplo, temperatura de pirólise, presença de grupos funcionais, teor total de P, pH, entre outros) e às características do solo, como pH do solo, P inorgânico e orgânico do solo, tipo de solo, força iônica e diversidade microbiana nativa.

Neste trabalho, a temperatura de pirólise utilizada, 350°C, para a produção do biocarvão de cama de aviário pode ter influenciado a disponibilidade de fósforo.

A taxa de remoção de fosfato pelo solo incubado com diferentes doses de biocarvão, por 48 horas, é mostrada na Figura 2. Neste estudo, a concentração de P utilizada foi de 52,5 mg L⁻¹.

Figura 2 – Taxa de remoção de fósforo ao longo do tempo em função da aplicação de diferentes doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

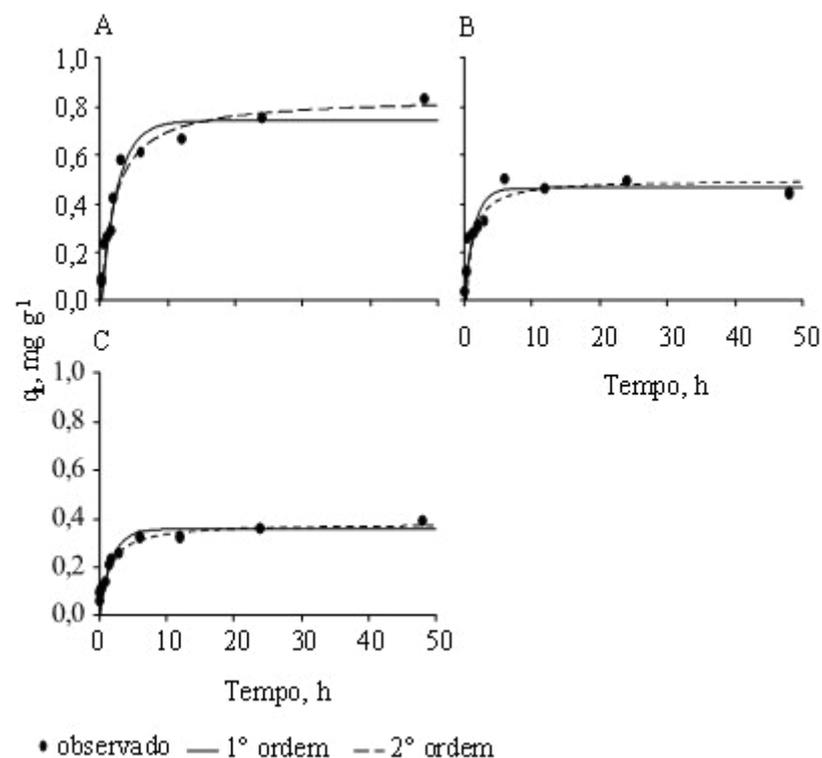
Pode-se observar que, entre os diversos tratamentos, apenas as amostras de solo incubadas com as três primeiras doses de biocarvão apresentaram capacidade positiva de remoção de fósforo. No entanto, conforme visto no estudo de sorção, houve uma diminuição na retenção de fósforo devido à aplicação de biocarvão; em ordem decrescente, as maiores taxas foram 30,62; 14,08; e 14,08% para os tratamentos 0,25 e 31,2 g kg⁻¹, respectivamente. Nas demais doses de biocarvão, ou seja, 37,4; 43,6; e 49,8 g kg⁻¹, a retenção de fósforo foi negativa, pois a concentração desse ânion aumentou em relação à concentração inicial após o término da reação (48 horas), cujas médias foram de 55,43; 53,08 e 60,13 mg L⁻¹, respectivamente. Esse aumento deveu-se provavelmente ao bloqueio dos sítios de adsorção do solo e à liberação de P promovida pelo biocarvão.

O comportamento de adsorção de P em função do tempo de contato nos tratamentos 0,25 e 31,2 g kg⁻¹ de biocarvão foi investigado através de estudos cinéticos (Figura 3).

Independentemente do tratamento, o processo de adsorção de P foi rápido no estágio inicial da reação, devido a um alto número de locais de ligação disponíveis para adsorção (Ghaedi *et al.*, 2011); em seguida, a taxa diminuiu progressivamente com o tempo de contato até alcançar o equilíbrio, o que ocorreu dentro de 6 horas.

A ordem da quantidade de adsorção em equilíbrio observada neste estudo foi consistente com os resultados dos experimentos de sorção, corroborando que o solo, na ausência de biocarvão, apresenta a maior capacidade de adsorção de P.

Figura 3 - Cinética de adsorção de P no solo incubado com 0 g kg⁻¹ (A), 25 g kg⁻¹ (B) e 31,2 g kg⁻¹ (C) de biocarvão



Elaborado pelos autores.

A partir das curvas obtidas para os modelos cinéticos de primeira e segunda ordem, realizaram-se os cálculos pertinentes para obtenção dos parâmetros relacionados à cinética de adsorção do biocarvão em relação ao íon estudado. Ou seja, foram

obtidos os valores das constantes de velocidade de adsorção (k), concentração de metal adsorvido no equilíbrio (q_e), coeficiente de determinação (R^2) e soma do quadrado dos erros (SQE), calculados a partir dos gráficos gerados para ambos os modelos de cinética (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros da cinética de adsorção de P em função das doses de biocarvão

APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO g kg ⁻¹	PSEUDOPRIMEIRA ORDEM				PSEUDOSSEGUNDA ORDEM			
	Q _E mg g ⁻¹	K ₁ h ⁻¹	R ²	SQE	Q _E mg g ⁻¹	K ₂ g mg ⁻¹ h ⁻¹	R ²	SQE
0	0,747	0,414	0,958	0,046	0,839	0,583	0,969	0,036
25	0,463	0,701	0,926	0,031	0,497	2,075	0,940	0,026
31,2	0,355	0,556	0,972	0,007	0,388	1,900	0,986	0,003
37,4	-	-	-	-	-	-	-	-
43,6	-	-	-	-	-	-	-	-
49,8	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaborado pelos autores.

Conforme apresentado na Tabela 1, ambos os modelos cinéticos se ajustaram aos dados experimentais, todavia, considerando os valores do coeficiente de determinação (R^2) e da soma de quadrados do erro (SQE), os resultados experimentais de adsorção cinética, independentemente da dose de biocarvão, são mais bem explicados em termos do modelo de pseudossegunda ordem, corroborando Wang *et al.* (2018) e Jung *et al.* (2015). Com base nesse modelo, os valores calculados de q_e foram próximos dos valores experimentais (0,839; 0,443; e 0,397 para as doses 0,25 e 31,2 g kg⁻¹, respectivamente, após 48 horas) e também os valores de R^2 foram próximos de 1,0.

O modelo de pseudossegunda ordem assume a quimiossorção como etapa predominante do mecanismo cinético de adsorção, envolvendo interações químicas que levam à formação de compostos químicos ou complexo de adsorção na superfície do material adsorvente (Ofomaja *et al.*, 2010). Neste caso, a adsorção está relacionada com a concentração do adsorvato em solução e com os sítios de adsorção do adsorvente, propondo que a velocidade de adsorção seja dependente da capacidade de adsorção no equilíbrio e não somente na concentração de adsorvato.

Com relação à concentração de P adsorvido no equilíbrio (q_e), verificou-se um decréscimo desses valores, com o aumento da dose de biocarvão aplicada. Tal resultado indica que o biocarvão diminui a capacidade de adsorção de P pelo solo. No entanto, essa informação só pode ser confirmada pelos resultados obtidos dos estudos de equilíbrio, apresentados posteriormente.

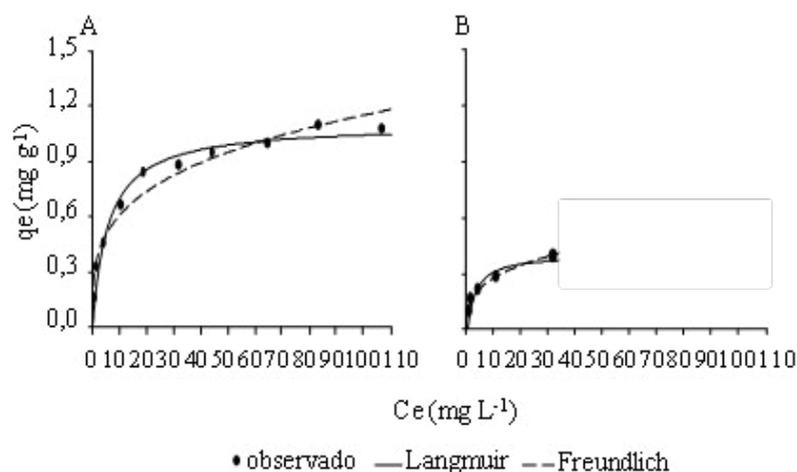
Ainda com relação à Tabela 1, verifica-se que o biocarvão promoveu um aumento na velocidade de adsorção (k). Esse comportamento é decorrente da concentração de P presente no biocarvão, igual a 40,8 g kg⁻¹ de P total. A velocidade de adsorção aumentou com o uso de biocarvão, devido à liberação de P na solução de equilíbrio, contudo, apesar dos maiores valores de (k), sítios de adsorção foram bloqueados pelo biocarvão, diminuindo a concentração adsorvida.

As isotermas são modelos matemáticos que descrevem um sistema de adsorção. Através desses modelos, é possível avaliar interações entre o material que adsorve (adsorvente) e o íon que é adsorvido (adsorvato), sendo o íon retido na interface do sólido. Neste estudo, o adsorvente foi o solo na ausência de biocarvão e o incubado com 25 g kg⁻¹, isto porque, como verificado no tópico anterior sobre sorção, a liberação superou a adsorção no tratamento

solo + 31,2 g kg⁻¹ de biocarvão, com a adição das concentrações: 7,5; 37,5; 105,0; 127,5 e 150,0 mg L⁻¹ de P. Nas demais doses, não foi observado sorção independentemente da concentração adicionada.

As isotermas de adsorção de P foram obtidas pela relação entre a quantidade de P adsorvido (q_e , mg g⁻¹) e a concentração no equilíbrio (C_e , mg L⁻¹). Essas isotermas para os tratamentos 0 e 25 g kg⁻¹ de biocarvão foram avaliadas ajustando-as aos modelos de Langmuir e Freundlich (Figura 4A e 4B).

Figura 4 - Isotermas de adsorção de P no solo incubado com 0 g kg⁻¹ (A) e 25 g kg⁻¹ (B) de biocarvão



Elaborado pelos autores.

Ainda analisando as Figuras 4A e 6B, percebeu-se que as isotermas de adsorção, independentemente da dose de biocarvão aplicada, apresentaram curvatura côncava em relação à abscissa, indicando que a adsorção foi favorável, apresentando a superfície

do adsorvente uma alta afinidade pelo íon em estudo, mesmo em condições de baixa concentração na solução. Verificou-se ainda uma diminuição da disponibilidade dos sítios de adsorção, com o aumento da concentração da solução.

Os valores da capacidade máxima de adsorção de fósforo (q_{max}) e da constante de energia de adsorção (K_L) para a isoterma de Langmuir, da constante de capacidade de adsorção (K_f), da constante (n) para a isotérmica de Freundlich, dos coeficientes de determinação das equações e da soma do quadrado dos erros (SQE) dos modelos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros da isoterma de adsorção de P em função da aplicação de biocarvão segundo os modelos de Langmuir e Freundlich (SQE = Soma de quadrado dos erros)

APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO g kg ⁻¹	PH	PARÂMETROS ESTIMADOS PELA EQUAÇÃO DE LANGMUIR				PARÂMETROS ESTIMADOS PELA EQUAÇÃO DE FREUNDLICH			
		Q _{MAX}	K _L	R ²	SQE	K _F	N	R ²	SQE
		mg g ⁻¹	L mg ⁻¹			L mg ⁻¹			
0	5,20	1,105	0,174	0,986	0,022	0,017	3,614	0,972	0,042
25	5,56	0,402	0,328	0,971	0,003	0,002	3,087	0,993	0,0007
31,2	5,92	-	-	-	-	-	-	-	-
37,4	6,20	-	-	-	-	-	-	-	-
43,6	6,35	-	-	-	-	-	-	-	-
49,8	6,50	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaborado pelos autores.

Os dados de adsorção de P foram ajustados aos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich. Independentemente da dose aplicada, ambos os modelos descreveram bem os padrões de adsorção de P, evidenciados pelos altos valores de coeficien-

te de determinação (R^2) e baixos valores de soma de quadrados dos erros (SQE). Contudo, no tratamento ausência de biocarvão, o modelo de Langmuir apresentou o maior coeficiente de determinação (0,986) e uma menor soma de quadrado dos erros (0,022), mostrando que a adsorção de P foi mais bem descrita por este modelo, assumindo que a sorção foi uniforme em todos os sítios de ligação. Com a aplicação de 25 g kg⁻¹ de biocarvão, verifica-se que o modelo de Freundlich apresentou um R^2 igual a 0,993 e uma SQR de 0,0007, indicando que a adsorção ocorreu com a formação de multicamadas, ao invés de apenas uma monocamada, e que a afinidade pelos locais de adsorção diminuiu exponencialmente com o aumento da saturação (Paul, 2013).

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (q_{max}) diminuiu com o uso do biocarvão, passando de 1,105 mg g⁻¹ (ausência de biocarvão) para 0,402 mg g⁻¹ (solo mais com 25 g kg⁻¹ de biocarvão), o que representou uma redução de 63,62% na capacidade que o solo possui em adsorver fósforo (Tabela 2). Diferentemente da q_{max} , a energia de ligação de Langmuir (K_L) aumentou em função da aplicação do biocarvão, de 0,174 para 0,328 L mg⁻¹ com as doses 0 e 25 g kg⁻¹, respectivamente, indicando que, nas menores taxas de incubação, o P foi adsorvido mais fortemente pelo solo incubado. Entretanto, este resultado não é conclusivo, isto porque, apenas na dose mais baixa de aplicação de biocarvão, foi possível determinar as isotermas e, mesmo assim, apenas em 5 das 10 concentrações adicionadas ocorreu a adsorção.

A diminuição na adsorção de P pode estar relacionada com o aumento do pH do solo após a aplicação do biocarvão. Na Tabela 2, percebe-se que, no tratamento controle, o pH do solo era 5,20, mas seu valor aumentou proporcionalmente com o uso do biocar-

vão, apresentando o maior valor (6,50) com o uso de 49,8 g kg⁻¹. O argissolo utilizado neste estudo, por ser bastante intemperizado, apresenta suas cargas elétricas dependentes do pH, logo o aumento deste atributo com a utilização do biocarvão aumentou o teor de carga líquida negativa do solo e, conseqüentemente, diminuiu a adsorção de fósforo.

Ainda com relação à Tabela 2, observa-se que a capacidade de adsorção (K_f) e a constante (n) de Freundlich foram maiores no tratamento com ausência de biocarvão, 0,017 e 3,614, respectivamente. Segundo Kim *et al.* (2018), valores de n entre 1 e 10 indicam que a adsorção foi efetiva e conforme o valor de K_f aumenta, maior será a afinidade do adsorvato pelo adsorvente. Esses resultados demonstram que o argissolo utilizado neste estudo, quando incubado, apresenta menor local de sorção para P.

Apesar de o biocarvão de cama de aviário utilizado neste estudo apresentar características que poderiam promover uma adsorção de P, tais como área superficial (3,37 m² g⁻¹) e presença de mesoporos, essas propriedades não aumentaram a sua capacidade adsorvativa para o íon fosfato.

Ao contrário, foi observado um aumento do P disponível para o solo em função das doses de biocarvão, provavelmente devido ao seu caráter alcalino, aumentando a presença de cargas negativas no solo; e devido à liberação de P de sua composição para o solo. Os resultados isotérmicos e cinéticos deste estudo sugerem que a aplicação de biocarvão diminui a capacidade de adsorção de fósforo do argissolo e aumenta a concentração de P remanescente, o que é promissor do ponto de vista agrônômico, pois aumenta a disponibilidade desse nutriente nas lavouras

Conforme o que foi apresentado acima, pode-se afirmar que a maior capacidade de adsorção de fósforo no solo foi de 1,105 mg g⁻¹, confirmando o estudo cinético em que houve diminuição da adsorção proporcionalmente à aplicação de biocarvão, cuja concentração liberada superou a adsorvida, incubando o solo com 37,4; 43,6 e 49,8 g kg⁻¹. O modelo de Langmuir foi melhor para descrever a adsorção de P pelo solo nos tratamentos 0 e 25 g kg⁻¹ de biocarvão. A cinética de adsorção do P ajustou-se bem ao modelo de pseudosegunda ordem, mostrando que a adsorção é controlada quimicamente.

E, finalmente, consideramos que, em solos intemperizados com baixo teor de P, a aplicação de biochar de cama de aviário pode ser utilizada como fertilizante e como condicionador de solo, aumentando a disponibilidade de P para o solo.

ESTUDO DE CASO 2

Adsorção de zinco em argissolo e neossolo utilizando biocarvão de cama de aviário (Lima *et al.*, 2017)²

Para avaliar o efeito do biocarvão no processo de adsorção de zinco em argissolos e neossolos, bem como a influência do pH neste processo por meio das equações de Langmuir e Freundlich, foi conduzido um experimento no LIS/DEAg/UFCCG, no período de agosto a dezembro de 2016, utilizando-se o método de incubação em vasos por 100 dias e experimento de adsorção. As amostras

2 . LIMA, W. B.; FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B. Adsorption of zinc in Ultisol and Entisol amended with poultry litter biochar. **World Applied Sciences Journal**, v. 35, n. 1, p. 142-150, 2017.

desses solos foram coletadas nos municípios de Campina Grande e Lagoa Seca, PB, cuja caracterização química foi feita conforme metodologia da Teixeira *et al.* (2011). Os atributos dos solos estão presentes na Tabela 1.

O biocarvão utilizado neste estudo foi produzido a partir da cama de frango (PL), resíduo sólido resultante da criação de frangos, sob pirólise lenta. Foram encontrados os seguintes atributos: pH H₂O (1:2,5) = 10,1; Ca = 57,75 g kg⁻¹; Mg = 12,40 g kg⁻¹; Na = 14,37 g kg⁻¹; K = 48,56 g kg⁻¹; P = 32,56 g kg⁻¹; N = 42,31 g kg⁻¹; Fe = 137mg kg⁻¹; Cu = 812 mg kg⁻¹; Zn = 700 mg kg⁻¹; Mn = 863 mg kg⁻¹.

Tabela 1 - Caracterização química das amostras de solo utilizadas para os testes

ATRIBUTOS QUÍMICOS	ARGISSOLO	NEOSSOLO
Cálcio (cmol _c kg ⁻¹)	2,02	0,78
Magnésio (cmol _c kg ⁻¹)	1,46	1,19
Sódio (cmol _c kg ⁻¹)	0,09	0,08
Potássio (cmol _c kg ⁻¹)	0,14	0,14
Soma de bases (cmol _c kg ⁻¹)	3,71	2,19
Hidrogênio (cmol _c kg ⁻¹)	6,36	2,72
Alumínio (cmol _c kg ⁻¹)	0,40	0,20
CTC (cmol _c kg ⁻¹)	10,07	5,11
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	11,90	9,60
Fósforo comparável (mg kg ⁻¹)	3,20	11h40
pH H ₂ O (1:2,5)	5,12	5,30
V%	36,84	42,85
Índice Ki (SiO ₂ / Al ₂ O ₃)	2,46	2,17

CTC- capacidade de troca catiônica, V% - Porcentagem de saturação por bases. Elaborado pelos autores.

Para avaliar o comportamento do biocarvão no solo, amostras de argissolo e neossolo foram incubadas com doses crescentes de biocarvão por 100 dias, ou seja, com os seguintes tratamentos: 1) Sem biocarvão (testemunha) (wb); 2) 3,15 g kg⁻¹ de solo (b1U); 3) 5,83 g kg⁻¹ de solo (b2U); e 1) Sem biocarvão (testemunha) (wb); 2) 1,17 g kg⁻¹ de solo (b1E); 3) 2,51 g kg⁻¹ de solo (b2E), respectivamente. Para isso, os solos das amostras foram colocados em potes plásticos (unidades experimentais) e misturados com biocarvão, de acordo com os tratamentos; e depois umedecidos com água deionizada até aproximadamente 60% de teor de água (ou seja, a capacidade de campo do solo). Todos os ensaios foram realizados em duplicata. Os potes incubados foram colocados em uma sala a 28°C e pesados a cada 5 dias para manter o teor de umidade constante. Após 100 dias de incubação, as amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas (2 mm) para serem utilizadas em experimentos de adsorção.

Os experimentos de adsorção de zinco foram realizados usando uma técnica de equilíbrio em batelada. A solução estoque (1000 ppm) de zinco foi preparada pela dissolução analítica de ZnCl em solução de cloreto de cálcio 0,01M. Resumidamente, 2,0 g de material (doses de solo + biocarvão) foram misturados em tubos de centrífuga de 50 mL com 20 mL de solução eletrolítica de cloreto de cálcio, contendo diferentes concentrações de zinco com 0; 12; 23; 35; e 46 mg L⁻¹. Antes do equilíbrio entre solo e/ou solo + biocarvão e solução de zinco, os lotes receberam HCl 0,1 M ou NaOH 0,1 M para obtenção dos valores de pH 4 ± 0,5, 6 ± 0,5 e 8 ± 0,5. Cada lote foi agitado por 24 horas em um agitador horizontal a 100 oscilações/min. Depois de agitadas, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 15 minutos, seguidas de filtração

em filtro Whatman N.1. A solução sobrenadante foi analisada para zinco por espectrofotometria de absorção atômica. O Zn adsorvido foi calculado como a diferença entre a quantidade adicionada inicialmente e a quantidade restante na solução após o equilíbrio.

As isotermas de adsorção indicam como as moléculas se distribuem entre a fase líquida e a fase sólida quando o processo de adsorção atinge um estado de equilíbrio. A análise dos dados de isoterma, ajustando-os a diferentes modelos de isoterma, é uma etapa importante para encontrar o modelo adequado, que pode ser usado para fins de projeto. Os dados de isoterma foram ajustados a dois modelos de isoterma: Langmuir e Freundlich.

A equação de Langmuir foi ajustada para descrever a adsorção de zinco: $q_e = Q_{\max} b C_e / (1 + b C_e)$, onde q_e é a quantidade de zinco adsorvido por unidade de peso do solo (mg g⁻¹); C_e é a concentração de equilíbrio da solução (mg L⁻¹); Q_{\max} é a capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹); e b é a constante relacionada à afinidade (L mg⁻¹). A equação de Freundlich foi ajustada para descrever a adsorção de zinco: $q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$, onde K_F é o coeficiente de adsorção de Freundlich (L mg⁻¹) e n é o indicador de intensidade (adimensional). Q_{\max} e b podem ser determinados a partir do gráfico linear de C_e/q_e versus C_e . Os valores de K_F e n foram avaliados a partir do intercepto e da inclinação, respectivamente, do gráfico linear de $\ln q_e$ versus $\ln C_e$, com base nos dados experimentais.

A espontaneidade das reações de adsorção também foi descrita matematicamente pela determinação da energia livre de Gibbs $\Delta G^\circ = -RT \ln K_e$, em que: ΔG é a variação da energia livre (J mol⁻¹); R é a constante universal dos gases (8,314 J mol⁻¹ K⁻¹); T é a temperatura absoluta (K); e K_e (L/g), a constante de equilíbrio de adsorção ($K_e = q_e / C_e$) (Chen *et al.*, 2011).

Os dados de capacidade máxima de adsorção de Zn em função dos tratamentos, das doses de biocarvão e dos valores de pH foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de Lilliefors. Como não foi verificada a normalidade dos dados, foi necessário transformá-los para atender a esse requisito. As transformações usadas foram \sqrt{x} e $1/x$ para argissolo e neossolo, respectivamente. Em seguida, foram realizadas análises de variâncias dos efeitos dos tratamentos, estudados por meio do teste F e comparação de médias pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Conforme o estudo de adsorção, pode-se observar que as diferentes proporções entre os teores de Zn na solução de equilíbrio e os adsorvidos nos solos confirmaram que eles diferem em sua afinidade pelo elemento. Nos solos analisados, a imobilização variou em função da concentração de zinco na solução de equilíbrio, sendo as maiores taxas de adsorção observadas com o aumento do pH da solução e das concentrações iniciais do elemento.

Em pH 8, as isotermas em ambos os solos foram do tipo H (H= Alto), devido à forte interação específica entre as partículas do solo e o zinco; e para os demais valores de pH, as curvas foram do tipo L (L = Langmuir), caracterizadas por um declínio da inclinação.

As constantes de adsorção, equações e coeficientes de correlação para Zn em diferentes valores de pH e doses de biochar, em ambos os solos, obtidos a partir das isotermas de Langmuir e Freundlich, são apresentados na Tabela 2.

Apesar das diferenças nas propriedades físicas e químicas dos solos, os coeficientes de correlação (R^2) de ambos os modelos de Langmuir e Freundlich ajustaram-se bem aos dados de adsorção e podem ser usados para descrever a adsorção de Zn em ar-

gissolo e neossolo, corrigido ou não com biocarvão nos diferentes pH valores.

De maneira geral, independentemente dos tratamentos utilizados, a maior capacidade de adsorção de Zn foi observada no argissolo, o que pode estar associado à superioridade dos teores de argila, CTC e carbono orgânico (Tabela 1). A principal propriedade física que influencia a reatividade de um elemento no solo é a fração argila, que, por possuir uma elevada área superficial, permite um maior contato com os íons em solução e, consequentemente, promove maior adsorção.

Independentemente dos solos e das doses de adição de biocarvão, a capacidade máxima de adsorção estimada pela equação de Langmuir aumentou com o aumento dos valores de pH, uma vez que influencia as propriedades dos adsorventes, por exemplo, aumento nas cargas variáveis negativas nos solos, bem como a especiação do íon em solução aquosa.

Analisando o efeito do pH isolado, houve um aumento na quantidade de Zn adsorvido em 101,76% e 248,39% para argissolo e 86,32% e 647,01% para entissol, com o aumento do pH da solução de 4 para 6 e 8, respectivamente (Tabelas 2 e 3).

O aumento da capacidade de adsorção em valores de pH mais altos pode ser atribuído à diminuição do efeito do íon H_3O^+ e ao aumento das cargas negativas dependentes do pH, com a dissociação do íon OH^- dos grupos funcionais, principalmente em solos mais intemperizados, como argissolo (Tabela 1).

Porém, em relação às doses de biocarvão utilizadas, observou-se que a capacidade máxima de adsorção após a adição de biocarvão no argissolo com pH 4,0 foi 1,6 maior em relação ao solo controle, sem biocarvão. Nas amostras de solo com pH 6 e

8, a adição de biocarvão não influenciou a capacidade máxima de adsorção de Zn.

No entissol, em pH 4 e 6, a capacidade máxima de adsorção nas amostras de biocarvão aumentou 1,5 e 1,2 vezes em relação às amostras sem biocarvão, respectivamente. Porém, nas amostras de solo com pH 8, a adição de biocarvão não influenciou (Tabelas 3). Assim, parece que a capacidade máxima de adsorção de zinco nesses solos foi mais influenciada pela variação do pH das amostras de solo do que pela variação das doses de biocarvão.

Tabela 2 - Parâmetros termodinâmicos, constantes, equações e coeficientes de correlação dos modelos de Langmuir e Freundlich para a adsorção de Zn em um argissolo para diferentes pHs e doses de biocarvão

TRATAMENTO	ΔG° kJ mol ⁻¹	LANGMUIR			FREUNDLICH				
		B L mg ⁻¹	Q _{MÁX} mg g ⁻¹	EQUAÇÃO	R ²	K _F	N	EQUAÇÃO	R ²
-----Argissolo-----									
wb* pH4,0	-12,44	2,771	0,081	(0,224C)/ (1+2,77C)	0,99	0,065	17,18	0,065C ^{1/17,18}	0,99
b1U** pH4,0	-10,32	1,174	0,132	(0,155C)/ (1+1,17C)	0,99	0,069	5,55	0,069C ^{1/5,55}	0,99
b2U** pH4,0	-7,87	0,434	0,128	(0,055C)/ (1+0,43C)	0,99	0,028	2,35	0,028C ^{1/2,35}	0,99
wb* pH 6,0	-7,59	0,389	0,224	(0,087C)/ (1+0,39C)	0,99	0,043	2,03	0,043C ^{1/2,03}	0,99
b1U** pH6,0	-8,02	0,462	0,221	(0,102C)/ (1+0,46C)	0,99	0,055	2,41	0,055C ^{1/2,41}	0,99
b2U** pH6,0	-7,85	0,433	0,243	(0,105C)/ (1+0,43C)	0,99	0,055	2,23	0,055C ^{1/2,23}	0,99
wb* pH8,0	-9,10	0,715	0,398	(0,285C)/ (1+0,72C)	0,96	0,049	1,12	0,049C ^{1/1,12}	0,96
b1U** pH8,0	-8,91	0,662	0,398	(0,263C)/ (1+0,66C)	0,97	0,065	1,36	0,065C ^{1/1,36}	0,97
b2U** pH8,0	-9,17	0,737	0,392	(0,289C)/ (1+0,74C)	0,95	0,048	1,11	0,048C ^{1/1,11}	0,95

*wb= sem biocarvão; ** g kg⁻¹; *wb= sem biocarvão; ** g kg⁻¹; ΔG° energia livre de Gibbs, b constante relacionada a afinidade, Q_{max} capacidade máxima de adsorção, K_F Freundlich coeficiente de adsorção, n indicador de intensidade, R² coeficiente de correlação. Elaborado pelos autores.

Tabela 3 - Parâmetros termodinâmicos, constantes, equações e coeficientes de correlação dos modelos de Langmuir e Freundlich para a adsorção de Zn em um entissol para diferentes pHs e doses de biocarvão

TRATAMENTO	ΔG° kJ mol ⁻¹	LANGMUIR			FREUNDLICH				
		B L mg ⁻¹	Q _{MÁX} mg g ⁻¹	EQUAÇÃO	R ²	K _F	N	EQUAÇÃO	R ²
-----Entissol-----									
wb* pH4,0	-5,18	0,219	0,030	(0,007)/ (1+0,22C)	0,95	0,0008	1,05	0,0008C ^{1/1,05}	0,99
b1 E* pH4,0	-5,39	0,159	0,041	(0,007C)/ (1+0,16C)	0,88	0,0017	1,17	0,0017C ^{1/1,17}	0,94
b2E** pH4,0	-5,71	0,182	0,046	(0,008C)/ (1+0,12C)	0,98	0,0020	1,16	0,0020C ^{1/1,16}	0,99
wb* pH 6,0	-4,63	0,117	0,066	(0,008C)/ (1+0,12C)	0,95	0,0007	0,81	0,0007C ^{1/0,81}	0,97
b1 E** pH6,0	-5,37	0,158	0,074	(0,012C)/ (1+0,16C)	0,88	0,0016	0,93	0,0016C ^{1/0,93}	0,91
b2 E** pH 6,0	-5,51	0,168	0,078	(0,013C)/ (1+0,17C)	0,91	0,0022	1,00	0,0022C ^{1/1,00}	0,93
wb* pH8,0	-8,56	0,576	0,292	(0,285C)/ (1+0,58C)	0,88	0,0003	0,37	0,0003C ^{1/0,37}	0,93
b1 E** pH8,0	-7,22	0,335	0,303	(0,263C)/ (1+0,34C)	0,95	0,0026	0,59	0,0026C ^{1/0,59}	0,98
b2 E** pH8,0	-7,36	0,354	0,279	(0,099C)/ (1+0,35C)	0,91	0,0023	0,59	0,0023C ^{1/0,59}	0,94

*wb= sem biocarvão; ** g kg⁻¹; *wb= sem biocarvão; ** g kg⁻¹; ΔG° energia livre de Gibbs, b constante relacionada a afinidade, Q_{max} capacidade máxima de adsorção, K_F Freundlich coeficiente de adsorção, n indicador de intensidade, R² coeficiente de correlação. Elaborado pelos autores.

O parâmetro b está relacionado com a afinidade dos sítios de ligação, o que permite comparações da afinidade do solo com/sem biocarvão para o íon zinco. Independentemente dos solos e das doses de adição de biocarvão, a energia de ligação foi maior nas amostras com pH mais elevado.

A energia de ligação nas amostras de argissolo e entissol com pH 4 e nas amostras de entissol com pH 8 sem biocarvão foi maior

do que nas amostras com biocarvão. De acordo com Tan *et al.* (2015), o biocarvão nessas amostras com pH 4 aumentou a força de ligação fraca/instável do Zn pelo solo. Em amostras com pH 6, a energia de ligação aumentou; e, finalmente nas amostras de argissolo com pH 8, praticamente a energia não variou em função da aplicação do biocarvão.

De maneira geral, as maiores variações de b foram observadas no entissol, comparando-se as médias obtidas com a aplicação das diferentes doses de biocarvão dentro de um mesmo valor de pH. No entanto, o argissolo, por apresentar os maiores teores de argila, CTC e carbono orgânico, promoveu as maiores energias de ligação.

No presente estudo, o biocarvão produzido a partir da cama de frango demonstrou, em algumas amostras de solos, o aumento da adsorção de Zn nos solos; porém, em outras amostras de solos, isso não ocorreu. Portanto, a natureza da interação é dependente das propriedades do solo, do valor do pH do solo e das características do biocarvão. Devido a isso, de maneira geral, a resposta da aplicação do biocarvão no entissol, solo arenoso, com menores valores de capacidade de troca catiônica e matéria orgânica, em relação à adsorção de Zn, foi mais eficaz do que no argissolo porque o biocarvão aumentou a superfície de adsorção em entissol.

Segundo Geethakarthy e Phanikumar (2011), a constante “ n ” do modelo de Freundlich está qualitativamente relacionada com a distribuição dos sítios energéticos nos colóides do solo. Independentemente do solo analisado, valores de “ n ” maiores que um indicam a presença de sítios altamente energéticos, sugerindo que sejam os primeiros a serem ocupados pelo Zn. Segundo Moradi *et al.* (2015), valores de “ n ” entre 1 e 10 representam um bom

potencial de adsorção do adsorvente, ou seja, indicam que o tipo de isoterma é favorável $n > 1$ ou desfavorável $n < 1$.

O parâmetro termodinâmico de energia livre de Gibbs (ΔG^0), apresentado na Tabela 2, é uma medida da extensão ou força que guia a reação de adsorção (Soares *et al.*, 2005). Independentemente do solo ou biocarvão, as doses e os valores de pH ΔG^0 foram negativos, confirmando a viabilidade e a espontaneidade da adsorção de Zn.

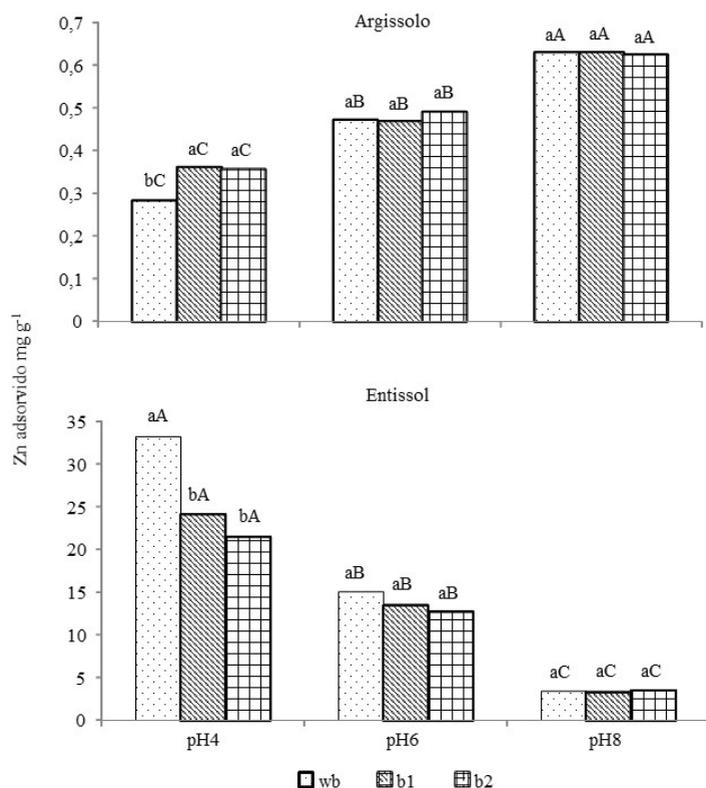
Com exceção das amostras com pH 4, nas demais amostras, independentemente do solo, com o aumento do pH de 6 para 8, os valores de ΔG^0 aumentaram indicando que o fenômeno se tornou mais termodinamicamente espontâneo com esse aumento. No entanto, no argissolo com pH 4, o ΔG^0 tornou-se mais negativo, implicando um aumento na força motriz para que a reação de adsorção ocorresse. Nas amostras de entissol com pH 4, o ΔG^0 tornou-se mais negativo do que as amostras com pH 6 e menos negativo do que as amostras com pH 8. O aumento das doses de biocarvão nas amostras de argissolo com pH 6 e 8, e nas amostras de entissol com pH 4 e 6, aumentou os valores de energia livre de Gibbs, indicando que a aplicação de biocarvão no solo foi uma reação favorável. De acordo com a análise de variância, as doses de biocarvão, a variação do pH do solo e a interação entre esses fatores tiveram influência significativa na adsorção de zinco nos solos.

A adsorção de zinco no argissolo e entissol em função das doses de biocarvão e valores de pH são apresentadas na Figura 1.

Os níveis de biocarvão diferiram significativamente apenas nas amostras de argissolo e entissol em pH 4. Em relação à variação do pH, houve diferença significativa na adsorção de zinco em ambos os solos, aumentando com o aumento do pH.

Os níveis de biocarvão diferiram significativamente apenas nas amostras de argissolo e entissol em pH 4. Em relação à variação do pH, houve diferença significativa na adsorção de zinco em ambos os solos, aumentando com o aumento do pH.

Figura 1 – Zinco adsorvido no argissolo (A) e entissol (B) dependendo das diferentes doses de biocarvão e valores de pH



Nota: Letras minúsculas iguais às doses de biocarvão não diferem entre si dentro do mesmo valor de pH, e letras maiúsculas iguais aos valores de pH não diferem entre si dentro da mesma dose de biocarvão.

Elaborado pelos autores.

Conforme o exposto, este estudo investigou a capacidade do biocarvão produzido a partir da cama de frango em adsorver Zn em argissolo e entissol. As isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich podem ser usadas para estimar a adsorção de zinco em ambos os solos. Independentemente do tratamento utilizado, o argissolo foi o que apresentou maior capacidade máxima de adsorção. O biocarvão aumentou a adsorção de Zn em ambos os solos, porém nas amostras com pH 4, o pH da solução foi o fator que mais contribuiu para o processo de adsorção. Em todas as amostras de solo, os valores de ΔG^0 foram negativos, confirmando a viabilidade e a espontaneidade da adsorção de Zn.

ESTUDO DE CASO 3

Otimização da adsorção de cádmio usando biocarvão de cama de aviário por meio da metodologia de superfície de resposta (Chaves *et al.*, 2021)³

Para avaliar a capacidade do biocarvão de cama de aviário em adsorver cádmio (Cd^{2+}) em soluções aquosas sob diferentes condições experimentais, incluindo concentração de Cd^{2+} , pH da solução, tempo de contato e quantidade de adsorvente, usando o planejamento do composto central (PCC) para otimizar os fatores estudados pela metodologia de superfície de resposta (MSR), foi inicialmente produzido este biocarvão a partir de cama de frango no Laboratório de Irrigação e Salinidade do Departamento de

3. CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; MENDES, J. S.; TITO, G. A.; GUERRA, H. O. C.; LAURENTINO, L. G. S. Optimization of cadmium adsorption using poultry litter biochar through response surface methodology. *Chemical Engineering Transactions*, v. 86, p. 1507-1512, 2021.

Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Campina Grande, sob pirólise lenta, a 350°C, por 3 horas, em mufla. Após a pirólise, o biocarvão da cama de aviário foi triturado e peneirado para obtenção de granulometria em torno de 0,053 mm.

Em seguida, uma solução de Cd²⁺ foi preparada a partir de uma solução estoque de 1000 ppm. A concentração desejada foi obtida diluindo a solução estoque com água deionizada. O pH da solução foi ajustado com 0,1 mol L⁻¹ de HCl ou 0,1 mol L⁻¹ de NaOH, usando um medidor de pH digital.

A metodologia de superfície de resposta envolvendo planejamento composto central (PCC) foi utilizada no presente estudo. Para avaliar a influência de parâmetros operacionais na eficiência de adsorção de Cd²⁺ (resposta Y), quatro fatores (variáveis independentes) foram utilizados: massa de biocarvão de cama de frango (X₁), pH da solução inicial (X₂), tempo de agitação (X₃) e concentração da solução de Cd²⁺ (X₄), cada uma das variáveis em cinco níveis (-2, -1, 0, +1, +2) (Tabela 1-2). Para as quatro variáveis, foram realizados 30 experimentos, sendo 16 experimentos em pontos cúbicos, 8 experimentos em pontos axiais e 6 repetições em pontos centrais. Todos os experimentos foram derivados da Equação 1 (Jawad *et al.*, 2015).

$$\blacksquare N = 2^n + 2n + n_c = 2^4 + 2(4) + 6 = 30 \quad (1)$$

Onde N é o número total de experimentos necessários e n é o número de variáveis independentes.

Para o tratamento dos dados, foi utilizado o programa estatístico *Minitab Statistical Software* versão 18 para obtenção dos efeitos, coeficientes e desvio padrão dos coeficientes, gráficos dos efeitos padronizados, gráfico de Pareto, superfícies de resposta e

demais parâmetros estatísticos dos modelos ajustados. A qualidade do modelo polinomial de segunda ordem ajustado foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R²) e ANOVA.

Os testes de adsorção de Cd²⁺ foram conduzidos de acordo com o PCC. As variáveis independentes apresentaram os seguintes níveis: massa de biocarvão de cama de aviário (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 g), pH da solução inicial (3, 4, 5, 6 e 7), tempo de agitação (2,5; 5,0; 7,5; 10,0 e 12,5 h) e concentração da solução de Cd²⁺ (5, 15, 25, 35 e 45 mg L⁻¹). Cada teste foi realizado em um Erlenmeyer de 125 ml, contendo 25 ml de solução de Cd agitado a 150 rpm/min em temperatura ambiente (25 °C) com adsorvente biocarvão. A combinação da massa de biocarvão, concentração de Cd²⁺, tempo de agitação e pH da solução inicial foram definidos pelo PCC. Após cada período de agitação, as amostras foram coletadas, filtradas com papel filtro (faixa azul, peso de 80 g/m²) e analisadas por Espectrofotômetro de Absorção Atômica. A quantidade de Cd²⁺ adsorvida pelo biocarvão (q) foi determinada pela Equação 2.

$$\blacksquare q \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{(C_i - C_f)V}{m} \quad (2)$$

Onde C_i e C_f são as concentrações de equilíbrio inicial e final de Cd²⁺ (mg L⁻¹), respectivamente; V o volume da solução de Cd²⁺ (L) no peso do adsorvente biocarvão (g). Os resultados observados e previstos da adsorção de Cd²⁺ pelo biocarvão são apresentados na Tabela 1.

Utilizando a análise de regressão, foram calculados os coeficientes para o modelo de resposta desenvolvido (adsorção de Cd²⁺) e a relação empírica entre a capacidade de adsorção de Cd²⁺ (q) e as variáveis de processo decodificadas, conforme mostrado na Equação 3.

$$q \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = 0,440 - 0,764X_1 + 0,0199X_2 + 0,008X_3 + 0,03891X_4 + 0,2463X_1^2 - 0,00219X_2^2 - 0,00035X_3^2 - 0,000047X_4^2 + 0,0012X_1X_2 - 0,00050X_1X_3 - 0,01237X_1X_4 - 0,00025X_2X_3 + 0,000063X_2X_4 - 0,000025X_3X_4 \quad (3)$$

Onde q é a concentração de Cd²⁺ adsorvido, X₁, X₂, X₃ e X₄ são as variáveis independentes, ou seja, massa de biocarvão, pH da solução inicial, tempo de agitação e concentração da solução de Cd²⁺, respectivamente.

Tabela 1 - Planejamento do composto central e respostas observadas e ajustadas para adsorção de Cd 2+ por biocarvão de cama de aviário

(continua)...

RUN	NÍVEIS DE CÓDIGO				VARIÁVEIS INDEPENDENTES				RESPOSTA Q (mg g ⁻¹)	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	m (g)	pH	t (h)	Ci (mg L ⁻¹)	REAL	PREVISTO
17	-2	0	0	0	0,5	5	7,5	25	1,1	1,02
1	-1	-1	-1	-1	1	4	5	15	0,36	0,39
9	-1	-1	-1	1	1	4	5	35	0,86	0,88
5	-1	-1	1	-1	1	4	10	15	0,37	0,4
13	-1	-1	1	1	1	4	10	35	0,86	0,88
3	-1	1	-1	-1	1	6	5	15	0,36	0,4
11	-1	1	-1	1	1	6	5	35	0,86	0,88
7	-1	1	1	-1	1	6	10	15	0,36	0,4
15	-1	1	1	1	1	6	10	35	0,86	0,88
19	0	-2	0	0	1,5	3	7,5	25	0,41	0,39
21	0	0	-2	0	1,5	5	2,5	25	0,41	0,39
23	0	0	0	-2	1,5	5	7,5	5	0,08	0,04
27	0	0	0	0	1,5	5	7,5	25	0,41	0,41
28	0	0	0	0	1,5	5	7,5	25	0,41	0,41
30	0	0	0	0	1,5	5	7,5	25	0,41	0,41
29	0	0	0	0	1,5	5	7,5	25	0,41	0,41
25	0	0	0	0	1,5	5	7,5	25	0,41	0,41
26	0	0	0	0	1,5	5	7,5	25	0,41	0,41
24	0	0	0	2	1,5	5	7,5	45	0,74	0,75

...(continuação)

RUN	NÍVEIS DE CÓDIGO				VARIÁVEIS INDEPENDENTES				RESPOSTA Q (mg g ⁻¹)	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	m (g)	pH	t (h)	Ci (mg L ⁻¹)	REAL	PREVISTO
22	0	0	2	0	1,5	5	12,5	25	0,41	0,39
20	0	2	0	0	1,5	7	7,5	25	0,41	0,4
2	1	-1	-1	-1	2	4	5	15	0,18	0,18
10	1	-1	-1	1	2	4	5	35	0,43	0,41
6	1	-1	1	-1	2	4	10	15	0,18	0,18
14	1	-1	1	1	2	4	10	35	0,43	0,41
4	1	1	-1	-1	2	6	5	15	0,18	0,18
12	1	1	-1	1	2	6	5	35	0,43	0,41
8	1	1	1	-1	2	6	10	15	0,18	0,18
16	1	1	1	1	2	6	10	35	0,43	0,41
18	2	0	0	0	2,5	5	7,5	25	0,27	0,33

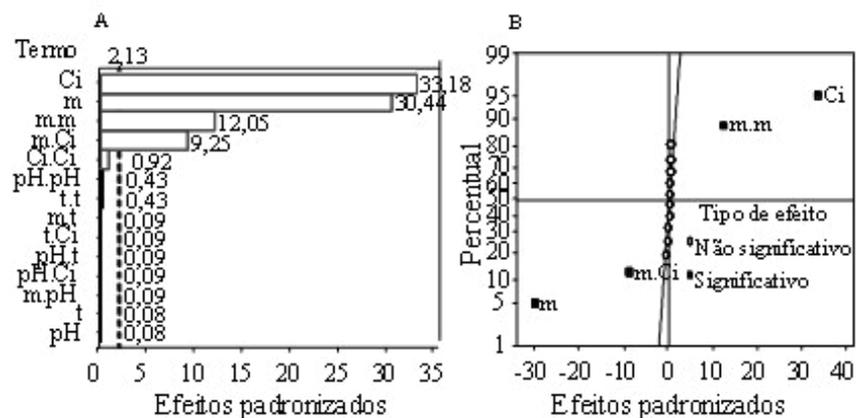
X₁ = massa de biocarvão de cama de aviário, X₂ = pH da solução inicial, X₃ = tempo de agitação X₄ = concentração da solução de Cd²⁺, m = massa, t = tempo, Ci = concentração inicial. Os níveis codificados: +2, -2, +1, -1 e 0 correspondem aos valores das variáveis independentes, conforme as expressões: Xmax; Xmin; [(Xmax + Xmin)/2] + [(Xmax-Xmin)/4]; [(Xmax + Xmin)/2] - [(Xmax-Xmin)/4] e (Xmax + Xmin)/2, respectivamente. X é o valor da variável independente. Elaborado pelos autores.

A escolha dos fatores que influenciaram significativamente a adsorção de Cd²⁺ foi baseada no gráfico de Pareto e na probabilidade normal de efeitos padronizados. Analisando a Figura 1A, pode-se observar que todos os efeitos padronizados que apresentaram valores maiores que 2,13 (p = 0,05), que estão localizados à direita da linha tracejada, foram significativos. Os fatores cujos efeitos foram menores que 2,12 não influenciaram significativamente a adsorção de Cd²⁺. Valores absolutos padronizados para os efeitos de cada fator e interações aparecem à direita de cada barra. A Figura 1B refere-se à curva de distribuição de probabilidade normalizada para efeitos padronizados. Todos os fatores e interações que foram representados por marcadores quadrados

foram significativos e estes estão localizados fora da linha central que cruza o valor zero na abcissa, com 50% de probabilidade. Os efeitos posicionados nessa linha foram representados por um marcador circular e correspondem à estimativa dos erros dos efeitos, não sendo significativos (Ci.Ci, pH.pH, tt, mt, t.Ci, pH.t, pH. Ci, m.pH, t e pH). Ainda assim, com base na Figura 1, pode-se inferir que os fatores mais importantes no processo de adsorção de Cd²⁺ pelo biocarvão da cama de aviário foram: Ci>m>mm>m.Ci.

Definidos os efeitos isolados e de interação que influenciaram a adsorção de Cd²⁺ pelo biocarvão, foi realizado o quadro de análise de variância (ANOVA), considerando os seguintes efeitos: Ci, m, m², Ci² e m.Ci, conforme mostrado na Tabela 2. Embora o efeito Ci² não tenha sido significativo, ele foi incluído na ANOVA para avaliar a significância estatística do modelo quadrático completo, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Figura 1 - Gráfico de Pareto (A) e probabilidade normal (B) dos efeitos padronizados para a resposta q (mg g⁻¹) em p = 0,05



Elaborado pelos autores.

Tabela 2 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento composto central para o modelo quadrático completo previsto para adsorção de Cd²⁺, usando biochar de cama de aviário

FONTE DE VARIÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS (AJ.)	QUADRADO MÉDIO (AJ.)	VALOR F	PROB > F
Modelo	5	1,62627	0,325254	708,94	0,000
m	1	0,66334	0,663337	1445,84	0,000
Ci	1	0,78844	0,788437	1718,52	0,000
m*m	1	0,10973	0,109727	239,17	0,000
Ci*Ci	1	0,00049	0,000488	1,06	0,313
m*Ci	1	0,06126	0,061256	133,52	0,000
Residual	24	0,01101	0,000459		
Falta de ajuste	19	0,01101	0,000580		
Erro puro	5	0,00000	0,000000		
Total	29	1,63728			

Desvio padrão = 0,021; R² = 0,99, R² ajustado = 0,99; R² previsto = 0,97.

Elaborado pelos autores.

A significância dos coeficientes foi determinada considerando um valor de P < 0,05. Conforme discutido anteriormente, apenas o efeito Ci² não foi significativo.

Ainda em relação à Tabela 2, pode-se observar que o modelo quadrático gerado, seus coeficientes lineares e quadráticos e sua interação foram significativos.

A quantidade de Cd²⁺ adsorvida pelo biocarvão (q) pode ser determinada pela Equação 4:

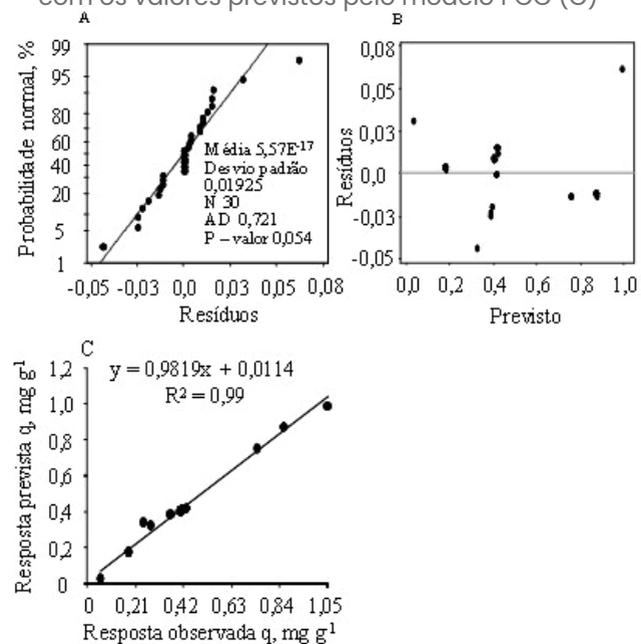
$$q \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = 0,5203 - 0,7684m + 0,03876Ci + 0,2484m^2 - 0,000041Ci^2 - 0,01238m.Ci \quad (4)$$

A adequação do modelo também foi confirmada pelo valor de F (708,94) com valor de P < 0,05 e pela análise dos resíduos (diferença entre os valores de resposta observados e previstos). Essa análise identifica outliers (ponto fora da curva) e examina gráficos de diag-

nóstico, como probabilidade normal e gráficos residuais. O gráfico da probabilidade normal do resíduo é ilustrado na Figura 2A.

A tendência da curva revela que não há alteração na resposta e nenhum grande problema com a normalidade, o que também foi confirmado pelo teste de Anderson-Darling (AD), que apresentou valor P de 0,054. A Figura 2B representa o valor residual versus os valores previstos para adsorção de Cd^{2+} . Os pontos no gráfico são espalhados aleatoriamente com uma faixa constante de resíduos, demonstrando que a variância das observações originais é constante. Isso também indica que não há requisitos para transformações dos dados observados.

Figura 2 - Gráficos de probabilidade normal para eficiência de adsorção de Cd^{2+} (A), valores residuais vs. previstos para adsorção de Cd^{2+} (B) e comparação dos resultados reais de adsorção de Cd^{2+} com os valores previstos pelo modelo PCC (C)



Elaborado pelos autores.

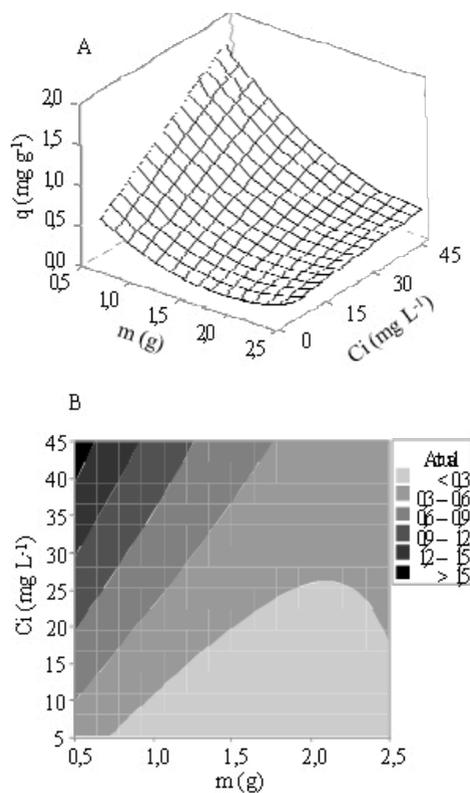
A eficiência de ajuste do modelo foi testada comparando-se os valores reais com as respostas previstas pelo modelo para adsorção de Cd^{2+} por meio do coeficiente de correlação múltipla (R^2), cujo valor correspondeu a 0,9982 (Figura 2C). Esse valor sugere que a regressão é estatisticamente significativa e apenas 1,2% das variações totais não são explicadas pelo modelo. A regressão da superfície de resposta, considerando os fatores massa do adsorvente (m) e concentração inicial de Cd^{2+} (C_i), mostrou um valor de R^2 predito (0,97) próximo ao R^2 ajustado (0,99), indicando que o modelo é altamente significativo.

A metodologia de superfície de resposta foi utilizada para avaliar o efeito isolado e combinado dos fatores massa adsorvente (m) e concentração inicial de Cd^{2+} na adsorção deste metal. A partir dos resultados da ANOVA, os efeitos dos fatores m e C_i em termos de superfície de resposta tridimensional e contorno são representados nas Figuras 3A e 3B, respectivamente. O modelo de resposta é representado pela Equação 4.

De acordo com o maior valor de F (1718,52), a concentração inicial de Cd^{2+} (C_i) teve a maior influência no processo de adsorção de Cd^{2+} (Tabela 2). Analisando a Figura 3A, observa-se uma tendência de aumento da adsorção de Cd^{2+} com o aumento do C_i e a diminuição com o aumento da massa adsorvente do biocarvão (m). Este resultado mostra que as concentrações de cádmio utilizadas neste estudo não foram suficientes para saturar completamente os sítios de ligação. O efeito negativo do fator “ m ” na adsorção de Cd^{2+} provavelmente se deve à formação de agregados, diminuindo os sítios de ligação com o aumento da massa de biocarvão. A maior adsorção do íon metálico pelo biocarvão ocorreu nas maiores concentrações iniciais de Cd^{2+} independente da faixa m (Figura 3B), confirmando os dados da Figura 3A. Assim, a con-

dição operacional ótima foi encontrada na concentração inicial de íons metálicos de 45,0 mg L⁻¹ e massa do adsorvente igual a 0,5 g, o que correspondeu a uma adsorção máxima de 1,59 mg g⁻¹ do metal estudado. Esse resultado é superior ao verificado por Boni *et al.* (2018), cuja capacidade máxima de Cd⁺² foi de 0,8 mg g⁻¹ usando carvão vegetal.

Figura 3 – Superfície de resposta para adsorção de Cd²⁺ (q) versus massa do adsorvente (m) e concentração inicial de Cd²⁺ (Ci) (A) e curvas de contorno para q (mg g⁻¹) em função de m versus Ci (B)



Elaborado pelos autores.

De acordo com o exposto, a adsorção de Cd²⁺ pelo biocarvão da cama de aviário foi estudada e as condições ótimas foram identificadas usando a metodologia de superfície de resposta, envolvendo planejamento composto central. Entre os fatores estudados, apenas a concentração inicial (Ci) e a massa do adsorvente (m) foram significativos no processo de adsorção. As condições ideais para máxima adsorção de íons metálicos foram alcançadas combinando-se 45,0 mg L⁻¹ de cádmio na solução inicial com 0,5 g do adsorvente.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, p. 49-55, 1990.
- ARIAS, M.; PÉREZ-NOVO, C.; OSORIO, F.; LOPEZ, E.; SOTO, B. Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer of acid soils. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 288, p. 21-29, 2005.
- BABEL, S.; KURNIAWAN, T. A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 97, p. 219-243, 2003.
- BONI, M. R.; CHIAVOLA, A.; ANTONUCCI, A.; MATTIA, E. D. I.; MARZEDDU, S. A novel treatment for Cd-contaminated solution through

adsorption on beech charcoal: the effect of bioactivation. **Desalination and Water Treatment**, v. 127, p. 104-110, 2018.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I - Trabalhos de laboratório. **Ceres**, Viçosa, MG, v. 19, p. 124-136, 1972.

CHEN, X.; CHEN, G.; CHEN, L.; CHEN, Y.; LEHMANN, J.; MCBRIDE, M. B.; HAY, A. G. Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. **Bioresouce Technology**, v. 102, p. 8877-8884, 2011.

DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Isotermas de adsorção de cádmio em solos ácidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 5, p. 229-234, 2001.

FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B.; TITO, G. A. Soil chemical amendments and the macronutrients mobility evaluation in Oxisol treated with biochar. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, p. 238-247, 2018.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, p. 2-10, 2010.

GEETHAKARTHI, A.; PHANIKUMAR, B. R. Adsorption of reactive dyes from aqueous solutions by tannery sludge developed activa-

ted carbono: Kinetic and equilibrium studies. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 8, p. 561-570, 2011.

GHAEDI, M.; HASSANZADEH, A.; KOKHDAN, S. N. Multiwalled carbon nanotubes as adsorbents for the kinetic and equilibrium study of the removal of alizarin red s and morin. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 56, p. 2511-2520, 2011.

JAWAD, A. H.; RASHID, R. A.; MAHMUOD, R. M. A.; ISHAK, M. A. M.; KASIM, N. N.; ISMAIL, K. Adsorption of methylene blue onto coconut (*Cocos nucifera*) leaf: optimization, isotherm and kinetic studies. **Desalination and Water Treatment**, v. 3, p. 1-15, 2015.

JUNG, K. W.; HWANG, M. J.; AHN, K. H.; OK, Y. S. Kinetic study on phosphate removal from aqueous solution by biochar derived from peanut shell as renewable adsorptive media. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 12, p. 3363-3372, 2015.

KIM, K.; KIM, K.; ASAOKA, S.; LEE, IN-C.; KIM, D. S.; HAYAKAWAD, S. Quantitative measurement on removal mechanisms of phosphate by class-F fly ash. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 38, p. 1-12, 2018.

LACIN, O.; BAYRAK, B.; KORKUT, O.; SAYAN, E. Modeling of adsorption and ultrasonic desorption of cadmium (II) and zinc (II) on local bentonite. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 292, p. 330-335, 2005.

LAGERGREN, S. To the theory of so-called adsorption dissolved substances. **The Royal Swedish Academy Science**, v. 24, p. 1-39, 1898.

LIMA, W. B.; FERNANDES, J. D.; GHAVES, L. H. G.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B. Adsorption of zinc in Ultisol and Entisol amended with poultry litter biochar. **World Applied Sciences Journal**, v. 35, n. 1, p. 142-150, 2017.

MARTINEZ, M. J.; ESPANA, J. C.; DIAZ, J. D. J. Effect of Eucalyptus globulus biochar addition on the availability of phosphorus in acidic soil. **Agronomía Colombiana**, Bogotá, v. 35, p. 75-81, 2017.

MELO, L. C. A.; PUGA, A. P.; COSCIONE, A. R.; BEESLEY, L.; ABREU, C. A.; CAMARGO, O. A. Sorption and desorption of cadmium and zinc in two tropical soils amended with sugarcane-straw-derived biochar. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, p. 226-234, 2015.

MORADI, M.; HEMATI, L.; MEGHDAD, P.; SHARAFI, K. Removal of Hexavalent Chromium from aqueous solution by powdered scoria -equilibrium isotherms and kinetic studies. **World Applied Sciences Journal**, v. 33, p. 393-400, 2015.

NAMGAY, T.; SINGH, B.; SINGH, B.P. Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb and Zn to maize (*Zea mays* L.). **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, p. 638-647, 2010.

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F. Correlação entre características de latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 965-971, 2004.

NOVAIS, S. V.; ZENERO, M. D. O.; TRONTO, J.; CONZ, R. F.; CERRI, C. E. P. Poultry manure and sugarcane straw biochars modified with MgCl₂ for phosphorus adsorption. **Journal of Environmental Management**, v. 214, p. 36-44, 2018.

OFOMAJA, A. E.; NAIDOO, E. B.; MODISE, S. J. Dynamic studies and pseudo-second order modeling of copper (II) biosorption onto pine cone powder. **Desalination**, v. 251, p. 112-122, 2010.

PAUL, A. Modeling of Phosphorus Removal in a Subsurface Wetland System: Emerging Trends in Engineering and Technology 2013. 4th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (IETET 2013). **Advance in Engineering and Technology**, v. 3, p. 20-25, 2013.

SAFFARI, M. Response surface methodological approach for optimizing the removal of cadmium from aqueous solutions using pistachio residues biochar supported/non-supported by nano scale zero-valent iron. **Main Group Metal Chemistry**, v. 41, p. 167-181, 2018.

SANCHEZ, A. G.; AYUSO, E. A.; BLAS, O. J. Sorption of heavy metals from industrial waste by low-cost mineral silicates. **Clay Minerals**, v. 34, p. 469-477, 1999.

SANVONG, C.; SUPPADIT, T. The Characteristic of pelleted broiler litter biochar derived from pilot scale pyrolysis reactor and 200-liter-oil-drum kiln. **Journal of Energy Technologies and Policy**, v. 3, n. 10, p. 34-38, 2013.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. Parâmetros termodinâmicos da reação de adsorção de boro em solos altamente intemperizados. **Química Nova**, São Paulo, SP, v. 28, p. 1014-1022, 2005.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 234p.

TAN, X.; LIU, Y.; GU, Y.; ZENG, G.; WANG, X.; HU, X.; SUN, Z.; YANG, Z. Immobilization of Cd(II) in acid soil amended with different biochars with a long term of incubation. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 12597-12604, 2015.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FORTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2011.

YAACOUBI, H.; ZIDANI, O.; MOUFLIH, M.; GOURAI, M.; SEBTI, S. Removal of Cadmium from water using Natural phosphate as Adsorbent. **Procedia Engineering**, v. 83, p. 386-393, 2014.

WANG, S.; KONG, L.; LONG, J.; SU, M.; DIAO, Z.; CHANG, X.; CHEN, D.; SONG, G.; SHIH, K. Adsorption of phosphorus by calcium-flour bio-

char: Isotherm, kinetic and transformation studies. **Chemosphere**, v. 195, p. 666- 672, 2018.

ZHANG, L.; DU, C.; DU, Y.; XU, M.; CHEN, S.; LIU, H. Kinetic and isotherms studies of phosphorus adsorption onto natural riparian wetland sediment: linear and non-linear methods. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, p. 371-381, 2015.

CAPÍTULO 6

Biocarvão nas mudas de meloeiro e mamoeiro

Laysa Gabryella de Souza Laurentino

Jean Pereira Guimarães

Antônio Ramos Cavalcante

Lúcia Helena Garófalo Chaves

Edilma Rodrigues Bento Dantas

Josely Dantas Fernandes

A produção de mudas de alta qualidade para fins agrícolas ou de recuperação florestal constitui uma das etapas primordiais do sistema produtivo. Para isso, faz-se necessária a inserção de boas técnicas na sua formação, começando pela escolha de um substrato com boa qualidade. Normalmente, o processo de formação de mudas é oneroso devido à necessidade do uso de substratos comerciais. Entretanto, para minimizar os custos da produção de mudas, têm sido utilizados para a composição de substratos orgânicos materiais alternativos, como resíduos agrícolas, os quais são abundantes, de baixo custo e provenientes da reciclagem; além de condicionar a produção de mudas, esses resíduos contribuem para a preservação do meio ambiente (Silva *et al.*, 2019).

Segundo Terra *et al.* (2011), a composição desses substratos deve ser uniforme, com baixa densidade, apresentar elevada retenção de água e CTC, boa aeração e drenagem, e reduzir o uso

de insumos, a fim de proporcionar condições favoráveis para o desenvolvimento das mudas.

Atualmente, uma opção alternativa de substrato a ser utilizado na produção de mudas tem sido o biocarvão, um produto carbonáceo produzido através do tratamento térmico da matéria orgânica, denominado processo de pirólise. Segundo Barros *et al.* (2017), o biocarvão possui propriedades a serem aplicadas ao solo como componente dos meios de cultivo para a produção de mudas, uma vez que é um material leve, que possui estrutura porosa, reativa e propriedades físicas e propriedades hidráulicas. Os meios de cultivo para a produção de mudas devem ser de baixa densidade e exibir boa capacidade de retenção de água.

O efeito do biocarvão como substrato para a produção de mudas vem sendo relatado em diversas culturas, como biocarvão de madeira de borracha como substrato no crescimento de mudas de *Hevea brasiliensis* (Dharmakeerthi *et al.*, 2012); biocarvão de casca de árvores no crescimento de mudas de alface, repolho e pimentão (Hong *et al.*, 2020); biocarvão proveniente de resíduos de folhas de palmeira de dendê no cultivo de mudas de eucalipto (Rodrigues *et al.*, 2016); biocarvão ativado, proveniente de serragem de madeira de florestas nativas no crescimento de mudas de maracujá (Barros *et al.*, 2017); e biocarvão produzido a partir de espécies vegetais nativas no cultivo de mudas de rúcula (Crispim *et al.*, 2020). No entanto, são poucas as pesquisas em relação ao efeito de biocarvão proveniente de cama de aviário na formação de mudas de frutíferas e hortaliças.

Devido à alta estabilidade da estrutura do biocarvão, com sua decomposição mais lenta, a disponibilidade dos elementos químicos pode não ter um efeito imediato no solo e sim ocorrer

ao longo do tempo, ou seja, o efeito residual vai melhorando as características físico-químicas dos solos.

Mas há poucos trabalhos na literatura a esse respeito, ou seja, sobre o efeito residual do biocarvão no solo e, conseqüentemente, na produção das culturas. Segundo Santos *et al.* (2010), o efeito residual da adubação anterior na produtividade das culturas, principalmente com os adubos orgânicos, é um aspecto importante, uma vez que o custo e a baixa disponibilidade de adubos não permitem a fertilização anual dos solos.

Neste capítulo, são apresentados estudos de caso em relação ao uso de biocarvão de cama de aviário na emergência de sementes de melão (*Cucumis melo* L.) e de mamão (*Carica papaya* L.), no desenvolvimento e fitomassa das mudas dessas culturas e os efeitos residuais do biocarvão no desenvolvimento dessas mudas no segundo ciclo das culturas.

■ ESTUDO DE CASO 1

Influência de biocarvão na emergência de sementes de melão em dois ciclos. (Laurentino *et al.*, 2021)¹

Para avaliar o efeito do biocarvão de cama de aviário na emergência de sementes de duas variedades de melão, em dois ciclos de cultura, sendo que, no segundo ciclo, será avaliado o efeito residual do biocarvão, foram conduzidos experimentos em am-

1 . LAURENTINO, L. G. S.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; SOUZA, F. G. Influência de biocarvão na emergência de sementes de melão. In: FRANCISCO, P. R. M.; FURTADO, D. A.; FERREIRA, A. C. (Orgs.). **Engenharia, Agronomia e Geociência**. 1. ed. Campina Grande: Eptec, 2021. p. 26-36.

biente protegido da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, pertencente à UFCC. Amostras de solo caracterizadas química e fisicamente, segundo Teixeira *et al.* (2017), apresentaram os seguintes atributos: pH (H₂O) = 5,75; CEes = 0,16 dS m⁻¹; Ca = 1,56 cmolc kg⁻¹; Mg = 1,18 cmolc kg⁻¹; Na = 0,06 cmolc kg⁻¹; K = 0,26 cmolc kg⁻¹; H = 1,27 cmolc kg⁻¹; matéria orgânica = 14,8 g kg⁻¹; P = 4,9 mg kg⁻¹; argila = 158,5; silte = 120,7; e areia = 720,8 g kg⁻¹.

O biocarvão utilizado foi produzido ao longo de um processo de pirólise de cama de aviário a uma temperatura de 450°C, na ausência de oxigênio. Após a produção, as amostras de biocarvão foram analisadas quimicamente de acordo com o *Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos* (Brasil, 2014). Conforme essas análises, o biocarvão utilizado apresentou a seguinte composição: pH (H₂O) = 9,45; N = 3,45%; P = 7,78%; K = 4,90%; Ca = 6,83%; Mg = 1,34%; S = 0,76%; Fe = 0,46%; Cu = 0,04%; Zn = 0,08%; Mn = 0,09%; B = 0,01%; carbono orgânico = 39,77%; matéria orgânica = 68,56%; C/N = 11,53%; e CTC = 388,90 mmolc/kg.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 x 2, referente a seis doses de biocarvão (D0 = 0, D4 = 4, D8 = 8, D12 = 12, D16 = 16 e D20 = 20 t ha⁻¹, correspondentes a 0, 10, 20, 30, 40 e 50 g de biocarvão por quilo de solo) e duas variedades de melão, com 4 repetições.

Para montagem das unidades experimentais, constituídas por sacos plásticos de polietileno (15 x 28 cm) com furos para a drenagem de água, foi realizada a uniformização da granulometria de todo o material (solo, vermiculita e biocarvão) por peneiramento com malha de 2mm para separar o material grosseiro remanescente. As unidades foram instaladas a partir da mistura

de solo e vermiculita na proporção 10:1 (1.100g de solo: 110 g de vermiculita), acrescentadas pelas doses de biocarvão e deixadas em incubação por um período de 90 dias, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo. Após esse período, a semeadura do meloeiro (*Cucumis Melo* L.), considerando duas variedades, Amarelo e Hales Best Jumbo, foi realizada colocando-se, em cada unidade experimental, quatro sementes distribuídas equidistantemente na profundidade de 2 cm do solo.

Devido ao interesse em verificar a emergência das sementes de meloeiro sob influência de doses de biocarvão residual, após a colheita e as avaliações do primeiro cultivo, foi realizado um segundo plantio da cultura. O delineamento utilizado foi o mesmo do primeiro cultivo, assim como todo o manejo dado à cultura.

Os dois cultivos foram acompanhados diariamente para verificação da emergência, a partir do dia em que a primeira plântula emergiu, contando-se diariamente o número de plântulas até o momento da estabilização da emergência. Os dados do número de plântulas emergidas foram empregados na obtenção da porcentagem de plântulas emergidas (PE) (Equação 1), de acordo com a equação elaborada por Labouriau e Valadares (1976); e do índice de velocidade da emergência de plântulas (IVE), que foi determinado pela soma do número de plântulas normais que emergiram diariamente, dividido pelo número de dias decorridos entre a semeadura e a emergência (Equação 2), de acordo com a fórmula de Maguire (1962).

$$PE(\%) = \left(\frac{N}{N_s} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde PE = porcentagem de emergência; N = número total de plântulas emergidas; Ns = número total de sementes semeadas.

$$IVE = \frac{N1}{D1} + \frac{N2}{D2} + \dots + \frac{Nn}{Dn} \quad (2)$$

Onde IVE = Índice de velocidade de emergência; N = número de sementes emergidas e computadas da primeira à última contagem; D = número de dias da semeadura da primeira à última contagem.

Para as variáveis analisadas, os resultados obtidos foram submetidos ao teste de homogeneidade (Cochran e Bartlett) e ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Quando verificado efeito significativo, utilizou-se análise de regressão polinomial para doses de biocarvão pelo teste de T-student ($p < 0,05$), com o auxílio do aplicativo computacional SISVAR (Ferreira, 2011).

Conforme a análise, observou-se que os fatores doses de biocarvão e doses de biocarvão residual (segundo ciclo da cultura) e variedades de meloeiro foram significativos isoladamente para índice de velocidade de emergência (IVE). Os dados para a porcentagem de emergência das plântulas não seguiram as pressuposições dos testes para serem submetidos à ANOVA, portanto as médias foram comparadas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011). No entanto, não apresentaram respostas significativas. Provavelmente, em solos com alta fertilidade, a adição de biocarvão ao solo não interfere na germinação ou, segundo Rogovska *et al.* (2011), suspeita-se que a pirólise do biocarvão produzido em alta temperatura aumenta a quantidade

ou disponibilidade de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos no biocarvão, os quais têm consequências ambientais e agronômicas negativas.

A emergência das sementes de meloeiro no primeiro ciclo, com menos de quinze dias, em função do biocarvão, é apresentada na Figura 1.

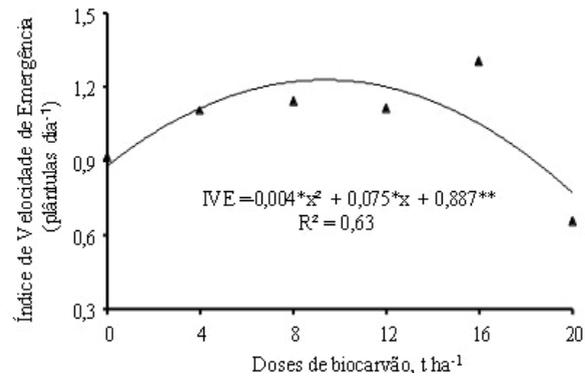
Figura 1 - Emergência de sementes de meloeiro no primeiro ciclo



Elaborado pelos autores.

Para o IVE, as doses de biocarvão proporcionaram um modelo quadrático cujo ponto de máximo estimado foi de 1,24 plântulas/dia, com a dose de 9,38 t ha⁻¹ de biocarvão, a qual possibilita uma emergência antecipada, em comparação com as demais doses testadas, o que é vantajoso sob o ponto de vista técnico. A variável atingiu valores inferiores quando as plântulas foram submetidas à dose de 20 t ha⁻¹, com IVE estimado em 0,787 plântulas/dia, sendo observada uma redução de 11,27% entre a menor e a maior dose de biocarvão aplicada ao solo (Figura 2).

Figura 2 – Índice de velocidade de emergência em função do efeito isolado de dose de biocarvão



Elaborado pelos autores.

A emergência das sementes de meloeiro no segundo ciclo, com menos de quinze dias, em função do biocarvão residual, é apresentada na Figura 3.

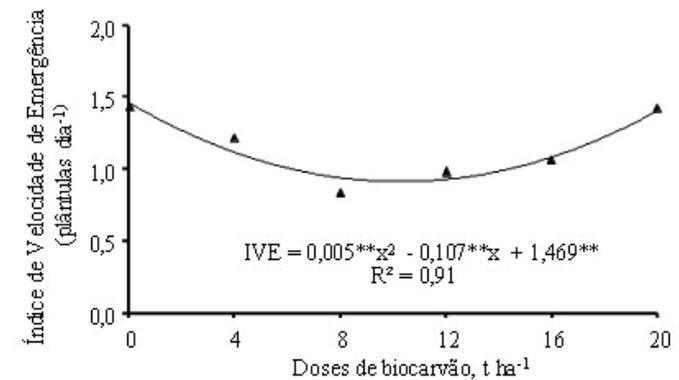
Figura 3 – Emergência de sementes de meloeiro no segundo ciclo



Elaborado pelos autores.

O vigor das sementes durante o segundo ciclo da cultura, representado pelo índice de velocidade de emergência (IVE), teve os dados ajustados ao modelo polinomial quadrático com as doses de biocarvão, com valor máximo de 1,47 plântulas/dia no tratamento controle e 1,33 plântulas/dia na dose máxima, não apresentando diferença em relação a ambos os tratamentos (Figura 4).

Figura 4 – Índice de velocidade de emergência em função do efeito isolado de dose de biocarvão residual



Elaborado pelos autores.

Na comparação entre os dois cultivos, é possível observar aumento no IVE em determinadas doses, estando provavelmente associado ao efeito residual da adubação orgânica que foi adicionada em todos os tratamentos do presente estudo. Dessa forma, a utilização de composto orgânico não só supriu as plantas com quantidades consideráveis de nutrientes, mas contribuiu para a manutenção da fertilidade natural, processo este que envolve a mineralização da matéria orgânica por ação de microrganismos (Zárate; Vieira, 2018).

No entanto, é importante frisar que as variações nas taxas de emergência não são ocasionadas exclusivamente pelo efeito do substrato (tipo e doses aplicadas ao solo), que, no caso do presente estudo, é o biocarvão, uma vez que o processo germinativo das sementes ocorre através da combinação de vários outros fatores, como estado nutricional do solo, condições edafoclimáticas, temperatura, suprimento de água e oxigênio, vigor e qualidade do lote de sementes (Ferreira; Borghetti, 2004).

Com isso, pode-se concluir que o biocarvão de cama de aviário não afetou a porcentagem de emergência de sementes de melão; o índice de velocidade de emergência estimado, na primeira semeadura, foi 1,24 plântulas/dia com a dose de 9,4 t ha⁻¹ de biocarvão de cama de aviário; na segunda semeadura, com efeito do biocarvão residual, os índices de velocidade de emergência estimados foram maiores do que da primeira semeadura, variando de 1,47 plântulas/dia no tratamento controle e 1,33 plântulas/dia na dose máxima, 20 t ha⁻¹ de biocarvão de cama de aviário.

■ ESTUDO DE CASO 2

Influência de biocarvão na emergência de sementes de mamão em dois ciclos (Laurentino *et al.*, 2021)2

Como há poucos estudos relatando a influência do biocarvão tanto nos estágios iniciais do crescimento da planta como na emergência de sementes e crescimento de plântulas, o objetivo

2 . LAURENTINO, L. G. S.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; FERNANDES, J. D. Influência de biocarvão na germinação de sementes de mamão. In: CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2022, Goiânia/GO. *Anais* [...], 2022.

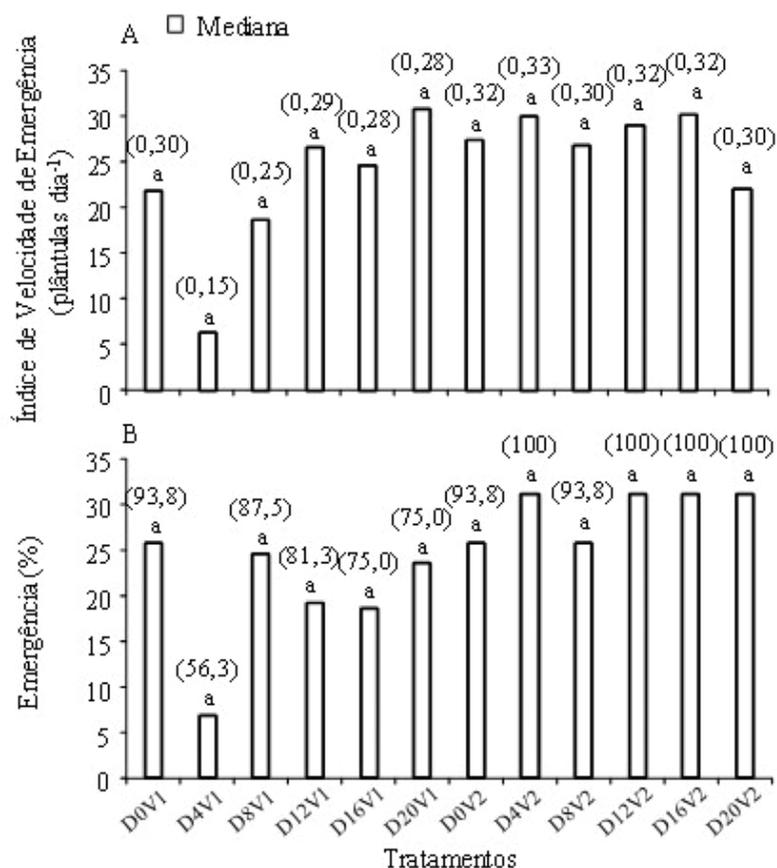
deste trabalho foi avaliar o efeito do biocarvão de cama de aviário na emergência de sementes de mamoeiro (*Carica papaya* L.), bem como seu efeito residual.

Para isso, foram instalados e conduzidos experimentos no mesmo ambiente e com as mesmas condições (caracterização de solo e biocarvão, tratamentos de biocarvão, doses de biocarvão, montagem das unidades experimentais), em que se realizaram os experimentos relatados no Estudo de Caso 1. No entanto, foram semeadas duas variedades de mamão, V1 = Formosa e V2 = Ouro, nas unidades experimentais. Da mesma forma, a emergência e a quantidade de dias até a emergência foram acompanhados diariamente. Com esses dados, foram estimados a porcentagem de emergência (E%) e o índice de velocidade de emergência (IVE), conforme as equações apresentadas no Estudo de Caso 1.

Após as avaliações do primeiro cultivo aos 90 dias após semeadura (DAS), visando a maiores informações acerca do efeito do biocarvão residual na emergência de sementes de mamão, foi realizado um segundo plantio da cultura seguindo o mesmo delineamento experimental utilizado para o primeiro cultivo.

Os resultados obtidos foram submetidos ao teste de homogeneidade (Cochran e Bartlett) e ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e, como não atenderam às pressuposições para serem submetidos à ANOVA, as médias foram comparadas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis. O software estatístico utilizado neste trabalho foi o Action 2.9. O índice de velocidade de emergência (Figura 1A) apresentou, independentemente do tratamento utilizado, valores de medianas estatisticamente semelhantes entre si.

Figura 1 – Índice de Velocidade de Emergência (A) e porcentagem de emergência (B) em função da combinação entre doses de biocarvão e variedades



Nota: Medianas seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, nível de significância ($\alpha=0,05$). Valores entre parênteses correspondem às médias observadas. Elaborado pelos autores.

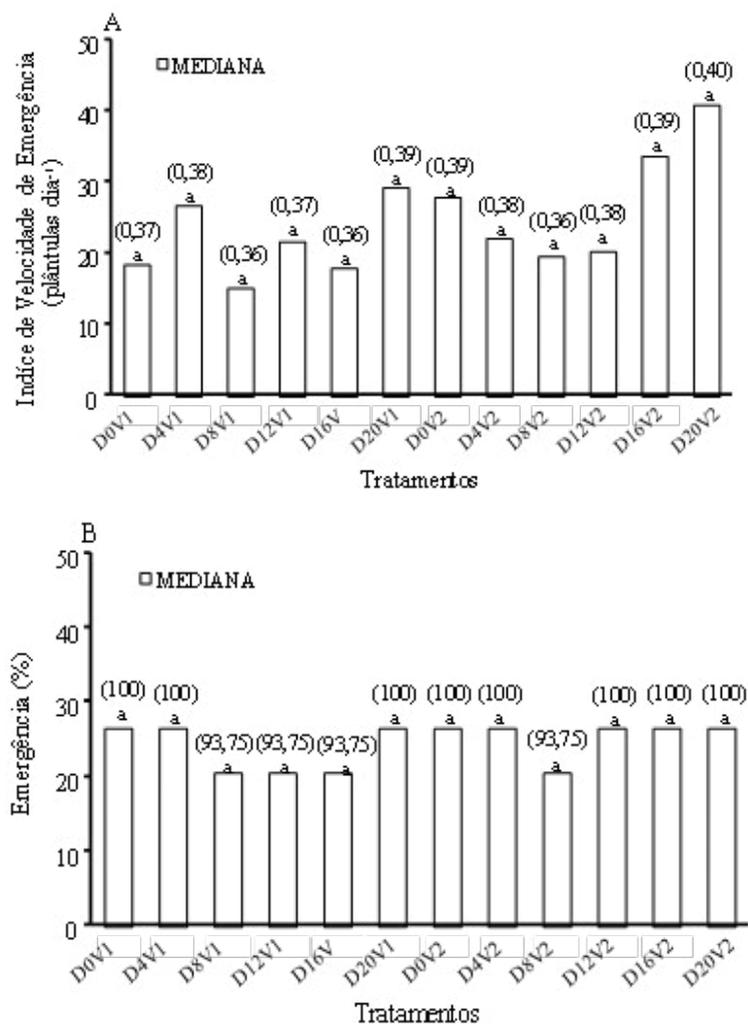
Mesmo não observando efeito significativo, verificou-se um IVE de 0,15 (média observada) para a variedade Formosa (V1) com a aplicação de 4 t ha⁻¹, valor este bem inferior se comparado às demais médias. Já para a variedade Ouro (V2), o IVE foi praticamente o mesmo, independentemente da dose aplicada. O mesmo comportamento também foi observado para a porcentagem de emergência das plântulas (Figura 1B), ou seja, suas medianas não variaram significativamente em função dos tratamentos.

Apesar do efeito não significativo, analisando os valores das médias observadas (valores entre parênteses), verifica-se que a emergência das sementes da variedade Formosa (V1) apresentou uma tendência em diminuir com o aumento das doses de biocarvão, sendo a dose de 4 t ha⁻¹ a que promoveu a menor média (56,3%). Já com a variedade Ouro (V2), mesmo com a utilização das maiores doses, isto é, 12, 16 e 20 t ha⁻¹, as sementes apresentaram um percentual de emergência de 100%. Tal resultado pode ser atribuído à viabilidade e ao vigor germinativo das sementes, corroborando Souchie *et al.* (2011).

Ao analisar o índice de velocidade de emergência e a porcentagem de emergência das plântulas de mamoeiro sob doses de biocarvão residual, os valores das medianas são estatisticamente semelhantes entre si, independentemente da dose de biocarvão incorporada ao solo (Figura 2A e 2B).

Para o IVE (Figura 2A), a variedade Ouro (V2) apresentou melhores resultados ao ser comparada com a variedade Formosa (V1), apesar do efeito não significativo.

Figura 2 - Índice de Velocidade de Emergência (A) e porcentagem de emergência (B) em função da combinação entre doses de biocarvão residual e variedades



Nota: Medianas seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, nível de significância ($\alpha = 0,05$). Valores entre parênteses correspondem às médias observadas. Elaborado pelos autores.

Ao analisar os valores das médias observadas (valores entre parênteses), o maior índice de velocidade de emergência para ambas as variedades foi encontrado na aplicação da maior dose de biocarvão (20 t ha⁻¹), com aumento de 92,3% para V1 ao comparar com a menor média encontrada nos tratamentos com 8 e 16 t ha⁻¹ (0,36); e 90,00% para V2 ao ser comparada a adubação com 8 t ha⁻¹ de biocarvão, o que proporcionou menor média observada (0,36), indicando, provavelmente, que houve contribuição deste produto na elevação do parâmetro.

A porcentagem de emergência das plântulas de mamoeiro em função de doses de biocarvão residual (Figura 2B) também apresentou medianas que não variaram significativamente em função dos tratamentos, bem como as demais variáveis analisadas neste trabalho.

Como a cama de aviário não influenciou significativamente as variáveis analisadas neste estudo, sua adição no substrato mostrou-se promissora, não prejudicando o processo de desenvolvimento das sementes de mamão. Além do mais, foi relatado por Laurentino *et al.* (2021) que a adição de biocarvão de cama de aviário promoveu o crescimento de mudas de mamoeiro, cujos melhores resultados foram obtidos com as doses de 8 e 12 t ha⁻¹. Ainda segundo os autores, o uso de biocarvão como constituinte do substrato constitui uma alternativa viável para o crescimento de mudas de mamão.

Em geral, pode-se dizer que o biocarvão de cama de aviário não afetou o índice de velocidade de emergência nem a porcentagem de emergência de sementes de mamão nos dois ciclos da cultura, mostrando-se promissor como substrato no desenvolvimento de mudas de mamão.

ESTUDO DE CASO 3

Biocarvão como condicionador de substrato no desenvolvimento e fitomassa de mudas de meloeiro

(Laurentino *et al.*, 2021a, 2021b)^{3,4}

O biocarvão tem surgido como uma alternativa para produção de mudas devido às suas características físicas e químicas favoráveis à sua utilização como substrato. O presente estudo objetivou avaliar a eficiência de doses de biocarvão de cama de aviário como condicionante de substrato para o desenvolvimento e o fitossoma das mudas de meloeiro (*Cucumis melo* L.). A instalação e a condução desses experimentos foram apresentados no Estudo de Caso 1.

Após a aplicação do biocarvão no solo e a incubação por 90 dias, através das análises das amostras de solo das unidades experimentais (Teixeira *et al.*, 2017), foi observado que as doses do biocarvão influenciaram significativamente as propriedades químicas do solo: pH, condutividade elétrica (CE), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), potássio (K), matéria orgânica (MO), carbono orgânico (C) e fósforo (P).

Os valores de pH do solo aumentaram de forma quadrática após a adição do biocarvão, em que o maior valor de pH foi 7,55 na dose de 17,18 t ha⁻¹, favorecendo um aumento de 25%. Esse

3 . LAURENTINO, L. G. S.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; SOUZA, F. G.; LIMA, W. B.; GUERRA, H. O. C. Biochar as substrate conditioner in the development of melon seedlings. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v. 27, n. 6, p. 1118-1126, 2021a.

4 . LAURENTINO, L. G. S.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; SOUZA, F. G.; LIMA, W. B.; GUERRA, H. O. C.; FERNANDES, J. D. Melon seedlings phytomass under poultry litter biochar doses. **Agricultural Sciences**, v. 12, p. 181-197, 2021b.

aumento no pH do solo já era esperado, visto que o pH do biocarvão da cama de aviário era de 9,45. Portanto, o biocarvão atua no solo como corretivo de acidez.

A condutividade elétrica (CE) do substrato aumentou linearmente, com o biocarvão atingindo um valor de 1,45 dS m⁻¹ para a dose de 20 t ha⁻¹. O aumento da CE do substrato com o biocarvão está relacionado com o aumento das bases trocáveis de cálcio, magnésio e sódio de potássio disponíveis no biocarvão, como será comentado depois. No presente estudo, os substratos que receberam mais de 10 t ha⁻¹ e apresentaram valores CE ao longo de 1 dS m⁻¹ prejudicaram o comportamento das mudas de melão.

O conteúdo de cátions trocáveis (potássio e sódio) aumentou com as concentrações de biocarvão de cama de aviário de forma quadrática e linear, respectivamente, o que está de acordo com estudos anteriores (Chan *et al.*, 2007; Fernandes *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2017; Tito *et al.*, 2020). As concentrações de potássio e sódio, 4,40 cmolc kg⁻¹ e 1,61 cmolc kg⁻¹, corresponderam à maior dose de biocarvão (20 t ha⁻¹), portanto, houve um aumento em torno de 1.492% e 160%, entre esses valores e o controle, respectivamente. A liberação desses elementos no solo influencia o crescimento das plantas, como ocorreu na presente pesquisa em relação ao desenvolvimento de mudas.

O fósforo disponível aumentou e a maior concentração correspondeu a 312,68 mg dm⁻³ com a dose de 13,26 t ha⁻¹, ou seja, houve aumento de 3.905% em relação ao controle. Esse aumento significativo é, provavelmente, devido à presença de fosfato de potássio na composição do biocarvão ou porque o biocarvão de cama de aviário no solo aumenta a colonização micorrízica e a disponibilidade de fósforo P no solo.

Com 15, 23 e 31 dias após a semeadura (DAS), o crescimento das mudas foi analisado conforme os parâmetros morfológicos: altura da muda (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e análise foliar (AF), determinada conforme metodologia proposta por Nascimento *et al.* (2002). De posse desses dados, foram determinados a taxa de crescimento absoluto em relação à altura da planta – TCAAp; o diâmetro caulinar – TCADc; o número de folhas – TCANf; e a área foliar – TCAAf, em função do tempo, calculadas de acordo com as Equações 1, 2, 3 e 4 (Benincasa, 2003):

$$\blacksquare \text{ TCAA}_p = \frac{Ap_2 - Ap_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

$$\blacksquare \text{ TCAD}_c = \frac{Dc_2 - Dc_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

$$\blacksquare \text{ TCAN}_f = \frac{Nf_2 - Nf_1}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

$$\blacksquare \text{ TCAA}_f = \frac{Af_2 - Af_1}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Onde TCAAp, TCADc, TCANf e TCAAf = taxas de crescimento absoluto da altura da planta, diâmetro caulinar, número de folhas e área foliar, respectivamente; Ap = altura da planta em dois tempos; Dc = diâmetro caulinar em dois tempos; Nf = número de folhas em dois tempos; Af = área foliar em dois tempos; T = tempo de cada período estudado.

Os resultados obtidos foram submetidos ao teste de homogeneidade (Cochran e Bartlett) e ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Com exceção de número de folhas, área foliar, altura da

planta – 15DAS, TCANf 23 – 31DAS e TCAAf 15 – 23DAS, aplicou-se a análise da variância pelo teste F a 1 e 5% de probabilidade para os demais parâmetros analisados. Quando verificado efeito significativo, foram utilizadas análise de regressão polinomial para doses de biocarvão e comparação entre médias para variedades pelo teste de T-student ($p < 0,05$). Para efeito de normalidade, os dados de TCAAp23-31 e TCANf15-23 foram transformados em $\frac{x^{1,388}-1}{1,388}$ e \sqrt{x} , respectivamente. Os dados de número de folhas, área foliar, altura da planta – 15DAS, TCANf 23 – 31DAS e TCAAf 15 – 23DAS não seguiram as pressuposições dos testes para serem submetidos à ANOVA, portanto as médias foram comparadas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011).

Conforme a análise da variância pelo teste F (ANOVA), as doses de biocarvão, as variedades e a interação doses vs. variedades influenciaram significativamente os parâmetros AP aos 23 e 31 DAS; os dados do AP aos 15 dias não seguiram os testes submetidos à ANOVA, portanto as médias foram comparadas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011); as TCAAP nos períodos de 15 a 23 e de 23 a 30 DAS foram influenciados significativamente pelas doses de biocarvão, no entanto, as variedades e a interação doses vs. variedades não influenciaram a TCAAP no período de 15 a 23 DAS.

Pela análise de variância, as doses de biocarvão influenciaram significativamente os diâmetros caulinares (DC) dos meloeiros avaliados aos 15, 23 e 31 DAS. As variedades influenciaram o DC aos 15 e 31 DAS e a interação doses vs. variedade somente influenciou aos 15 DAS. Em relação à TCADc, no período de 23 a 31 DAS, foi influenciada somente pelas variedades.

As médias do número de folhas das mudas dos meloeiros, V1 e V2, aos 15, 23 e 31 DAS, foram comparadas pela estatística não

paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011). Interessante observar que, na V1, o número de folhas aumentou em relação ao aumento das doses de biocarvão, tendendo a diminuir com as doses maiores. No caso da V2, este comportamento foi semelhante somente aos 15 DAS, sendo que, aos 23 e 31 DAS, os números de folhas, em geral, foram maiores com as doses maiores de biocarvão.

De modo geral, os números de folhas das mudas de meloeiro aos 31 DAS, independentemente dos tratamentos e das variedades, foram maiores do que os números observados por Ferreira *et al.* (2011), os quais variaram de 3,5 a 4,5, conforme os substratos orgânicos utilizados, sem haver diferença significativa entre eles. Praticamente não houve diferenças entre as médias da TCA do número de folhas no período de 23 a 31 DAS, apesar de que, aparentemente, estas taxas foram menores na V2 do que na V1.

As médias das áreas foliares das mudas dos meloeiros, V1 e V2, aos 15, 23 e 31 DAS, comparadas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011), em geral, aumentaram com as doses de biocarvão até certo ponto para diminuir com as maiores doses, com exceção da V2 aos 31 DAS.

As médias das taxas de crescimento absoluto das áreas foliares no período de 15 a 23 DAS das variedades V1 e V2 foram comparadas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011). Em geral, a V1 foi mais sensível em relação às doses de biocarvão, havendo uma diminuição na TCAaf nas maiores doses. Quanto à TCAaf dos 23 aos 31 DAS, influenciada significativamente pela interação das variedades de meloeiro (Amarelo e Jumbo) com as doses de biocarvão, foi ajustada em regressão quadrático dos dados, com a maior TCAaf de 38,10 e 39,73 cm² por dia nas doses de 11,43 e 19,47 t ha⁻¹ para as variedades Amarelo e Jumbo, respectivamente.

Em geral, doses de biocarvão na composição do substrato aumentaram o nível de salinidade no substrato (maior pH e maior condutividade elétrica). Nesse sentido, a dose de biocarvão acima de 8 t ha⁻¹ reduziu as variáveis de crescimento analisadas, provavelmente pelo efeito deletério do aumento do pH e da CE. Com a dose de 12 t ha⁻¹ de biocarvão, os valores de pH e da CE da mistura solo + vermiculita + biocarvão corresponderam a 7,46 e 1,00 dS m⁻¹, respectivamente, tendo aumentado a respeito do aumento das doses. Conforme Ayers e Westcot (1991), substratos com CE acima de 1 dS m⁻¹ (valor limitante) prejudicam o crescimento da maioria das plantas sensíveis a salinidade.

O biocarvão utilizado no presente trabalho, proveniente de cama de aviário, também apresenta elevado teor de fósforo na sua composição, o que provavelmente influenciou as variáveis de crescimento das mudas de meloeiro.

Entretanto, conforme as observações anteriores a respeito do comportamento da V2 em relação às doses maiores de biocarvão, pode-se inferir que ela é mais tolerante a salinidade do que a V1.

Assim, o uso de doses de biocarvão na composição do substrato na formação de mudas de meloeiro favoreceu o crescimento inicial, proporcionando acréscimo nas variáveis de crescimento até a dose 8 t ha⁻¹.

A variedade Hales Best Jumbo foi a que apresentou melhor desenvolvimento nas condições estudadas com adubação de biocarvão.

Em seguida, depois das análises do desenvolvimento das mudas, estas foram coletadas avaliando-se a fitomassa fresca da folha (FFF), do caule (FFC), da parte aérea da planta (FFPA), da raiz (FFR) e a fitomassa total (FFT). Também foram avaliadas a fitomassa seca da folha (FSF), do caule (FSC), da parte aérea da

planta (FSPA), da raiz (FSR) e a fitomassa total (FST). Por fim, foram avaliados o comprimento da raiz e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD).

A fitomassa fresca foi determinada seccionando as plantas em folhas, caule e raízes, e pesada em balança analítica. As raízes foram cuidadosamente retiradas, lavadas e medidas seu comprimento. Já a fitomassa seca foi determinada lavando-se o material vegetal fresco colhido com água deionizada e seco em estufa, com ventilação forçada a 65 °C, até atingir peso constante.

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD), que considera o equilíbrio da distribuição da biomassa na planta, pondera os resultados de vários parâmetros importantes empregados para avaliação da qualidade da muda: os parâmetros morfológicos de altura, diâmetro e biomassas (Medeiros *et al.*, 2018) foi obtido por meio da Equação 1 (Dickson *et al.*, 1960):

$$IQD = \frac{FST}{\frac{AP}{DC} + \frac{FSPA}{FSR}} \quad (1)$$

Em que IQD = Índice de Qualidade de Dickson; FST = fitomassa seca total (g planta⁻¹); FSPA = fitomassa seca da parte aérea (g planta⁻¹); FSR = fitomassa seca de raiz (g planta⁻¹); AP = altura da parte aérea (cm); DC = diâmetro do colo (mm).

Os resultados obtidos foram submetidos à homogeneidade (Cochran e Bartlett) e ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Com exceção do comprimento da raiz e da fitomassa seca da parte aérea, os demais parâmetros foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 1 e 5% de probabilidade. Quando havia efeito significativo para estes, a análise de regressão polinomial foi usada para as doses de biocarvão. A comparação entre variedades de meloeiro foi realizada por meio do teste T-student (p <0,05).

Para efeito de normalidade, as variáveis FFF, FSE, FSR e FST foram transformadas em $\frac{x^{1,7929}-1}{1,7929}$; $\frac{x^{0,9848}-1}{0,9848}$; \sqrt{x} e $\frac{x^{0,3787}-1}{0,3787}$, respectivamente. Os dados de comprimento de raiz (CR) e fitomassa seca da parte aérea (FSPA) que não atingiram os requisitos de normalidade para os testes ANOVA foram analisados utilizando o método estatístico não paramétrico de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011).

As análises de variância para a fitomassa fresca da folha (FFF) para o caule (FFC), para a parte aérea da planta (FFPA) e para a fitomassa fresca total (FFT) da variedade Hales Best Jumbo mostraram efeitos altamente significativos das doses de biocarvão nas variáveis estudadas, entretanto, como os coeficientes de determinação (R²) foram muito baixos para regressões quadráticas, 0,19; 0,35; 0,30; 0,41, respectivamente, não representam seu comportamento.

Com relação à fitomassa fresca das folhas (FFF), os resultados foram ajustados ao modelo quadrático em que a variedade Amarelo (V1) obteve um FFF de 149,52 g (22,66g, dados não transformados) com dose de biocarvão de 10,38 t ha⁻¹. Para a fitomassa fresca do caule, FFC, os dados foram ajustados para o modelo quadrático com valor máximo de 15,24g, com dose de biocarvão de 10,36 t ha⁻¹, para a variedade Amarelo.

Avaliando o efeito da interação significativa das doses de biocarvão para o FFPA da variedade Amarelo, observou-se que os resultados foram ajustados para um modelo quadrático com a maior produção de 38,26g para a dose de 10,44 t ha⁻¹. A fitomassa fresca da raiz (FFR) foi afetada significativamente pelas doses de biocarvão, seguindo um modelo quadrático com uma produção máxima de 6,29 g, com as doses de biocarvão estimadas em 11,38 t ha⁻¹, diminuindo com o aumento de biocarvão.

Avaliando o efeito de interação significativa das doses de biocarvão sobre a fitomassa fresca total, verificou-se que os dados

foram ajustados ao modelo quadrático com produção máxima de 44,97 g, com a dose de 10,62 t ha⁻¹ para a variedade Amarelo. Os altos FFT observados com a aplicação do biocarvão demonstram um bom desempenho das mudas de melão com a aplicação do biocarvão, fato provavelmente devido à alta disponibilidade de nutrientes que o biocarvão produz.

As doses de biocarvão afetaram significativamente toda a fitomassa seca avaliada. As variedades de melão afetaram apenas a fitomassa seca do caule (FSC) e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD). As doses de biocarvão x variedade de melão afetaram a FSF, a FSR, a FST e também o IQD. A interação doses de biocarvão x variedades influenciou significativamente a fitomassa seca das folhas, apresentando um ajuste quadrático apenas para a variedade Amarelo (V1), com fitomassa máxima de 1,26 g (2,27g não transformado) para a dose de 8,82 t ha⁻¹.

Analisando a fitomassa seca do caule (FSC) que foi afetada pelas doses de biocarvão, observou-se que os dados foram ajustados ao modelo quadrático com a maior fitomassa (0,98g), obtida com a dose de biocarvão de 10,06 t ha⁻¹. Para a fitomassa seca da raiz (FSR), é possível observar um desempenho quadrático para ambas as variedades, com um máximo de 1,57 g (2,46 g - não transformado) para a dose de 10,71 t ha⁻¹ para a variedade Amarelo; e 1,34 g (1,39 g - não transformado) para a dose de 12,04 t ha⁻¹ para a variedade Hales Best Jumbo.

Observou-se também efeito significativo da fitomassa seca total e desempenho quadrático para ambas as variedades, com máximo de 2,53 g (5,89 g - não transformado) para a dose de 10,01 t ha⁻¹ para a variedade Amarelo; e 2,06 g (4,58 g - não transformado) para a dose de 11,68 t ha⁻¹ para a variedade Hales Best Jumbo. Analisando o efeito das variedades, os melhores resultados

foram obtidos com a variedade Amarelo (0,83g), 22,06% maior que o obtido para a Hales Best Jumbo (0,68g).

O comprimento da raiz para ambas as variedades de melão também foi analisado, utilizando o método não paramétrico de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011). Observou-se que a variedade Amarelo respondeu melhor que a Hales Best Jumbo com a aplicação de biocarvão. Os maiores valores da variedade Amarelo, quando o substrato foi fertilizado com 12 e 20 t ha⁻¹ de biocarvão, foram de 26,5 a 30,88 cm; e para a variedade Hales Best Jumbo, de 23,75 a 25,8 cm com aplicação de 8 e 16 t ha⁻¹ de biocarvão (dados não transformados).

Quando os dados de fitomassa seca da parte aérea foram analisados pelo método não paramétrico de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011), foram observados os maiores valores da variedade Amarelo; quando o substrato foi fertilizado com 4 t ha⁻¹ de biocarvão, obteve-se uma fitomassa seca de 3,57 g planta⁻¹ e uma fitomassa para a variedade Hales Best Jumbo de 3,49 4 t ha⁻¹ com a aplicação de uma dose de 4 t ha⁻¹ de biocarvão, diminuindo com doses maiores. Os resultados encontrados no presente trabalho estão provavelmente relacionados à alta concentração de nutrientes do biocarvão.

A interação doses x variedade de biocarvão influenciou significativamente o Índice de Qualidade de Dickson, variando de 0,049 a 0,055 para a variedade Amarelo (V1); e 0,435 a 0,076 para a variedade Hales Best Jumbo (V2), ajustando ambos para um modelo quadrático. Para a variedade V1, o maior IQD foi de 0,37, com 10,31 t ha⁻¹; e 0,43 para V2, com 11,09 t ha⁻¹. Considerando que o IQD mínimo recomendado por Hunt (1990) é 0,20, os valores encontrados no presente estudo para este índice indicam

que as mudas de melão são de alta qualidade e adequadas para o transplante para o local definitivo.

Em geral, concluiu que a fitomassa fresca e a seca do melão, bem como a qualidade das mudas de melão, aumentaram com as doses de biocarvão de cama de aviário utilizadas no substrato. A aplicação de 12 t ha⁻¹ de biocarvão proporcionou o melhor desenvolvimento, fitomassa e qualidade das mudas; doses maiores de biocarvão reduziram a qualidade das mudas; a variedade Amarelo respondeu melhor do que o Hales Best Jumbo à aplicação de biocarvão; e, considerando as vantagens do biocarvão de cama de aviário na constituição do substrato, sua utilização constitui uma alternativa viável para o desenvolvimento das mudas de melão e para o descarte ambiental da cama de aviário.

■ ESTUDO DE CASO 4

Efeito residual de biocarvão de cama de aviário no solo e desenvolvimento inicial de mudas de meloeiro (Laurentino *et al.*, 2021)⁵

Após a colheita das mudas de meloeiro do primeiro ciclo, amostras do substrato (mistura do solo, vermiculita e biocarvão) foram coletadas das unidades experimentais, secas ao ar, moídas, peneiradas com malha de 2 mm e analisadas conforme metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). Em seguida, foi realizada

5 . LAURENTINO, L. G. S.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; SOUZA, F. G.; LIMA, W. B.; FERNANDES, J. D.; DANTAS, E. R. B. Efeito residual de biocarvão de cama de aviário no solo e desenvolvimento inicial de mudas de meloeiro. In: ZUFFO, A. M.; AGUILERA, J. G. (OrgS.). **Pesquisas agrárias e ambientais**. v. VII. 1. ed. Nova Xavantina, MT: Pantanal Editora, 2021. p. 84-98.

novamente a semeadura das cultivares Amarelo (V1) e Hales Best Jumbo (V2) nas unidades experimentais, seguindo a mesma instalação e condução do trabalho com o objetivo de avaliar o efeito residual de doses de biocarvão proveniente de cama de aviário no solo e no desenvolvimento de mudas de meloeiro.

Após 31 DAS, foram analisados os seguintes parâmetros: altura da planta – AP (cm); diâmetro caulinar - DC (mm); número de folhas - NF e área foliar – AF (cm²), determinados segundo a metodologia proposta por Nascimento *et al.* (2002). Em seguida, as mudas foram colhidas para determinação das fitomassas fresca da parte aérea (FFPA) e seca (FSPA); e da fitomassa fresca (FFR) e seca (FSR) das raízes. Para determinação dos parâmetros da fitomassa, aplicou-se o cálculo do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) segundo a metodologia proposta por Dickson *et al.* (1960). Os resultados obtidos foram submetidos ao teste de homogeneidade (Cochran e Bartlett) e ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk), e as que não atenderam à distribuição normal foram normalizadas através de transformações. Quando verificado efeito significativo, foram utilizados análise de regressão polinomial para doses de biocarvão e comparação entre médias para variedades pelo teste de T-student ($p < 0,05$) (Ferreira, 2011).

Conforme as análises químicas, as doses do biocarvão influenciaram significativamente pH, sódio, carbono orgânico e fósforo dos substratos após a colheita do primeiro ciclo das mudas de meloeiro, ou seja, os valores de pH aumentaram de forma quadrática, atingindo o maior valor de pH, 7,66, com a dose de 19,19 t ha⁻¹, havendo um aumento de 15,46% entre esta dose e a dose 0.

O conteúdo do sódio aumentou com as concentrações de biocarvão de cama de aviário de forma linear, sendo que 1,44 cmolc kg⁻¹ foi obtido com a maior dose de biocarvão (20 t ha⁻¹), com au-

mento em torno de 187% entre esse valor e o controle. Mesmo assim, o teor médio de $0,97 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ foi menor que o teor médio de sódio após a incubação do biocarvão no solo, que era $1,12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. A diminuição do teor de sódio nas unidades experimentais ocorreu, provavelmente, devido à lixiviação do substrato pela irrigação das mudas e/ou pela absorção deste elemento pelas plantas.

O fósforo disponível aumentou com o biocarvão obtendo a maior concentração de $296,35 \text{ mg dm}^{-3}$ com a dose de $17,53 \text{ t ha}^{-1}$ de biocarvão nas amostras de substrato após a colheita das mudas, ou seja, houve aumento de 739,26% em relação ao controle. Esses aumentos significativos são, provavelmente, devido à presença de fosfato de potássio na composição do biocarvão, ou porque o biocarvão de cama de aviário no solo aumenta a colonização micorrízica e a disponibilidade de fósforo no solo.

O comportamento do carbono orgânico nos substratos após a colheita das mudas, em função das doses de biocarvão, foi de forma quadrática, atingindo o maior valor de $21,25 \text{ g kg}^{-1}$ com a dose de $10,45 \text{ t ha}^{-1}$, aumentando de 145,82%, em relação à dose 0, com uma média de $15,85 \text{ g kg}^{-1}$.

Mesmo não tendo havido diferença significativa das doses de biocarvão nos teores de cálcio, magnésio e potássio, após a colheita das mudas de meloeiro, foi observado que as médias destes elementos nos substratos, 2,05; 10,21 e $1,65 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente, representam que o biocarvão vai agindo no solo ao longo do tempo, uma vez que as médias desses elementos, após a incubação e antes do plantio das mudas, são semelhantes, ou seja, 2,8; 8,53 e $2,51 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente. De modo geral, pode-se inferir que o efeito residual do biocarvão no substrato melhora a fertilidade do solo e/ou prejudica o desenvolvimento de algumas culturas, devido ao aumento de elementos indesejáveis, como o sódio.

Em relação à avaliação biométrica, pôde-se observar que a altura das plantas foi influenciada pela interação entre doses de biocarvão e variedades de meloeiro, sendo este comportamento representado pelo modelo linear para as mudas da variedade Amarelo (V1) e Hales Best Jumbo (V2), com alcance máximo de 47,75 e 24,48 cm na dose 20 t ha^{-1} , representando um aumento de 144,51 e 47,21% em relação à testemunha, respectivamente.

Para o diâmetro caulinar, houve efeito isolado dos fatores ($p < 0,01$) e ajustou-se ao modelo linear crescente, com aumento de 193,55%, com alcance máximo de $0,091 \text{ mm dia}^{-1}$ na maior dose. Na comparação entre as variedades, nota-se um melhor resultado no diâmetro caulinar de 4,51 mm para a variedade V2, com uma diferença de 13,89% em relação à variedade V1 (3,96 mm).

Para o número de folhas, os dados aumentaram linearmente com as doses de biocarvão, atingindo um valor de 0,943 e 0,868 na dose 20 t ha^{-1} para as variedades Amarelo e Jumbo, respectivamente, o que corresponde a um aumento de 34,14% e 7,43%, quando comparado ao tratamento sem biocarvão.

A área foliar aumentou com as concentrações de biocarvão de cama de aviário de forma linear para as duas variedades, sendo que os maiores valores de área foliar, $135,64 \text{ cm}^2$ para V1 e $107,04 \text{ cm}^2$ para V2, foram obtidos com a maior dose de biocarvão (20 t ha^{-1}), portanto houve um aumento em torno de 284,94% e 77,51% entre esses valores e o tratamento controle, respectivamente.

A interação entre doses e variedades influenciou significativamente todas as variáveis de fitomassa fresca, com exceção da fitomassa fresca da raiz (FFR) e da fitomassa seca da raiz (FSR), quando se observou efeito significativo apenas para fator isolado. Os dados do Índice de Qualidade de Dickson não atenderam aos pressupostos de normalidade, portanto as médias foram compa-

radas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011).

Em geral, o efeito residual das doses de biocarvão de cama de aviário influenciou positivamente os atributos do solo e promoveu crescimento em todas as variáveis da fitomassa fresca e seca das mudas de melão do segundo ciclo, no entanto, esse crescimento foi proporcionalmente menor no segundo ciclo do que no primeiro.

Conforme o Índice de Qualidade de Dickson dos meloeiros, V1 e V2 foram comparadas pela estatística não paramétrica de Kruskal e Wallis (Ferreira, 2011) variando de 0,01 a 0,02 para a variedade Amarelo (V1); e 0,02 a 0,04 para a variedade Hales Best Jumbo (V2). Considerando que o IQD mínimo recomendado por Hunt (1990) é 0,20, os valores encontrados no presente estudo para este índice indicam que as mudas de melão não apresentam qualidade adequada para o transplante para o local definitivo.

ESTUDO DE CASO 5

Biocarvão como condicionador de substrato no desenvolvimento e fitomassa de mudas de mamoeiro (Chaves et al., 2022⁶; Laurentino et al., 2021⁷)

A instalação e a condução deste experimento, objetivando avaliar a eficiência de doses de biocarvão de cama de aviário como

6 . CHAVES, L. H. G.; LAURENTINO, L. G. S.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; FERNANDES, J. D. Biocarvão de cama de aviário no crescimento de mudas de mamoeiro. In: CONGRESSO TÉCNICO-CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2022, Goiânia/GO. *Anais [...]*. 2022, 2022.

7 . LAURENTINO, L. G. S.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; SOUZA, F.G.; LIMA, W. B. ; FERNANDES, J. D.; DANTAS, E. R. B.; SILVA, A. A. R.; GUERRA, H. O. C. Growth of papaya seedlings on substrate consisting of poultry litter biochar. *Semina*. Ciências Agrárias, v. 42, p. 3721-3740, 2021.

condicionante de substrato para o desenvolvimento e o fitossoma das mudas de mamoeiro (*Carica papaya* L.), foram apresentadas no Estudo de Caso 2, ou seja, no experimento com 2 variedades de mamoeiro (V1 = Formosa e V2 = Ouro) testando 6 doses de biocarvão (D0 = 0; D4 = 4; D8 = 8; D12 = 12; D16 = 16 e D20 = 20 t ha⁻¹), com 4 repetições, totalizando 48 unidades experimentais (mudas de mamoeiro).

Aos 30, 60 e 90 dias após a semeadura (DAS), foram avaliados os parâmetros altura da planta - AP (cm), diâmetro caulinar - DC (mm), número de folhas - NF e área foliar - AF. De posse dos dados desses parâmetros, obtidos no decorrer do experimento, foi realizada a estimativa das características de crescimento, em que se calculou a taxa de crescimento absoluto em altura, diâmetro, número de folhas e área foliar (TCA) (Equação 1), conforme metodologia proposta por Benincasa (2003):

$$TCA = \frac{V_f - V_0}{t_f - t_0} \quad (1)$$

Onde TCA - taxa de crescimento absoluto, em altura (cm dia⁻¹), em diâmetro (mm dia⁻¹), em número de folhas ou área foliar (cm² dia⁻¹); V_f - variável final, em altura (cm), em diâmetro (mm), em número de folhas ou área foliar (cm²); V₀ - variável inicial, em altura (cm), em diâmetro (mm), em número de folhas ou área foliar (cm²); t_f - tempo final do monitoramento; t₀ - tempo inicial do monitoramento.

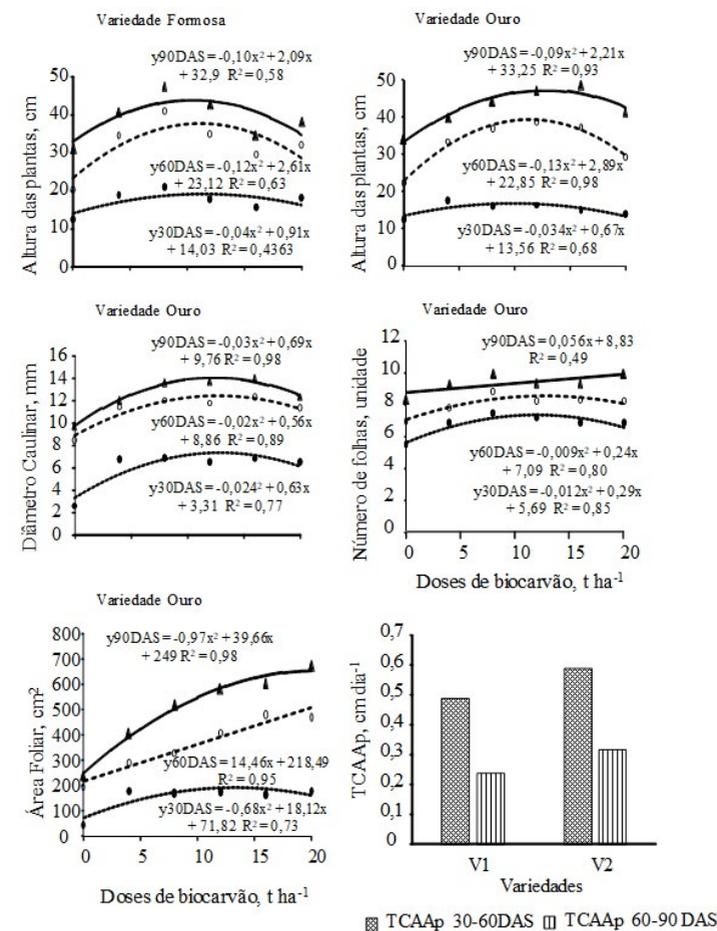
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância utilizando-se o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2011) e, conforme os resultados, pôde-se observar a influência significativa das doses de biocarvão, das variedades e da interação doses vs. variedades nos parâmetros altura de planta, diâmetro caulinar,

número de folhas e área foliar do mamoeiro, da mesma forma que nas taxas de crescimento absoluto.

Os dados de altura de plantas das duas variedades e em todas as datas analisadas se ajustaram ao modelo polinomial quadrático; os alcances máximos, aos 60 e 90 DAS, para a variedade Formosa, atingiram 37,64 cm e 43,88 cm com as doses de 11,14 t ha⁻¹ e 10,48 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 1). No caso da variedade Ouro, aos 30, 60 e 90 DAS, as maiores alturas atingidas foram 16,92 cm, 36,34 cm e 47,23 cm com as doses de 9,94 t ha⁻¹, 11,38 t ha⁻¹ e 12,68 t ha⁻¹, respectivamente. De modo geral, em relação à altura das plantas, a variedade Ouro respondeu melhor em função das doses de biocarvão do que a variedade Formosa. Em relação à TCAAp, a variedade Ouro se destacou nos dois períodos de tempo (30-60 e 60-90 DAS), com diferença de 33,33% e 20,41%, respectivamente, em comparação com as mudas da variedade Formosa.

Aos 30, 60 e 90 DAS, através das equações de regressão, mostra-se que os dados da variedade Ouro se ajustaram ao modelo polinomial quadrático com as doses de biocarvão, com valor máximo estimado de 7,36 mm na dose de 12,901 t ha⁻¹, 12,49 mm na dose 12,84 t ha⁻¹ e 14,05 mm na dose 12,375 t ha⁻¹, respectivamente. Em geral, ambas as variedades sofreram redução de diâmetro caulinar em função do aumento das doses de biocarvão. Com relação a TCADc nos períodos de 30-60 DAS e 60-90 DAS, observou-se tendência linear decrescente e comportamento quadrático, respectivamente, havendo uma redução de 44,44% desta variável à medida que se elevou a dose de 0 para 20 t ha⁻¹, e de 58,82% com a elevação da dose 0 para a dose 10 t ha⁻¹, respectivamente (dados não apresentados neste trabalho).

Figura 1 - Altura de plantas (Variedades Formosa – V1 e Ouro – V2), diâmetro caulinar, número de folhas e área foliar da variedade Ouro, aos 30, 60 e 90 DAS em função do efeito isolado de dose de biocarvão; e taxa de crescimento absoluto da área altura das plantas aos 30-60 e 60-90 DAS em função do desdobramento entre doses de biocarvão e variedades de mamoeiro



Elaborado pelos autores.

No que diz respeito à variável número de folhas, aos 30 e 60 DAS, ajustou-se em regressão quadrático dos dados, com valores de 7,44 e 8,702 números de folhas por planta nas doses 12,08 e 13,39 t ha⁻¹, respectivamente. Aos 90 DAS, houve comportamento linear crescente e verificou-se, através da equação, que as plantas atingiram valor estimado em torno de 10 na dose de 20 t ha⁻¹. Ao comparar os dados das variedades, foi observado que a Ouro foi melhor do que a Formosa. Não houve diferença estatística para a TCANf para os períodos de 30-60 e 60-90 DAS.

O efeito foi significativo para AF aos 30 DAS, com ajuste quadrático com valor máximo de 192,21 cm² na dose de 13,28 t ha⁻¹. Na comparação de variedades, nota-se um melhor resultado da área foliar aos 30 DAS para a variedade Ouro (V2), com valor de 173,01 cm², um aumento de 30,08% em relação à variedade V1 (133,01 cm²) (Figura não mostrada). Os resultados observados aos 60 DAS foi de crescimento linear em função do incremento das doses de biocarvão, com valor máximo de 427,58 cm² na dose 14,46 t ha⁻¹. Na interação doses x variedades para AF aos 90 DAS, os dados se ajustaram ao modelo polinomial quadrático com as doses de biocarvão, com alcance máximo de 655,2 cm² na dose 20,48 t ha⁻¹. Analisando a TCA da área foliar, foi observada que a variedade Ouro se comportou de forma linear crescente, melhor do que a variedade Formosa (Figura não apresentada).

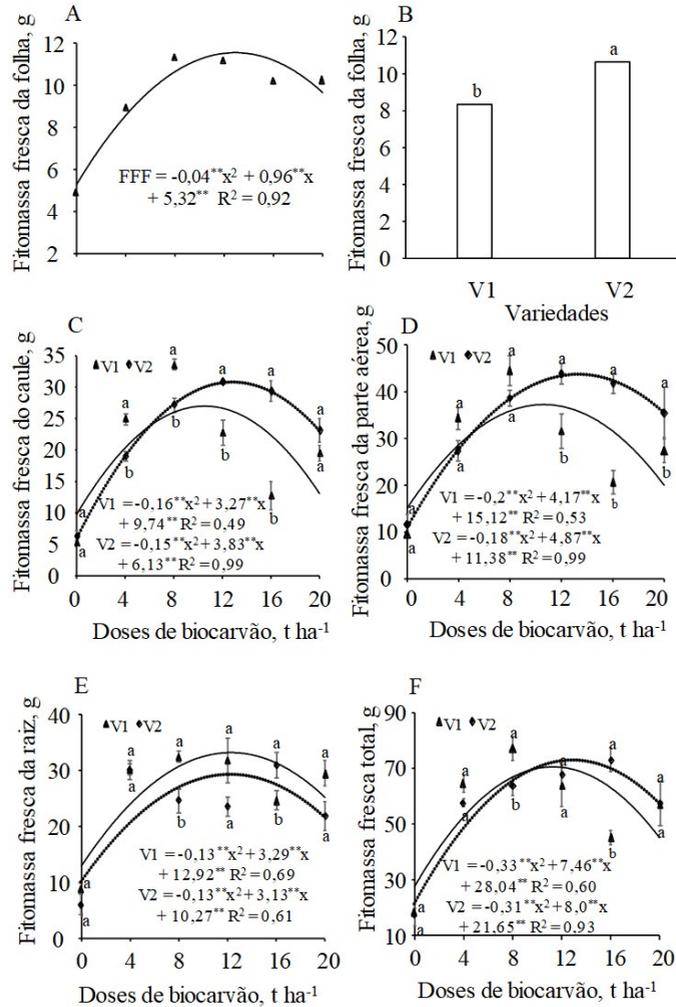
Assim, nas condições deste experimento, os resultados obtidos permitiram concluir que a adição de biocarvão atuou de forma positiva e proporcionou um melhor desenvolvimento das mudas de mamoeiro em relação às variáveis estudadas, sendo as doses de 8 e 12 t ha⁻¹ as que obtiveram melhores resultados. Quanto às variedades estudadas, a Ouro (V2) se destacou em relação à Formosa (V1).

Após terem sido feitas as avaliações dos parâmetros, altura da planta, diâmetro caulinar, número de folhas e área foliar das mudas de mamoeiro, as mudas foram colhidas para determinação da fitomassa fresca e seca da parte aérea (folhas e caule) e do sistema radicular (g). Para determinação da fitomassa fresca, as plantas foram seccionadas em folhas, caule e raiz, e pesadas em balança analítica, obtendo-se a fitomassa fresca da parte aérea (FFPA). As raízes foram cuidadosamente retiradas, lavadas e foi mensurado o comprimento da raiz (CR). Realizando o somatório dos valores obtidos para fitomassa fresca da parte aérea e radicular, obteve-se a fitomassa fresca total, sendo todos os valores expressos em g. Para determinação da fitomassa seca, o material coletado foi posto para secar em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60°C por 72 horas, obtendo-se assim a fitomassa seca da parte aérea (FSPA), a fitomassa seca radicular (FSR) e a fitomassa seca total (FST), sendo estes valores também expressos em g.

Para determinação dos parâmetros da fitomassa, aplicou-se o cálculo do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (Medeiros *et al.*, 2018).

Os resultados obtidos foram submetidos ao teste de homogeneidade (Cochran e Bartlett), e ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Quando verificado efeito significativo, foram utilizadas análise de regressão polinomial para doses de biocarvão e comparação entre médias para variedades pelo teste de T-student ($p < 0,05$). De acordo com a análise de variância, verificou-se, através da equação de regressão, que os dados da fitomassa fresca da folha se ajustaram ao modelo polinomial quadrático com as doses de biocarvão, sendo que o maior acúmulo desta fitomassa foi de 11,08 g, observado com a aplicação de 12 t ha⁻¹, constatando um incremento de 109% quando comparado com a testemunha (Figura 2A).

Figura 2 – Fitomassa fresca da folha em função do efeito isolado de dose de biocarvão (A) e do efeito isolado de variedade (B), fitomassa fresca do caule (C), fitomassa fresca da parte aérea (D), fitomassa fresca da raiz (E), fitomassa seca total (F) em função do desdobramento entre doses de biocarvão e variedades de mamoeiro (V1 = Formosa e V2 = Ouro)

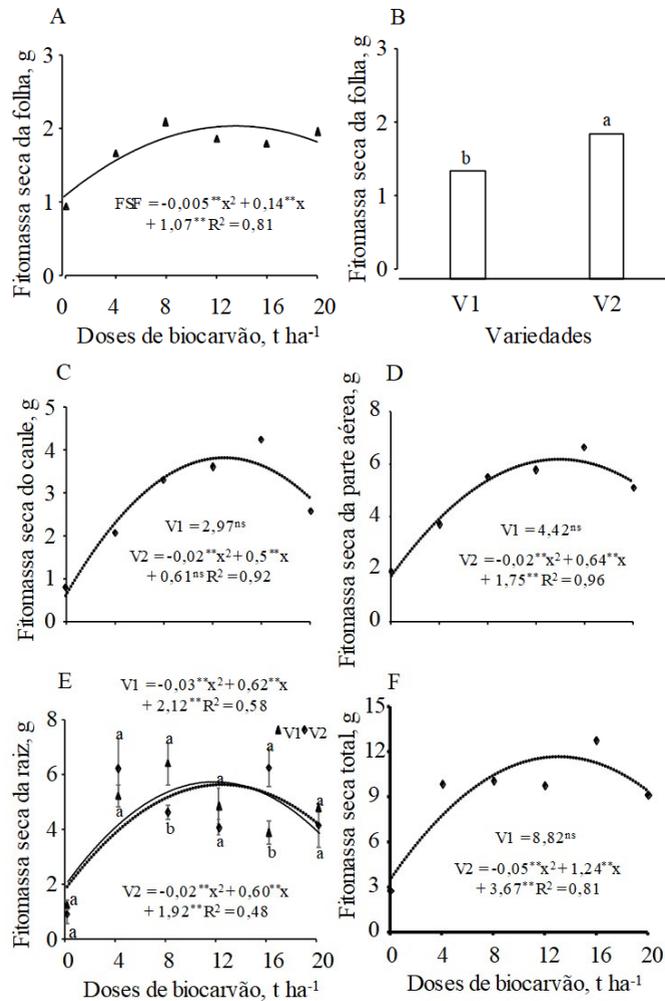


Nota: Médias seguidas das mesmas letras não diferem dentro da mesma dose. Elaborado pelos autores.

Na comparação entre variedades, a variedade Ouro (V2) destacou-se com uma diferença de 27,88% em relação à Formosa (V1), com valores de 10,64 g e 8,32 g, respectivamente (Figura 2B). Com relação à fitomassa fresca do caule (FFC), os dados responderam de forma quadrática, com valor máximo de 26,45 g, com a dose 10,22 t ha⁻¹ para V1; diferentemente da V2, que teve valor máximo de 30,58 g na dose 12,77 t ha⁻¹ (Figura 2C). De forma semelhante ao observado na FFC, para a fitomassa fresca da parte aérea, a variedade Ouro (V2) teve um melhor desenvolvimento com as doses de biocarvão, com valor máximo de 44,32 g na dose estimada de 13,53 t ha⁻¹. Já a variedade Formosa (V1) apresentou comportamento quadrático, com valor máximo estimado de 36,86 g nas plantas submetidas à dose de 10,425 t ha⁻¹ de biocarvão (Figura 2D). Analisando a fitomassa fresca da raiz das plantas de mamoeiro (Figura 2E), verifica-se que os dados obtiveram um melhor ajuste ao modelo quadrático, ocorrendo decréscimo à medida que se aumentaram as doses de biocarvão, sendo os valores máximos estimados de 33,74 e 29,11 g nas doses 12,65 e 12,04 t ha⁻¹ para as variedades Formosa e Ouro, respectivamente. No que diz respeito à fitomassa fresca total, os resultados foram maiores nas mudas produzidas nas doses de 11,3 e 12,9 t ha⁻¹, chegando a atingir valores máximos de 70,2 e 73,26 g para V1 e V2, respectivamente (Figura 2F).

Sobre a fitomassa seca das folhas (Figura 3A), ao analisar a equação de regressão das mudas de mamoeiro em função das doses de biocarvão, verifica-se que seguiu a tendência das demais variáveis e se ajustou ao modelo polinomial quadrático, com valor máximo de 2,05 g na dose de 14 t ha⁻¹. Ao comparar as variedades, nota-se um melhor resultado da fitomassa seca das folhas para a variedade Ouro (V2), com valor de 1,93 g para a variedade V2, com uma diferença de 35,62% em relação à variedade V1 (1,46 g) (Figura 3B).

Figura 3 - Fitomassa seca da folha em função do efeito isolado de dose de biocarvão (A) e do efeito isolado de variedade (B), fitomassa seca do caule (C), fitomassa seca da parte aérea (D), fitomassa seca da raiz (E), fitomassa seca total (F) e Índice de Qualidade de Dickson (G) em função do desdobramento entre doses de biocarvão e variedades de mamoeiro (V1 = Formosa e V2 = Ouro)



Nota: Médias seguidas das mesmas letras não diferem dentro da mesma dose. Elaborado pelos autores.

Para a característica fitomassa seca do caule (Figura 3C), observam-se valores superiores quando adubada com 12,5 t ha⁻¹, com uma fitomassa de 3,735 g. A fitomassa seca da parte aérea (Figura 3D) também se ajustou ao modelo quadrático, com valor máximo estimado de 6,87 g nas plantas que receberam a dose de 16 t ha⁻¹ de biocarvão.

A fitomassa seca da raiz das plantas de mamoeiro (Figura 3E) foi afetada de forma significativa pela interação entre os fatores (Dose x Variedade); e através das equações de regressão, verifica-se que os dados obtiveram um melhor ajuste ao modelo quadrático, sendo os valores máximos estimados para a FSR de 5,32 na dose de 10,33 para a variedade Formosa; e 6,42 g na dose de 15 t ha⁻¹ de biocarvão para a variedade Ouro.

A interação entre doses de biocarvão vs. variedades de mamoeiro também afetou significativamente a fitomassa seca total das mudas (Figura 3F), que apresentou comportamento quadrático, com valor máximo estimado de 11,36 g na dose 12,4 t ha⁻¹. O aumento das fitomassas secas geralmente até a dose de 16 t ha⁻¹ de biocarvão ocorreu provavelmente devido ao aumento da área foliar, refletindo assim em uma maior produção vegetal, uma vez que está relacionada à capacidade fotossintética das plantas, levando, deste modo, a maior assimilação da luz, fotossíntese e acumulação de matéria seca (Albano *et al.*, 2017).

O IQD para as mudas de mamoeiro (Figura 3G) apresentou comportamento polinomial quadrático, o que foi influenciado significativamente pela interação Doses x Variedades, com um aumento inicial, seguido por queda a partir da dose de 16 t ha⁻¹, com ponto máximo estimado em 2,89 t ha⁻¹, obtido na dose 14,5 t ha⁻¹ de biocarvão de cama de aviário. Verificou-se que as mudas que receberam as doses de 4 e 16 t ha⁻¹ apresentaram padrões de qualidade superiores às demais.

Segundo Hunt (1990), o valor mínimo recomendado para o IQD é de 0,20. No presente estudo, os valores desta variável oscilaram de 0,43 a 2,97, demonstrando que as mudas produzidas apresentam qualidade apropriada para o plantio em local definitivo, até mesmo as mudas que foram produzidas sem a incorporação de biocarvão.

Em geral, nas condições deste experimento, os resultados obtidos permitiram concluir que a adição de biocarvão atuou de forma positiva e proporcionou um melhor desenvolvimento das mudas de mamoeiro em relação às variáveis estudadas, sendo as doses de 8 e 12 t ha⁻¹ as que obtiveram melhores resultados. Quanto às variedades estudadas, a Ouro (V2) se destacou em relação à Formosa (V1).

ESTUDO DE CASO 6

Efeito residual de biocarvão de cama de aviário no solo e desenvolvimento inicial de mudas de mamoeiro (Laurentino *et al.*, no prelo)⁸

A instalação e a condução deste experimento foi semelhante ao desenvolvido no Estudo de Caso 4, diferindo apenas a cultura utilizada, na qual foram semeadas duas variedades de mamão, V1 = Formosa e V2 = Ouro nas unidades experimentais.

Após 90 dias da semeadura (DAS), foram analisados os seguintes parâmetros: altura da planta, diâmetro caulinar, número de folhas e área foliar, determinada segundo a metodologia proposta por Nascimento *et al.* (2002). Posteriormente, as mudas foram colhidas para determinação das fitomassas fresca da parte aérea (FFPA) e seca (FSPA) e da fitomassa fresca (FFR) e

⁸ LAURENTINO, L. G. de S.; GUIMARÃES, J. P.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D. **Efeito residual de biocarvão de cama de aviário no solo e desenvolvimento inicial de mudas de mamoeiro.** No prelo.

seca (FSR) das raízes. Os dados biométricos foram utilizados para determinação do Índice de Qualidade de Dickson, conforme as equações descritas no Estudo de Caso 3.

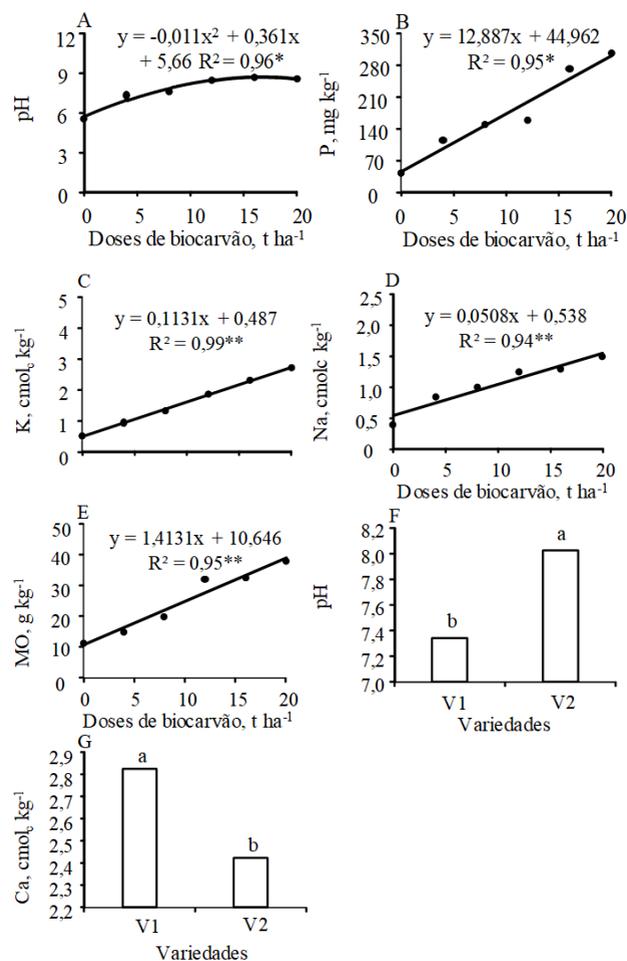
Os resultados obtidos foram submetidos ao teste de homogeneidade (Cochran e Bartlett) e ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk); e as que não atenderam à distribuição normal foram normalizadas através de transformações. Quando verificado efeito significativo, foram utilizadas análise de regressão polinomial para doses de biocarvão e comparação entre médias para variedades pelo teste de T-student ($p < 0,05$) (Ferreira, 2011).

Após o primeiro ciclo das mudas de mamoeiro, observou-se que as doses do biocarvão influenciaram significativamente o pH, a matéria orgânica, o potássio, o sódio e o fósforo dos substratos. Também se verificaram efeitos significativos do fator variedades para pH e cálcio, ou seja, houve diferença dos valores de pH e de cálcio entre as variedades estudadas. Os valores de pH do solo aumentaram de forma quadrática após a adição do biocarvão (Figura 1A), com maior valor de pH de 8,67 na dose de 16,7 t ha⁻¹, valor superior ao observado após a incubação do solo, que foi de 7,55 na dose de 17,18 t ha⁻¹, evidenciando que o biocarvão continuou reagindo ao solo mesmo após um ciclo da cultura. Antes da incorporação do biocarvão, o solo tinha pH 5,75, enquanto o biocarvão apresentava pH de 9,45, indicando uma significativa relação entre o pH do solo e o pH do biocarvão. Esse aumento era esperado, pois é comum ocorrer elevação no pH do solo com a adição de resíduos vegetais, principalmente ao utilizar biocarvão de cama de aviário.

Na comparação entre variedades, nota-se uma maior média de pH para a variedade V2, que atingiu valor médio de 8; enquanto para a variedade V1, o pH foi de aproximadamente 7,3 (Figura 1F). Na comparação entre variedades, o maior teor de cálcio foi encontrado para a variedade Formosa (Figura 1G), diferentemente do

resultado encontrado para o pH. Essas diferenças entre variedades acontecem, pois cada uma apresenta necessidades nutricionais e fisiológicas distintas.

Figura 1 - Resultados de pH (A), fósforo (B), potássio (C), sódio (D) e matéria orgânica (E) no solo após o final do primeiro ciclo da cultura e valores de pH (F) e de cálcio (G) nas duas variedades (V1 = Formosa e V2 = Ouro)



Nota: Médias seguidas das mesmas letras não diferem dentro da mesma dose. Elaborado pelos autores.

Quanto ao teor de fósforo (Figura 1B), este aumentou linearmente com as doses de biocarvão residual, atingindo 302,7 mg dm⁻³ na dose máxima, correspondendo a um aumento de aproximadamente 574% na comparação com a testemunha. Assim como o fósforo, o potássio também foi influenciado pelas doses de biocarvão, com aumento linear atingindo valor máximo de 2,7 cmol_c kg⁻¹ (Figura 1C), aumento de cerca de 464% quando comparado ao tratamento controle. Esses valores foram inferiores aos valores observados por Laurentino *et al.* (2021) antes do primeiro cultivo, sendo assim, essa redução, pode ser oriunda da lixiviação do substrato pela irrigação das mudas e/ou pela absorção deste elemento pelas plantas. Apesar dessa redução, ambos os elementos tiveram aumento de concentração conforme o aumento das doses, o que pode ser explicado pela presença de compostos inorgânicos fontes de fósforo e potássio, tais como: fosfatos de potássio, aluminossilicato de potássio e cloreto de potássio (Mendes, 2020).

De acordo com a Figura 1D, a concentração do sódio no solo, no final do primeiro ciclo de cultivo, aumentou linearmente da mesma forma que houve após o período de incubação (Laurentino *et al.*, 2021). Nestas duas épocas, os teores de sódio no solo com a maior dose de biocarvão (20 t ha⁻¹) foram maiores do que os dados observados no controle (amostras de solo sem biocarvão, 0,06 cmol_c kg⁻¹), no entanto, houve diminuição dos teores de sódio no solo, de 1,61 cmol_c kg⁻¹, após o período de incubação, para 1,55 cmol_c kg⁻¹ no final do primeiro ciclo de cultivo.

A matéria orgânica do substrato aumentou linearmente com o biocarvão, atingindo um valor de 38,9 g kg⁻¹ para a dose de 20 t ha⁻¹ (Figura 1G), um aumento de 265,47% em relação ao controle. Segundo Laurentino *et al.* (2021), após 90 dias de incubação, o teor de carbono orgânico aumentou de forma linear, com uma

média em torno de 16,90 g kg⁻¹, evidenciando os efeitos benéficos do biocarvão sobre esse elemento a longo prazo.

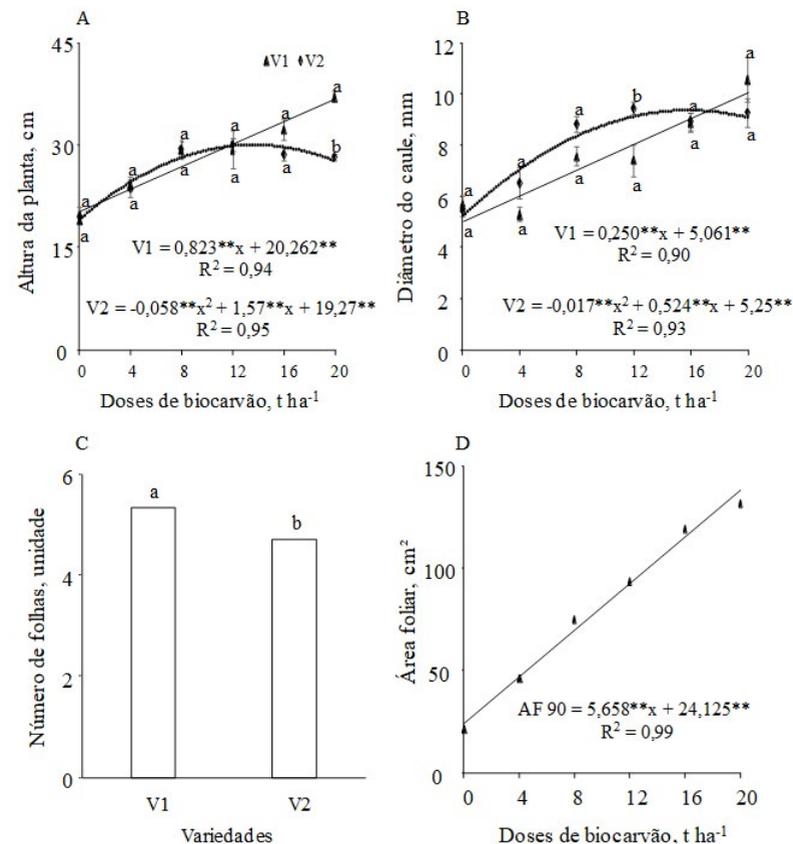
Conforme as análises, os valores da altura da planta (Figura 2A) ajustaram-se ao modelo de regressão linear para V1 e polinomial quadrática para V2, apresentando médias superiores em todas as dosagens quando comparadas ao tratamento testemunha. Observou-se maior média de 36,73 cm na dose de 20 t ha⁻¹ para a variedade Ouro, aumentando em 81,27% em relação ao tratamento controle; e altura máxima estimada de 29,90 cm, com aplicação de 13,53 t ha⁻¹ de biocarvão residual para a variedade Formosa.

As maiores médias do presente estudo foram inferiores às relatadas por Laurentino *et al.* (2021), em que os autores, estudando o crescimento de mudas de mamoeiro (*Carica papaya* L.) adubado com biocarvão proveniente da pirólise de cama de frango, encontraram os valores de 43,88 e 47,23 cm de altura para as variedades Formosa e Ouro, respectivamente, evidenciando um melhor efeito imediato do biocarvão no solo ao comparar com o residual para essa variável. Maiores alturas de plantas indicam maior vigor das mudas, sendo possível reduzir o tempo de produção dessas mudas para o plantio no campo (Silva, 2022).

Para variável diâmetro do caule (Figura 2B), as doses de biocarvão residual também provocaram um aumento linear para V1 e quadrático para V2, com maior diâmetro de 10,061 mm encontrado na dose máxima para V1; para V2, foi estimado o valor máximo de 9,29 mm, com a dose de 15,41 t ha⁻¹ e as menores médias para o tratamento controle (sem biocarvão), a exemplo do que ocorreu com a altura da planta, influenciada pelo aumento das doses. Trindade (2000), em estudos acerca dos aspectos técnicos da produção de mamoeiro, afirma que boas mudas apresentam

de 10 a 30 cm de diâmetro, assim os valores deste estudo estão de acordo, apesar de ser um segundo cultivo de mamoeiro.

Figura 2 - Altura da planta (A), diâmetro caulinar (B), número de folhas em função do efeito isolado de variedades (C) e área foliar (E) em função do desdobramento entre dose e variedade (V1 = Formosa e V2 = Ouro)



Nota: Médias seguidas das mesmas letras não diferem dentro da mesma dose. Elaborado pelos autores.

Os dados para a variável número de folhas (Figura 2C) tiveram efeito isolado de variedade ($p < 0,05$), com a variedade Formosa (5,33 g) se destacando com diferença de 11,63% em comparação com as mudas da variedade Ouro (4,71 g).

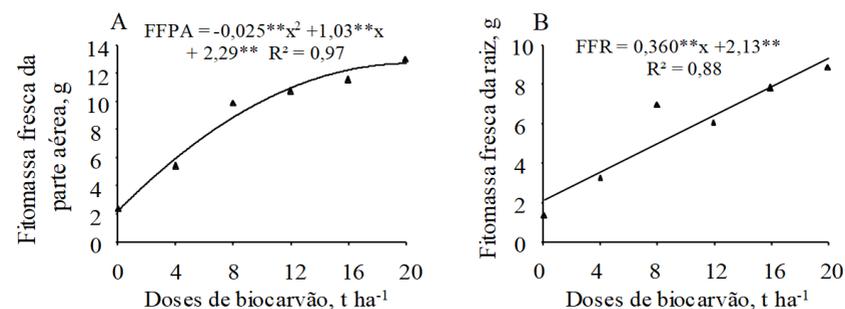
O aumento das doses de biocarvão residual até 20 t ha^{-1} proporcionou aumento na variável área foliar (Figura 2D), em que foi possível encontrar um aumento de 459,46% ao comparar as plantas sem a aplicação de biocarvão ($24,125 \text{ cm}^2$) com as plantas com maior aplicação ($137,285 \text{ cm}^2$). Essa variável é utilizada como parâmetro para a qualidade de mudas, devido a sua alta correlação com características de crescimento e biomassa (Rudek *et al.*, 2013).

O aumento desta variável pode relacionar-se com a qualidade do substrato utilizado, pois as dosagens de biocarvão de cama de aviário aplicadas contribuíram para o aumento da matéria orgânica, dado que esse material possui uma forma estável de MO, que melhora a estrutura do solo, reduz a plasticidade e a coesão, aumenta a capacidade de retenção de água e a aeração, permitindo maior penetração e distribuição das raízes; e assim faz, com que as plantas mantenham na parte aérea maior superfície foliar (Hafle *et al.*, 2009). As mudas adubadas com 20 t ha^{-1} de biocarvão de cama de aviário, por apresentarem maiores valores para esta variável na comparação com os demais tratamentos, apresentam maiores áreas fotossintéticas, as quais aumentam a produção de fotoassimilados, sendo mudas mais vigorosas e de boa qualidade (Santos *et al.*, 2014).

Os dados de FFPA em função de doses (Figura 3A) se ajustaram ao modelo de regressão polinomial quadrático crescente, com valor máximo de 12,83g na dose de 20 t ha^{-1} de biocarvão residual, que representa, quando comparado à testemunha, um incremento de cerca de 460% na produção de fitomassa.

Para FFR, os dados em função das doses de biocarvão (Figura 3B) se ajustaram ao modelo de regressão linear crescente, com incremento na produção de fitomassa de 337,39% entre as doses testemunha ($2,134 \text{ g}$) e a dose de 20 t ha^{-1} ($9,334 \text{ g}$). No caso da fitomassa fresca total (Figura 4A), as doses de biocarvão provocaram um aumento quadrático na produção desta variável; conforme o modelo de regressão, a maior fitomassa seca total (FST) correspondeu a 4,71 g, aplicando $18,611 \text{ t ha}^{-1}$ de biocarvão residual.

Figura 3 - Fitomassa fresca da parte aérea (A) e fitomassa fresca da raiz (B) em função de doses de biocarvão

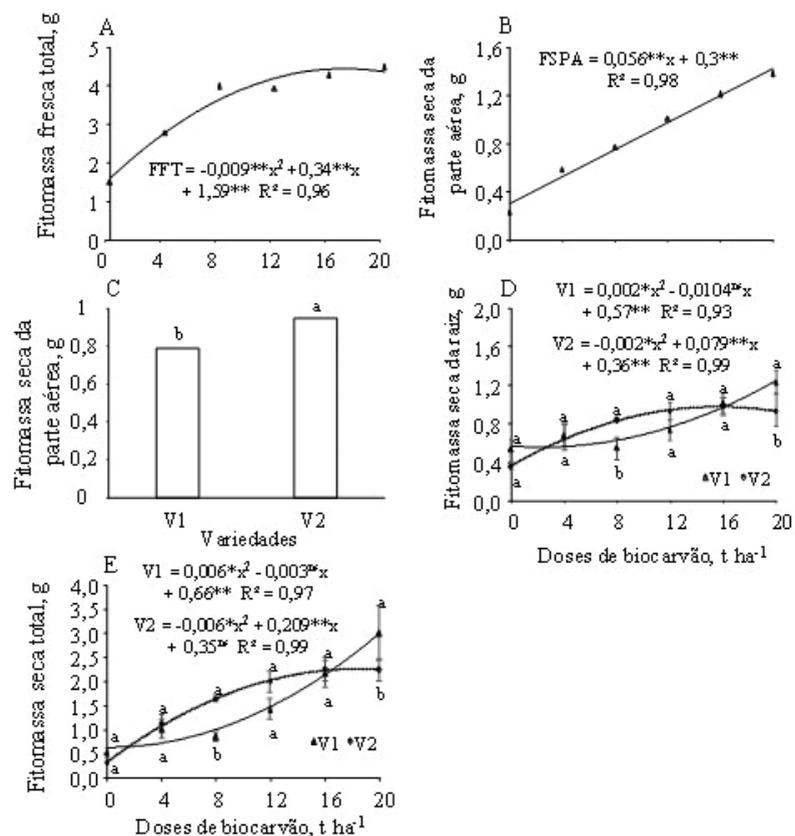


Elaborado pelos autores.

Ao avaliar o efeito do biocarvão no primeiro ciclo do mamoeiro, Laurentino *et al.* (2021) encontraram os seguintes resultados referentes à fitomassa fresca: para FFPA, foi encontrado valor máximo de 44,32 g ($13,53 \text{ t ha}^{-1}$) e 36,86 g ($10,425 \text{ t ha}^{-1}$) para as variedades Formosa e Ouro, respectivamente; para FFR, os valores máximos estimados de 33,74 g ($12,65 \text{ t ha}^{-1}$) para V1 e 29,11 g ($12,04 \text{ t ha}^{-1}$) para V2; na FFT, os resultados foram maiores nas mudas produzidas nas doses de 11,3 e $12,9 \text{ t ha}^{-1}$, chegando a

atingir valores máximos de 70,2 e 73,26 g para V1 e V2, respectivamente.

Figura 4 - Fitomassa fresca total (C), fitomassa seca da parte aérea em função de doses de biocarvão (D) e em função do efeito isolado de variedades (E), fitomassa seca da raiz (F) e fitomassa seca total (G) em função do desdobramento entre dose e variedade (V1 = Formosa e V2 = Ouro)



Nota: Médias seguidas das mesmas letras não diferem dentro da mesma dose. Elaborado pelos autores.

Os efeitos residuais das doses de biocarvão mostraram um maior acúmulo de matéria fresca com o incremento das doses, evidenciando que houve efeito residual (segundo ciclo), apesar dos valores inferiores.

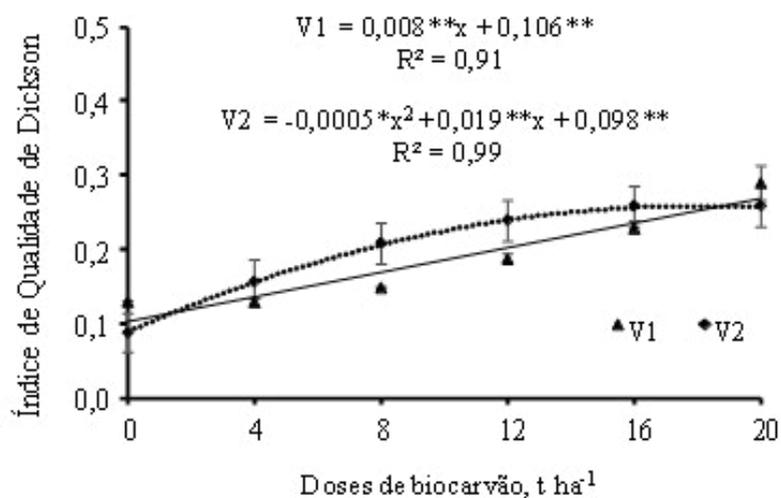
A fitomassa seca da parte aérea em função das doses de biocarvão residual (Figura 4B) ajustou-se ao modelo de regressão linear crescente, com maior média de 1,42 g na dose máxima, cujo aumento foi de 373,33% quando comparado à fitomassa das plantas cultivadas com a ausência do biocarvão (0,3 g). Na comparação entre as variedades de mamoeiro (Figura 4C), nota-se uma melhor produção de fitomassa de 0,944 mm para a variedade V2, com uma diferença de 16,63% em relação à variedade V1 (0,787 mm).

Os dados de FSR das plantas de mamoeiro (Figura 4D) em função da interação Doses x Variedades foram ajustados ao modelo de regressão polinomial quadrático. Nestas condições, a maior produção de FSR para V1 se deu através da aplicação da dose de 20 t ha⁻¹ atingindo o valor de 1,24 g, com incremento de 118,94% entre a ausência de biocarvão no solo e sua maior dose. As mudas de mamoeiro V2 atingiram valor máximo estimado de 1,14 g na dose de 19,75 t ha⁻¹. Semelhante à variável anterior, a interação D x V se deu com ajuste polinomial quadrático para a fitomassa seca total (Figura 4E), em que V1 alcançou maior média para FST de 3,005 g na dose máxima, aumento de 357,49% em relação à dose testemunha (0,66 g); enquanto V2 atingiu valor estimado de 2,28 g na dose 18,38 t ha⁻¹, sendo observado um aumento de 542,92% em relação ao tratamento sem a incorporação de biocarvão ao solo (0,35 g).

Os resultados referentes à fitomassa seca são inferiores aos observados no primeiro ciclo da cultura, sendo que é possível verificar que o biocarvão residual não proporcionou aumentos de produção equivalentes ou superiores ao cultivo anterior.

Acerca do Índice de Qualidade de Dickson (Figura 5), ao analisar a equação de regressão das mudas de mamoeiro em função da interação das doses de biocarvão e das variedades, verifica-se que houve ajuste de forma linear e quadrática para V1 e V2, respectivamente.

Figura 5 – Índice de Qualidade de Dickson em função do desdobramento entre dose e variedade (V1 = Formosa e V2 = Ouro)



Nota: Médias seguidas das mesmas letras não diferem dentro da mesma dose. Elaborado pelos autores.

A maior média de IQD para V1 foi obtida no tratamento contendo maior dose de biocarvão, atingindo um valor de 0,266, que corresponde a um aumento de aproximadamente 151% quando comparado ao tratamento sem biocarvão. Para a variedade 2, a Ouro, o maior valor obtido foi de 0,28 na dose de 19 t ha⁻¹. Em

relação à dose testemunha e à maior dose utilizada, houve um aumento de 183,67%. Conforme Hunt (1990), o valor mínimo recomendado para o IQD é de 0,20.

No presente estudo, as mudas da V1 só atingiram esse valor a partir da incorporação de 16 t ha⁻¹ de biocarvão, enquanto as mudas V2 atingiram o valor mínimo recomendado a partir da dose de 8 t ha⁻¹. Os resultados encontrados para Índice de Qualidade de Dickson do presente estudo indicaram que apenas as maiores doses de biocarvão residual apresentaram efeito melhor sobre a qualidade das mudas, estando aptas ao estabelecimento no campo. As mudas que foram produzidas sem biocarvão não apresentaram boa relação entre os parâmetros considerados pelo IQD, sendo necessário um tempo maior para a realização do seu transplante.

Em geral, nas condições deste experimento, os resultados obtidos permitiram concluir que a adição de biocarvão residual no cultivo de duas variedades de mamão, apesar do resultado satisfatório, teve um crescimento e desenvolvimento de mudas inferiores quando comparadas com o primeiro ciclo.

REFERÊNCIAS

ALBANO, F. G.; CAVALCANTE, Í. H.; MACHADO, J. S.; LACERDA, C. F. D.; SILVA, E. R. D.; SOUSA, H. G. D. New substrate containing agroindustrial carnauba residue for production of papaya under foliar fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 21, n. 2, p. 128-133, 2017.

ARAGÃO, C. A.; SANTOS, J. S.; QUEIROZ, S. O. P.; FRANÇA, B. Avaliação de cultivares de melão sob condições de estresse salino. **Revista Caatinga**, Mossoró, RN, v. 22, n. 2, p. 161-169, 2009.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água de irrigação na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29).

BARROS, D. L.; REZENDE, F. A.; CAMPOS, A. T.; MAIA, C. M. A. Biochar of sawdust origin in passion fruit seedling production. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, n. 5, p. 200-207, 2017.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas**: noções básicas. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 2003. 42p.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Coordenação de Apoio Laboratorial, Murilo Carlos Muniz Veras (Org.). MAPA/DAS/CGAL, Brasília, 2014. 220p.

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes**: ciência, tecnologia e produção. Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588p.

CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. D. Agronomic Values of Green Waste Biochar as a Soil Amendment. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, p. 629-634, 2007.

CRISPIM, J. F.; LIMA, J. S. S.; SILVA, J. K. B.; SILVA, A. G. C.; FERNANDES, G. K. F.; BENTO, J. E. A. Aspecto nutricional do biocarvão na produção de mudas de rúculas em condições semiáridas. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 3, p. 12-17, 2020.

DHARMAKEERTHI, R. S.; CHANDRASIRI, J. A. S.; EDIRIMANNE, V. U. Effect of rubber wood biochar on nutrition and growth of nursery plants of *Hevea brasiliensis* established in an Ultisol. **Springer-Plus**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2012.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**, v. 36, n. 1, p. 10-13, 1960.

FERNANDES, J. D.; CHAVES, L. H. G.; MENDES, J. S.; CHAVES, I. B.; TITO, G. A. Soil chemical amendments and the macronutrients mobility evaluation in oxisol treated with biochar. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 10, p. 238-247, 2018.

FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. **Germinação**: do básico ao aplicado. Porto Alegre: Artmed, 2004. 323p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

HAFLE, O. M.; SANTOS, V. A. D.; RAMOS, J. D.; CRUZ, M. D. C. M. D.; MELO, P. C. D. Produção de mudas de mamoeiro utilizando Bokashi e Lithothamnium. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, SP, v. 31, n. 1, p. 245-251, 2009.

HONG, S.; YU, S.; KIM, K.; LEE, G.; SONG, S. Effects of biochar on early growth and nutrient content of vegetable seedlings. **Korean Journal Environmental Agriculture**, v. 39, n. 1, p. 50-57, 2020.

HUNT, G. A. Effect of styroblock design and copper treatment on morphology of conifer seedlings. *In*: ROSE, R.; CAMPBELL, S. J.; LANDIS, T. D. (Eds.). **Western Forest Nursery Associations**. Fort Collins, CO: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1990. p. 218-222.

LABOURIAU, L. G.; VALADARES, M. B. On the germination of seeds of *Calotropis procera*. *In*: ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, 1976, São Paulo. **Anais** [...] São Paulo, 1976. p.174-186.

LAURENTINO, L. G. S.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; GUIMARÃES, J. P.; SOUZA, F. G.; LIMA, W. B.; FERNANDES, J. D.; DANTAS, E. R. B.; SILVA, A. A. R.; GUERRA, H. O. C. Growth of papaya seedlings on substrate consisting of poultry litter biochar. **Semina. Ciências Agrárias**, Londrina, PR, v. 42, p. 3721-3740, 2021.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, v. 2, n. 2, p. 176-77, 1962.

MEDEIROS, M. B. C. L.; JESUS, H. I.; SANTOS, N. F. A.; MELO, M. R. S.; SOUZA, V. Q.; BORGES, L. S.; GUERREIRO, A. C.; FREITAS, L. S. Índice de Qualidade de Dickson e característica morfológica de mudas de pepino, produzidas em diferentes substratos alternativos. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 159-173, 2018.

MENDES, J. S. **Biocarvão**: caracterização e desempenho como condicionador de solo na cultura do milho. 2020. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

NASCIMENTO, I. B. D.; FARIAS, C. H. A.; SILVA, M. C. C.; MEDEIROS, J. F. D.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; NEGREIROS, M. Z. D. Estimativa da área foliar do meloeiro. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 4, p. 555-558, 2002.

PELIZZA, T. R.; SILVEIRA, F. N.; MUNIZ, J.; ECHER, A. H. B.; MORSELLI, T. B. G. A. Production of yellow melon seedlings in different substrates under protected cultivation. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n. 2, p. 257-261, 2013.

RODRIGUES, E. M.; DE PAULA, N. F.; DE PAULA, R. C. Cultivo de eucalipto com biocarvão de resíduos de folhas de palmeira dendê. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, SP, v. 8, n. 1, p. 139-143, 2016.

ROGOVSKA, N.; LAIRD, D.; CRUSE R. M.; TRABUE, S.; HEATON, E. Germination tests for assessing biochar quality. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, p. 1014-1022, 2011.

RUDEK, A.; GARCIA, F. A.; PERES, F. Avaliação da qualidade de mudas de eucalipto pela mensuração da área foliar com o uso de imagens digitais. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, GO, v. 9, n. 17, p. 3775-3787, 2013.

SANTOS, A. F. D.; MENEZES, R. S.; FRAGA, V. S.; PÉREZ-MARIN, A. M. Efeito residual da adubação orgânica sobre a produtividade de milho em sistema agroflorestal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 14, p. 1267-1272, 2010.

SANTOS, C. C.; MOTTA, I. D. S.; CARNEIRO, L. F.; SANTOS, M. C. S.; PADOVAN, M. P.; MARIANI, A. Produção agroecológica de mudas de maracujá em substratos a base de húmus de minhoca e casca de arroz carbonizada. **Cadernos de Agroecologia**, Recife, PE, v. 9, n. 4, p. 1-10, 2014.

SILVA, I. C. B. D.; FERNANDES, L. A.; COLEN, F.; SAMPAIO, R. A. Growth and Production of Common Bean Fertilized with Biochar. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 47, e20170220, 2017.

SILVA, J. Produção de mudas de mamoeiro fertirrigado com água de esgoto doméstico tratada. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/Embrapa Mandioca e Fruticultura**, 2022. 22p.

SILVA, L. F. V.; DE MELO, E. I.; GONÇALVES, P. A. S. Biocarvão de serragem de eucalipto como condicionador de substratos para produção de mudas de alface. **Agri-Environmental Sciences**, Palmas, TO, v. 5, p. 243-250, 2019.

SOUCHIE, F. F.; MARIMON JUNIOR, B. H.; PETTER, F. A.; MADARI, B. E.; MARIMON, B. S.; LENZA, E. Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de Tachigali *vulgaris* LG Silva &

HC Lima. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 21, n. 4, p. 811-821, 2011

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FORTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017. 573p.

TERRA, S. B.; FERREIRA, A. A. F.; PEIL, R. M. N.; STUMPF, E. R. T.; BECKMANN-CAVALCANTE, M. Z.; CAVALCANTE, Í. H. L. Alternative substrates for growth and production of potted chrysanthemum (cv. Funny). **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR, v. 33, n. 3, p. 465-471, 2011.

TITO, G. A.; CHAVES, L. H. G.; DANTAS, E. R. B.; LAURENTINO, L. G. S.; SOUZA, F. G.; GUERRA, H. O. C. Biochar on soil chemical properties and beak pepper (*Capsicum chinense*) Production. **Agricultural Sciences**, v. 11, p. 1133-1142, 2020.

TRINDADE, A. V. **Papaya, Produção: Aspectos Técnicos**. Brasília: Embrapa Mandioca e Fruticultura, Comunicado para Transferência de Tecnologia, 2000. 77p.

ZÁRATE, N. A. H.; VIEIRA, M. C. **Hortas: conhecimentos básicos**. 1. ed. Dourados, MS: Seriema, 2018. 298p.

CAPÍTULO 7

Biocarvão no desenvolvimento e na produção de culturas

Guilherme de Freitas Furtado

Antônio Ramos Cavalcante

Gilvanise Alves Tito

Washington Benevenuto de Lima

Jacqueline da Silva Mendes

Lúcia Helena Garófalo Chaves

Josely Dantas Fernandes

André Alisson Rodrigues da Silva

Geovani Soares de Lima

Na agricultura, para aumentar a quantidade de nutrientes no solo, de modo a elevar a produtividade das culturas, são utilizados fertilizantes minerais. No entanto, o uso excessivo desses insumos, além de aumentar o custo da produção, pode gerar sérios problemas ambientais, como a degradação e a salinização do solo, bem como a poluição de corpos hídricos (Pereira, 2019).

Nessa perspectiva de diminuir o uso de fertilizantes, otimizar a produção e reduzir o risco de poluição, faz-se necessária a utilização de práticas alternativas de uso e manejo do solo, tais como: o plantio direto, a adubação verde, o biofertilizante e o uso de “biocarvão” (Bibar, 2014). Conforme Madari *et al.* (2012), o biocarvão está entre as únicas tecnologias disponíveis que podem contribuir

para a melhoria ou manutenção das propriedades do solo e, portanto, para a produção de energia sustentável e alimentos.

O biocarvão é o termo dado à biomassa submetida ao processo de decomposição, degradação ou alteração da composição pela ação de calor (pirólise), de forma rápida ou lenta, na presença de pouco ou ausência de oxigênio. Quimicamente ele é difícil de caracterizar por causa da grande variedade de biomassas possíveis de serem empregadas para sua produção, além das condições de carbonização empregadas para a conversão das biomassas em biocarvão (Lehmann *et al.*, 2006), no entanto, sabe-se que é um material rico em carbono. Entre as diversas fontes utilizadas na produção de biocarvão, destaca-se, no Brasil, o uso de cama de aviário em virtude da grande quantidade gerada por ano, que, conforme Corrêa e Miele (2011), está em torno de 6,8 milhões de m³.

As principais vantagens da aplicação do biocarvão para as propriedades do solo são: aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas (macro e micronutrientes), incrementando, assim, a fertilidade do solo; aumento do pH, com conseqüente diminuição da acidez e da toxidez por alumínio pela neutralização deste elemento; remediação de solos contaminados com metais pesados; redução de odores e emissões de gases de efeito estufa; sequestro de carbono; além do aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), aeração e retenção de água no solo (Ekebafé *et al.*, 2013), conseqüentemente melhorando o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

De acordo com Santos *et al.* (2013), o biocarvão de cama de aviário melhora a fertilidade do solo e pode ser utilizado como uma fonte complementar de fósforo para as culturas. Além disso, estudos conduzidos com biocarvão descobriram que seu uso aumenta o nitrogênio total no solo e reduz as perdas de nitrogênio

por lixiviação devido à adsorção de NH₄⁺ na superfície do biocarvão (Chen *et al.*, 2010; López-Cano *et al.*, 2016).

Utomo *et al.* (2012) verificaram que a aplicação de 15 t ha⁻¹ de biocarvão diminuiu a necessidade de aplicação de fertilizante nitrogenado em até 43% para produzir a mesma quantidade de matéria seca de milho. Verifica-se, entretanto, conforme Steiner *et al.* (2007), maior eficiência quando este é associado à adubação mineral em função da sua baixa disponibilidade de nutrientes.

O biocarvão têm despertado o interesse de muitos pesquisadores no mundo, já que vários estudos têm demonstrado benefícios agrônômicos satisfatórios. Contudo, deve-se ter cautela, pois alguns trabalhos não demonstraram efeitos significativos; e outros são avessos à aplicação de biocarvão na produtividade das culturas. Além disso, os efeitos dos biocarvões no desenvolvimento de culturas ainda não foram amplamente discutidos devido à grande variabilidade entre os diferentes tipos de materiais carbonizados, por exemplo, cama de aviário e seus efeitos sobre o ambiente demandam estudos específicos, pois o conhecimento sobre o impacto desse material sobre a qualidade e composição da matéria orgânica do solo (MOS) ainda é escasso.

Considerando que são poucas as informações em relação à utilização do biocarvão de cama de aviário nos sistemas produtivos, o estudo do potencial de uso deste biocarvão na produtividade das culturas agrícolas torna-se de extrema relevância por representar uma nova opção de uso da expressiva quantidade de resíduos gerados na atividade avícola, sendo também mais uma alternativa econômica para os produtores.

Por essas razões, vários experimentos agrícolas, utilizando biocarvão de cama de aviário, foram realizados em laboratório e/ou em casa de vegetação (ambiente protegido), visando aos efei-

tos desse material no estado nutricional, crescimento, desenvolvimento e produção de diversas culturas, como rabanete, beterraba, girassol, gergelim, pimentão, pimenta biquinho e milho. Os resultados desses experimentos são apresentados, de forma reduzida, nos diversos estudos de caso apresentados neste capítulo.

■ ESTUDO DE CASO 1

Propriedades químicas do solo, crescimento, desenvolvimento, produção e taxas de crescimento e produção de girassol em função da adubação com biocarvão e NPK . (Furtado *et al.* 2016¹, 2017²; Furtado; Chaves, 2018³)

Para avaliar o efeito da adubação com biocarvão de cama de aviário em combinação com fertilizante mineral (NPK) sobre os atributos químicos do solo e sobre o crescimento, o desenvolvimento e os componentes de rendimento de girassol cv. EMBRAPA 122/V2000, foi instalado um experimento em ambiente protegido pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola/UFCCG, com delineamento experimental inteiramente casualizado, com tratamentos arranjos em esquema fatorial (5 x 4), com quatro repetições.

1 . FURTADO, G. F.; CHAVES, L. H. G.; SOUSA, J. R. M.; ARRIEL, N. H. C.; XAVIER, D. A.; LIMA, G. S. Soil chemical properties, growth and production of sunflower under fertilization with biochar and NPK. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 3, p. 418-424, 2016.

2 . FURTADO, G. F.; CHAVES, L. H. G.; SOUZA, L. P.; SOUSA JUNIOR, J. R.; LIMA, G. S.; SOUSA, J. R. M. Índices fisiológicos do girassol em função da adubação com biocarvão e NPK. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 7, p. 1924-1933, 2017.

3 . FURTADO, G. F.; CHAVES, L. H. G. Growth rates and sunflower production in function of fertilization with biochar and NPK. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 2, p. 260-270, 2018.

Para avaliar o efeito da adubação com biocarvão de cama de aviário em combinação com fertilizante mineral (NPK) sobre os atributos químicos do solo e sobre o crescimento, o desenvolvimento e os componentes de rendimento de girassol cv. EMBRAPA 122/V2000, foi instalado um experimento em ambiente protegido pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola/UFCCG, com delineamento experimental inteiramente casualizado, com tratamentos arranjos em esquema fatorial (5 x 4), com quatro repetições.

Os tratamentos foram compostos pela combinação de cinco doses de adubação mineral, D1=0, D2=25%, D3=50% D4=75% e D5=100% da indicação de adubação com NPK (100; 300 e 150 mg kg⁻¹) para ensaios, conforme Novais *et al.* (1991); e quatro doses de biocarvão de cama de frango [B1=0; B2=5% (400g/vaso); B3=10% (800g/vaso) e B4=15% (1100g/vaso)], calculadas com base no volume de solo (Jien; Wang, 2013), totalizando 20 tratamentos e 80 unidades experimentais. Utilizaram-se como fontes de NPK, respectivamente, ureia, monoamônio fosfato (MAP) e cloreto de potássio (KCl), sendo aplicado no tratamento com 100% de recomendação 1,41 g de ureia, 13,64 g de MAP e 5 g KCl por vaso. O MAP foi aplicado a cada sete dias, a partir de 25 dias após a semeadura (DAS); o KCl foi aplicado aos 30, 45 e 60 DAS; e a ureia foi aplicada aos 50 DAS. O biocarvão foi incorporado ao solo e deixado em incubação por um período de 20 dias. Realizou-se também adubação foliar aos 40 DAS, utilizando-se Ubyfol® (micronutrientes) numa proporção de 0,5 kg de adubo foliar para 100 litros de água. A semeadura e a condução das plantas foram feitas em recipientes plásticos de 20 dm³ de capacidade, preenchidos com 20 kg de solo classificado como Neossolo Quartzarênico, proveniente do município de Campina Grande-PB e retirado na

camada de 0-20 cm, cujos atributos químicos foram determinados conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (2011), com os seguintes dados : pH (H₂O)= 6.4; Ca = 2.10 cmol_c kg⁻¹; Mg = 2.57 cmol_c kg⁻¹; Na = 0.06 cmol_c kg⁻¹; K = 0.14 cmol_c kg⁻¹; H + Al = 4.05 cmol_c kg⁻¹; O.M. = 4.8 g kg⁻¹; P = 4.6 mg kg⁻¹; pHes (extrato de saturação) = 5.8; CEes = 0.22 dS m⁻¹; RAS (relação de adsorção de sódio) = 0.75; Cl⁻es= 1.0 mmol_c L⁻¹; CO₃²⁻es= 0.0; HCO₃⁻es= 1.2 mmol_c L⁻¹; Ca²⁺es= 0.25 mmol_c L⁻¹; Mg²⁺es= 1.50 mmol_c L⁻¹; Na⁺es= 0.70 mmol_c L⁻¹; K⁺es= 0.19 mmol_c L⁻¹. O biocarvão foi produzido a partir do processo de pirólise convencional, aquecendo-se o material à 450°C, durante 0,5 hora, sob pressão atmosférica, utilizando-se como resíduo cama de frango e tendo como atributos químicos, conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (2009): pH (H₂O) = 10,1; N = 42,31 g kg⁻¹; P = 32,56 g kg⁻¹; K⁺ = 48,56 g kg⁻¹; Ca²⁺ = 57,75 g kg⁻¹; Mg = 12,40 g kg⁻¹; Na = 14,37 g kg⁻¹; Fe = 137 mg kg⁻¹; Cu = 812 mg kg⁻¹; Zn = 700 mg kg⁻¹; Mn = 862 mg kg⁻¹.

Com o intuito de analisar a salinidade do biocarvão, a seguinte metodologia empírica foi adotada: 12,5 gramas de biocarvão foram colocados com 125 mL de água destilada em um tubo de polietileno, com um dreno parcialmente fechado com algodão, de modo a evitar a percolação de biocarvão. O líquido drenado foi analisado quimicamente, apresentando os seguintes resultados: pH (H₂O) = 9,39; CE (dSm⁻¹) = 8,87; P = 56,9 mg L⁻¹; K = 9,6 mg L⁻¹; Ca = 3020,2 mg L⁻¹; Mg = 88,4 mg L⁻¹; Na = 465,1 mg L⁻¹. No final do experimento, realizou-se a análise de salinidade nas unidades experimentais a fim de verificar os efeitos do biocarvão sobre os atributos químicos do solo utilizado, conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (2011).

A semeadura foi realizada colocando-se três sementes de girassol cultivar EMBRAPA 122/V2000 por vaso, sendo que, aos 20

DAS, após o desbaste, foi mantida uma planta por vaso. As irrigações foram realizadas diariamente utilizando-se água pluvial. O volume de água aplicado (Va) foi mensurado através do consumo de água pelas plantas sob 100% da evapotranspiração real (ET_r), conforme a equação 1, sendo obtido pela diferença entre a média do peso dos recipientes em condição de máxima retenção de água (P_{cc}), e o peso médio dos recipientes na condição de não saturação (peso atual) (P_a), dividido pelo número de recipientes (n). A máxima retenção de água foi obtida saturando-se os vasos até drenagem livre e aferindo-se o peso nessa condição.

$$\blacksquare Va = \frac{P_{cc} - P_a}{n} \quad (1)$$

Aos 30 e 60 DAS, foram avaliados o número de folhas totalmente expandidas (NF) com comprimento mínimo de 3 cm, a área foliar (AF), a razão de área foliar (RAF) e a área foliar específica (AFE). A AF foi mensurada pelo método não destrutivo, empregando a metodologia proposta por Maldaner *et al.* (2009), conforme a equação 2.

$$\blacksquare AF = 1,7582 \times L^{1,7067} \quad (2)$$

Em que AF - área foliar (cm²); e L - largura da folha (cm), aferindo-se na porção mediana do limbo foliar.

A RAF foi determinada através da relação entre a área foliar (AF) e a fitomassa da parte aérea (FPA), de acordo com a equação 3 (Benincasa, 2004).

$$\blacksquare RAF = \frac{AF}{FPA} \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

A AFE foi determinada através da razão entre a área foliar (AF) e a fitomassa das folhas (FF) conforme Benincasa (2004) (Equação 4).

$$\blacksquare AFE = \frac{AF}{FF} \quad (\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}) \quad (4)$$

Aos 30, 60 e 90 DAS, foram avaliados a altura das plantas (AP) e o diâmetro do caule (DC). Com esses dados, após a semeadura do girassol (DAS), foram determinadas a Taxa de Crescimento Absoluta e a Taxa de Crescimento Relativa, usando a metodologia proposta por Benincasa (2004), de acordo com as equações descritas abaixo:

Para a taxa de crescimento absoluta:

$$\blacksquare TCA = \frac{A2 - A1}{t2 - t1} \quad (\text{cm dia}^{-1} \text{ ou mm dia}^{-1}) \quad (5)$$

Para a taxa de crescimento relativa:

$$\blacksquare TCR = \frac{\ln A2 - \ln A1}{\ln t1 - \ln t2} \quad (\text{cm cm}^{-1} \text{ dia}^{-1} \text{ ou mm mm}^{-1} \text{ dia}^{-1}) \quad (6)$$

Onde A2 = altura ou diâmetro obtido ao final do período de estudo; A1 = altura ou diâmetro obtido no início do período de estudos; t2 - t1 = diferença de tempo entre as amostragens.

Quando as plantas atingiram a fase de colheita, os seguintes componentes de produção foram avaliados: diâmetro da cabeça (DC), número de aquênios por cabeça (NAC), número de aquênios viáveis (NAV), porcentagem de aquênios inviáveis (PAIV), peso de cem aquênios (P100A), considerando apenas aquênios viáveis, de acordo com a metodologia proposta por Brasil (2009), e produção de aquênios por planta (PAP). Após a colheita (100 DAS), foram

avaliadas as seguintes variáveis: fitomassa do caule (FC), fitomassa das folhas (FF), fitomassa da parte aérea (FPA) e fitomassa do capítulo (FCap), mediante secagem em estufa de circulação de ar, forçado a 65°C, até atingir massa constante e pesagem em balança de precisão.

Os dados obtidos foram avaliados mediante análise de variância pelo teste F, em nível de 5% e 1% de probabilidade; e, nos casos de significância, realizou-se análise de regressão polinomial linear e quadrática utilizando-se do software estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

A aplicação de todas as doses de biocarvão de cama de frango, com base no pH e na condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) no solo das unidades experimentais (Tabela 1) (Richards, 1954), tornou solos salinos (pH \leq 8,5; CEes > 4,0 dS m⁻¹). No entanto, o aumento do pH do solo pôde promover a disponibilidade de vários elementos químicos para as plantas, enquanto outros elementos tornam-se insolúveis, precipitando-se no solo.

Os teores de cloreto, bicarbonato, sódio e potássio tiveram a mesma tendência que CEes, que aumentaram 33,9%, 65,6%, 51,1% e 91,8%, respectivamente, em relação ao solo sem tratamentos e controle de biocarvão. Porém, houve redução dos teores de cálcio e magnésio no extrato de saturação com doses crescentes de biocarvão, fato que influenciou o aumento da razão de adsorção de sódio (RAS).

Segundo alguns pesquisadores, a RAS pode promover aumento do desequilíbrio nutricional, pela dificuldade de absorção de cálcio, magnésio e potássio, devido ao aumento da proporção de sódio na solução do solo. É provável que a reação de biocarvão, rico em cálcio, magnésio, sódio, potássio e compostos orgânicos no solo (geralmente tem uma área de superfície maior) tenha

causado maior capacidade de troca catiônica, ou seja, aumento da adsorção de cálcio e magnésio, liberando os cátions trocáveis sódio e potássio da solução do solo.

Tabela 1 - Valores médios dos atributos químicos do solo cultivado com girassol em função de doses de biocarvão de cama de frango

ATRIBUTOS	B1	B2	B3	B4
EXTRATO DE SATURAÇÃO (mmol_c L⁻¹)				
pHps	5,98	7,07	7,90	8,28
CEes (dS m ⁻¹)	3,31	7,28	9,50	9,32
Cloreto (Cl ⁻)	33,32	47,73	50,44	50,43
Carbonato (CO ₃ ²⁻)	0	0	0	0
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	2,44	2,95	5,36	7,09
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	P	P	P	P
Cálcio (Ca ²⁺)	7,04	7,63	3,82	3,97
Magnésio (Mg ²⁺)	28,13	35,44	26,98	22,84
Sódio (Na ⁺)	16,98	31,03	37,01	34,71
Potássio (K ⁺)	4,23	24,11	44,00	51,66
RAS	4,05	6,69	9,43	9,48

B1= 0; B2 400 g/vaso; B3 = 800 g/vaso; B4 = 1100g/vaso; pHPS - pH da pasta de saturação; CEes- Condutividade elétrica do extrato de saturação; RAS- Razão de adsorção de sódio. Elaborado pelos autores.

Conforme a análise estatística, o número de folhas de girassol foi significativamente influenciado apenas pelas doses de NPK aos 60 DAS e por doses de biocarvão aos 30 e 60 dias após a semeadura (DAS). Assim, o efeito do NPK teve um comportamento quadrático, mostrando que, até a dose de 34,2% da adubação recomendada (18 folhas), houve aumento no número de folhas de 3,9% em relação à menor dose (dose 0). Posteriormente a partir

desse ponto, houve uma redução de 14,3% em comparação com a dose de 100% (N: P: K, 100: 300:150 mg kg⁻¹) da recomendação.

A adubação com biocarvão de cama de frango reduziu linearmente o número de folhas de girassol aos 30 e 60 DAS, de 34,5% e 20,6%, respectivamente, em comparação com as plantas cultivadas sem fertilizante com biocarvão (dose 0) e a dose de 1.100 g/vaso. O maior número de folhas foi obtido quando as plantas foram cultivadas sem fertilizante com biocarvão (19 folhas). Tais resultados podem estar relacionados aos efeitos negativos do estresse salino causado pela adubação com biocarvão de cama de frango. De acordo com a equação de regressão, as doses de NPK tiveram efeito quadrático na altura da planta do girassol aos 90 DAS, ou seja, desde a menor dose (97,5 cm) até uma dose de 33,3% NPK foi aumentado em 3,9%. A partir deste ponto, houve uma queda de 15,5%; esses resultados mostraram que, sob as condições desta pesquisa, a recomendação de adubação adotado para o girassol foi muito superior às necessidades da cultura.

Os resultados relativos à altura das plantas de girassol de acordo com as doses de biocarvão foram ajustados ao linear modelo, indicando que a altura das plantas diminuiu à medida que aumentou o nível de biocarvão aos 60 DAS.

Os menores valores estimados de altura de plantas para plantas cultivadas sob adubação de 1.100 g/vaso foram de 61,4 cm, o que correspondeu a um decréscimo de 30,8% em relação às plantas que não receberam adubação. Esses resultados podem estar relacionados ao aumento da salinidade do solo, CEes, evidenciada pelos valores elevados. Além disso, excesso de sais no solo pode reduzir a absorção de nitrogênio de plantas, enquanto os níveis de Cl absorvido e retido aumentaram, promovendo

menor crescimento (Bosco *et al.*, 2009). Outros tratamentos de NPK e biocarvão que não foram discutidos acima não mostraram nenhum efeito significativo na altura da planta.

Aos 60 DAS, o diâmetro do caule de plantas de girassol submetidas à adubação com 0 e 400 g/vaso de biocarvão foi exponencialmente relacionado às equações de regressão (Tabela 2). Neste caso, o diâmetro do caule aumentou até a dose de 55,7% de biocarvão (11,68 mm) e 46,8% (10,05 mm) da recomendação NPK, respectivamente.

Tabela 2 - Equações de regressão do diâmetro do caule do girassol aos 60 e 90 dias após a semeadura (DAS) e diâmetro da cabeça do girassol (DC) devido a doses de NPK e biocarvão de cama de frango

BIOCARVÃO (g/ VASO)	DIÂMETRO DO CAULE AOS 60 DIAS (MM)		
	EQUAÇÕES	R ²	MÉDIA
0	$Y = 7,3487 + 0,1559 * x - 0,0014 ** x^2$	0,8763	10,08
400	$Y = 8,7411 + 0,562x - 0,0006 * x^2$	0,6252	9,28
800	$Y = 9,2338 - 0,0179 * x$	0,6711	8,34
1100	$Y = 9,085 - 0,025 * x$	0,4099	7,83
Diâmetro do caule aos 90 dias (mm)			
	Equações	R ²	Média
0	$Y = 8,1634 + 0,1497x - 0,0013 ** x^2$	0,8830	10,81
800	$Y = 11,461 - 0,0263 ** x$	0,7565	10,14
1100	$Y = 10,939 - 0,0352 ** x$	0,7565	10,14
Diâmetro da cabeça (cm)			
	Equações	R ²	Média
0	$Y = 6,3268 + 0,1139 ** x - 0,0009 ** x^2$	0,816	8,54
1100	$Y = 7,2476 + 0,0721 ** x - 0,001 ** x^2$	0,799	7,28

(**), (*) significativo para ($p \leq 0,01$) e ($p \leq 0,05$); Y = diâmetro da cabeça (cm); x = Doses de NPK (%). Elaborado pelos autores.

Os valores mais baixos de diâmetro do caule foram observados em plantas adubadas com 100% de recomendação NPK. No entanto, o diâmetro do caule das plantas submetidas à adubação com 800 e 1.100 g/vaso de biocarvão diminuiu linearmente, de acordo com as equações de regressão, mostrando redução de 19,38% e 27,5%, respectivamente, quando comparado a dose menor e maior de adubação NPK. O diâmetro do caule aos 90 DAS foi o que melhor se adaptou para o modelo quadrático, quando as plantas não receberam adubação com biocarvão (dose 0), em que a dose de 57,6% (12,47 mm) de recomendação do NPK aumentou o caráter em 34,5%, em relação à menor dose. A partir deste ponto, houve redução de 18,7% em relação à dose de 100% da recomendação de NPK. As doses de 800 e 1.100 g/vaso de biocarvão afetaram as equações de regressão linear e reduziram o diâmetro do caule em 22,9% e 32,2%, respectivamente, quando comparado à menor e maior dose de NPK recomendado. Em relação às plantas que receberam a dosagem de 400 g/vaso de biocarvão, como mostraram os estudos de regressão, não houve efeito significativo no diâmetro do caule, chegando a um valor médio de 10,4 mm, fato relacionado aos efeitos do estresse salino, como os citados anteriormente.

Com a interação significativa entre as doses de NPK (fatores) × doses de biocarvão no diâmetro da cabeça, de acordo com as equações de regressão (Tabela 2), houve aumento no diâmetro da cabeça até a dose de 63,3% (9,9 cm) e 36,0% (8,55 cm) do NPK recomendado, com dose de 0 e 1.100 g/vaso de biocarvão, respectivamente. O menor valor estimado foi observado em plantas adubadas com 100% da recomendação NPK.

As plantas que receberam a dosagem de 400 e 800 g/vaso de biocarvão (de acordo com estudos de regressão) não mostraram efeito significativo no diâmetro da cabeça, sendo alcançados, em média, valores de 8,9 e 7,7 cm, respectivamente. Quanto ao crescimento, o diâmetro da cabeça do girassol também foi significativamente reduzido com a aplicação de biocarvão, principalmente devido ao aumento da salinidade do solo. Segundo Nobre *et al.* (2010), o aumento da salinidade causa uma redução na disponibilidade de água para as plantas e, conseqüentemente, a redução do diâmetro da cabeça do girassol.

Como mostra a equação de regressão, houve um efeito quadrático no número de aquênios para cada cabeça, com base nas doses de NPK. O valor mais alto foi observado na dose de 51,6% (430 aquênios) da dose recomendada, o que promoveu aumento de 32,4% em comparação com as doses mais baixas. Nota-se também que, a partir deste ponto, há uma redução de 28,5% no número de aquênios por cabeça, em relação às plantas que recebem 100% da recomendação do NPK. Tais resultados estão relacionados ao maior diâmetro da cabeça do girassol obtido próximo a 50% da dose recomendada de NPK. O maior diâmetro da cabeça do girassol favorece a maior formação de flores e, por sua vez, também mais aquênios.

Os resultados do número de aquênios de girassol por cabeça, em função das doses de biocarvão, se ajustaram melhor ao modelo linear. Como mostra a equação de regressão, houve redução de 35,7% no número de aquênios por cabeça quando em comparação com as doses 0 e 1.100 g/vaso. O número de aquênios por cabeça variou 296-440 unidades. O aumento da salinidade do solo,

devido às altas doses de biocarvão, também afetou o número de aquênios por cabeça de girassol.

Os dados sobre o peso de cem aquênios se ajustaram ao modelo quadrático, atingindo assim o ponto máximo na dose de 39,8% da recomendação do NPK, correspondendo a um incremento de 9,5% em comparação com a dose mais baixa. O peso dos cem aquênios variou de 3,9 a 4,9 g, no entanto, esses valores são inferiores aos relatados por Jahangir *et al.* (2006), que observaram variação de 5,0 a 5,7 g e valores máximos obtidos com a combinação de 120 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Os resultados do teste 'F' (Tabela 3) a respeito dos efeitos significativos da adubação com NPK nos parâmetros avaliados estão relacionados à baixa demanda nutricional do girassol na fase vegetativa.

A dose de 50% da recomendação de adubação com NPK promoveu, aos 60 DAS, um incremento na área foliar (AF) de 28,90% (1285,83 cm²) em relação ao tratamento sem adubação (D0) (914,22 cm²). A partir da dose de 50% (D3), houve uma redução de 30,14% em relação às plantas que receberam a dose de 100% da recomendação (898,22 cm²) (Figura 1A). A maior disponibilidade de nutrientes proporciona maior crescimento vegetal e, conseqüentemente, maior expansão do limbo foliar. Entretanto, quando foi aplicada a dose de 100% da recomendação, ocorreu redução muito acentuada em relação à dose máxima estimada. Esse resultado pode estar relacionado à recomendação de a adubação ter sido realizada com base na massa de solo do vaso, o que pode ter proporcionado uma dose acima das exigências da cultura.

Tabela 3 - Resumo do teste 'F' para número de área foliar (AF) aos 30 e 60 dias após a semeadura (DAS), área foliar específica (AFE), razão de área foliar (RAF), fitomassa de folhas (FF), fitomassa do caule (FC), fitomassa do capítulo (FCap), fitomassa da parte aérea (FPA), alocação de fitomassa foliar (AFF), alocação de fitomassa caulinar (AFC), alocação de fitomassa do capítulo (AFCap) em função de doses de NPK e biocarvão de cama de frango

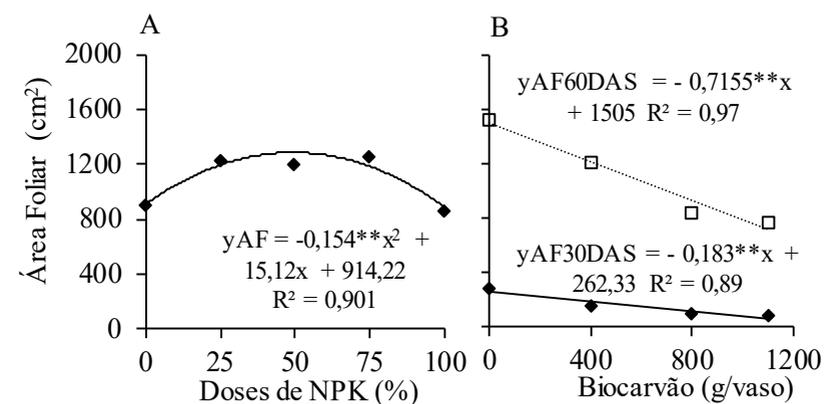
FONTES DE VARIACÃO	TESTE F							
	AF (CM ²)		RAF	AFE	FF	FC	FCAP	FPA
	30 DAS	60 DAS						
Doses (D)	ns	**	ns	ns	**	**	**	**
Biocarvão (B)	**	**	**	**	ns	ns	ns	ns
D x B	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	29,59	31,99	23,61	24,23	34,19	38,10	33,02	33,02

(**), (*); (ns) significativos a ($p \leq 0,01$) e ($p \leq 0,05$) e não significativo, respectivamente análise estatística realizada após transformação de dados em \sqrt{x} .

Elaborado pelos autores.

Aos 30 e 60 DAS, a área foliar do girassol reduziu linearmente em função do incremento das doses de biocarvão (Figura 1B), sendo, respectivamente, os menores valores de 60,59 e 717,95cm² com a dose de 1100 g/vaso. Observou-se também que a adubação com biocarvão promoveu redução de 76,90 e 52,29%, respectivamente, aos 30 e 60 DAS, quando comparada à menor e à maior dose. Tais resultados podem ser atribuídos ao efeito do excesso de sais presentes no solo (Tabela 1), que, conforme Taiz e Zeiger (2013), pode promover alterações na fisiologia vegetal, as quais são, muitas vezes, acompanhadas por modificações morfológicas e anatômicas, como redução do crescimento e de sua área foliar, estando associados, sobretudo, à redução da pressão de turgor, a qual interfere nos processos de alongamento e divisão celular.

Figura 1 - Área foliar do girassol aos 60 DAS em função de doses de NPK - % (A) e aos 30 e 60 DAS em função de doses de biocarvão de cama de frango - g/vaso (B)

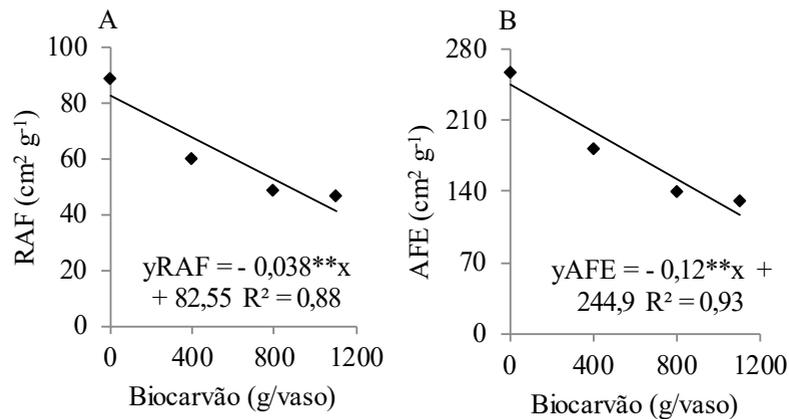


Elaborado pelos autores.

O incremento das doses de biocarvão de cama de frango promoveu redução linear da razão de área foliar (RAF) e área foliar específica (AFE) (Figura 2A e B), sendo os menores valores, respectivamente, de 41,08 e 117,17 cm² g⁻¹ com a dose de 1100 g/vaso. Observou-se também que a adubação com biocarvão promoveu redução de 50,24% e 52,15%, respectivamente, quando comparada à menor e à maior dose.

A RAF e a AFE representam, respectivamente, a relação entre a área foliar e a fitomassa da parte aérea e a fitomassa das folhas, ou seja, a área foliar útil para realizar captura da radiação fotosinteticamente ativa (Benincasa, 2004). Nesse sentido, essas variáveis são ecofisiologicamente importantes para a compreensão das relações hídricas das plantas e o ciclo de carbono.

Figura 2 - Razão de área foliar - RAF (A) e área foliar específica - AFE (B) do girassol em função de doses de biocarvão de cama de frango (g/vaso)



Elaborado pelos autores.

Assim, a redução da RAF e da AFE com o incremento das doses de biocarvão pode ser um indicativo do aumento do estresse hídrico promovido pelo incremento da salinidade do solo, o que pode ter reduzido a quantidade de fotoassimilados destinados às folhas. Diante disso, a redução da disponibilidade de água no solo em função do excesso de sais solúveis provoca redução na absorção, reduzindo a pressão de turgor na célula e, conseqüentemente, havendo menor expansão foliar e acúmulo de fotoassimilados nos tecidos vegetais (Taiz; Zeiger, 2013). Apesar de as doses de biocarvão terem limitado o crescimento do girassol, comprovado pelas reduções de AF, RAF e AFE, a produção de fitomassa se manteve constante dentro dos níveis de adubação com biocarvão. Os maiores valores de fitomassa de folhas (FF), fitomassa do caule (FC),

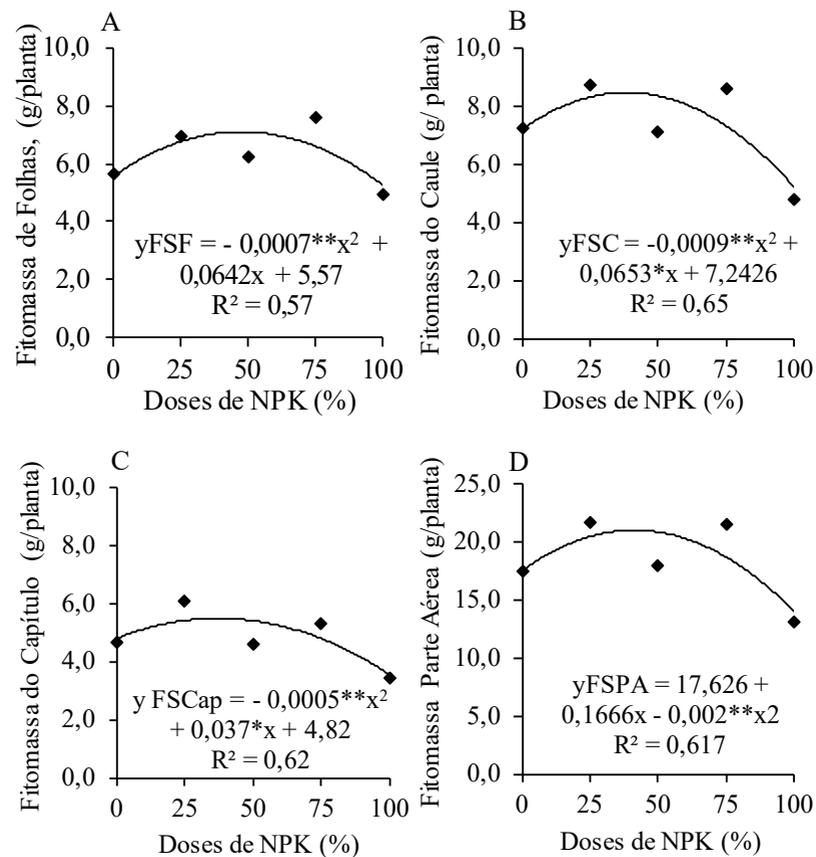
fitomassa do capítulo (FCap) e fitomassa da parte aérea (FPA) foram de 7,04; 8,42; 5,51 e 21,09 g/planta, respectivamente, com as doses de 45,86; 36,28; 37,10 e 41,65% da recomendação de NPK (Figuras 3A, B, C e D). Constata-se, ainda, que a adubação com 100% (100:300:150 mg kg⁻¹) da recomendação promoveu redução de FF, FC, FCap e FPA de 31,73; 43,32; 35,98 e 32,26%, respectivamente, em referência à dose de máxima eficiência. Tais resultados evidenciam novamente que a recomendação adotada (Novais *et al.*, 1991) para as condições de desenvolvimento da pesquisa foi superior às necessidades nutricionais do girassol; ademais, o maior acúmulo de matéria seca do girassol se situou próximo à dose de 50% da recomendação, mesma tendência observada para a AF (Figura 1).

O incremento de fitomassa promovido pelos maiores níveis de adubação com NPK decorreu provavelmente do aumento da taxa de crescimento da cultura em virtude da maior produção de fotoassimilados e índice de área foliar.

O efeito significativo de biocarvão de cama de frango e da adubação com NPK sobre as taxas de crescimento absoluto e relativo da altura das plantas e do diâmetro caulinar pode ser observado na Tabela 4. Esses resultados mostram que o aumento de biomassa em função do tempo (taxa de crescimento) permaneceu constante em todos os níveis de adubação.

Em função das doses crescentes de NPK (Figura 4), os maiores valores da TCA-DC foram obtidos com a dose de 60% da recomendação (0,1902 mm dia⁻¹), sendo que o incremento proporcionado entre as doses de 0 e 60% da recomendação foi de 18,93%.

Figura 3 – Fitomassa seca de folhas – FSF (A), fitomassa seca do caule – FSC (B), fitomassa seca do capítulo – FSCap (C) e fitomassa seca da parte aérea – FSPA (D) do girassol, em função de doses de NPK - %



Elaborado pelos autores.

Tabela 4 – Resumo do teste 'F' para taxa de crescimento absoluto e relativo da altura de plantas (TCA-AP e TCR-AP) e diâmetro do caule (TCA-DC e TCR-DC) do girassol nos períodos de avaliação realizados entre 30-60 e 60-90 dias após a semeadura (DAS) em função de doses de NPK e biocarvão de cama de frango

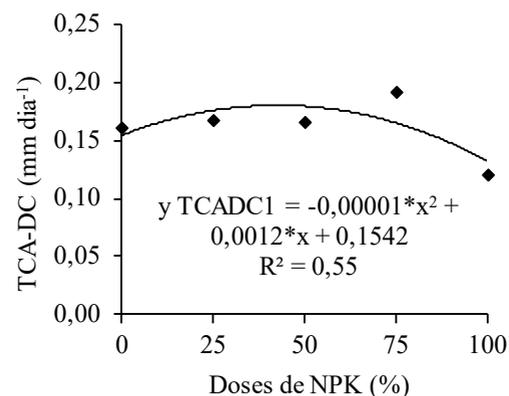
TAXA DE CRESCIMENTO	FONTE DE VARIAÇÃO	TESTE F			
		TCA - AP	TCA - DC	TCR - AP	TCR - DC
30 - 60 DAS	Doses (D)	ns	**	ns	Ns
	Biocarvão (B)	**	*	*	-
	Reg. Linear	**	*	*	-
	Reg. Quadrática	ns	ns	*	Ns
	D x B	ns	ns	ns	Ns
	CV (%)	22,25	30,61	14,67	33,06
		TCA - AP ¹	TCA - DC ¹	TCR - AP ¹	TCR - DC ¹
60 - 90 DAS	Doses (D)	ns	ns	ns	Ns
	Biocarvão (B)	**	-	**	-
	Reg. Linear	**	-	**	-
	Reg. Quadrática	*	ns	*	Ns
	D x B	ns	ns	ns	Ns
	CV (%)	42,47	37,85	45,84	35,56

(**), (*); (ns) significativos ($p < 0,01$) e ($p < 0,05$) e não significativo respectivamente; análise estatística realizada após transformação de dados em \sqrt{X} .

Elaborado pelos autores.

A partir daquele ponto, houve uma redução de 8,41%. Com base nesses resultados, verifica-se que possivelmente a recomendação de adubação adotada foi superior ao requerimento da cultura, tendo, em média, ponto de máxima na dose de 50% (50:150:75 mg kg⁻¹) da recomendação de NPK.

Figura 4 - Taxa de crescimento absoluto do diâmetro do caule (TCA-DC) no período de avaliação realizado entre de 30-60 dias após a semeadura do girassol (DAS) em função de doses de NPK (%)



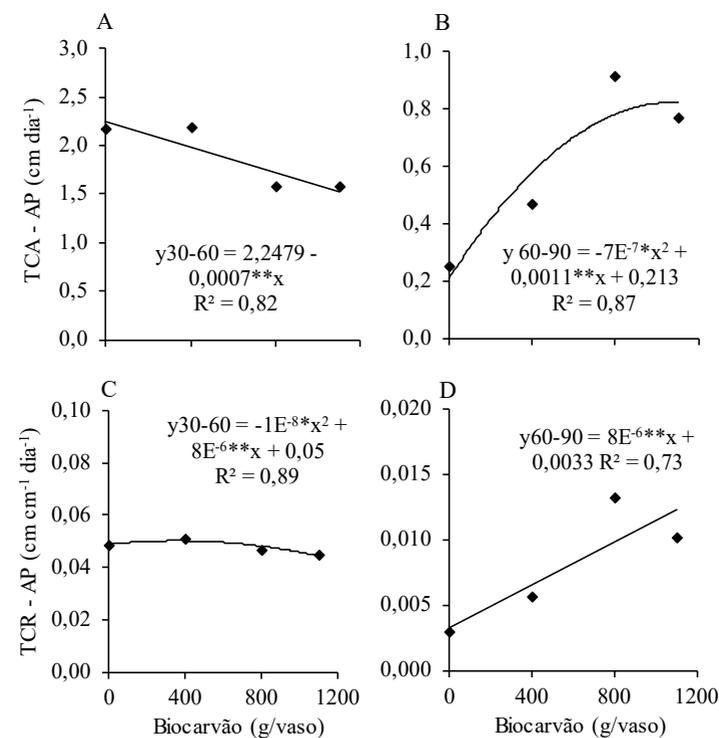
Elaborado pelos autores.

O incremento das doses de biocarvão promoveu redução linear da taxa de crescimento absoluto da altura de planta do girassol (TCA-AP) no período de 30 a 60 DAS (Figura 5A). Os menores valores de TCA-AP foram de 1,48 cm dia⁻¹ quando as plantas receberam adubação com 1100 g/vaso de biocarvão, o que correspondeu a um decréscimo de 34,25% em relação às plantas que não haviam sido adubadas com biocarvão (2,25 cm dia⁻¹). Tais resultados estão relacionados ao efeito do estresse salino decorrente da adubação com biocarvão, conforme verificado na Tabela 1.

Verifica-se, porém, com base nos estudos de regressão para TCA-AP, no período de 60 a 90 DAS (Figura 5B), que o modelo que melhor se ajustou foi o quadrático, indicando que o aumento da dose de biocarvão até 785,7 g/vaso promoveu incremento da TCA-AP de 67,00% em relação às plantas que não haviam sido

adubadas. A partir deste ponto, há um decréscimo de 10,71% em relação à maior dose. Esses resultados podem ser justificados pela maior sensibilidade da cultura aos efeitos do estresse salino proporcionado pelo biocarvão na fase vegetativa, fato que pode estar relacionado à maior adaptação da cultura após os 60 DAS.

Figura 5 - Taxa de crescimento absoluto da altura de planta (TCA-AP) no período de avaliação realizado entre 30-60 dias após a semeadura do girassol - DAS (A) e 60-90 DAS (B); taxa de crescimento relativo da altura de planta (TCR-AP) aos 30-60 DAS (C) e aos 60-90 DAS (D) em função de doses de biocarvão de cama de frango - g/vaso



Elaborado pelos autores.

Conforme equações de regressão, observa-se efeito quadrático para a taxa de crescimento relativo da altura de planta do girassol no período de 30 a 60 DAS – TCR-AP (Figura 5C), em que a dose de biocarvão a partir de 400 g/vaso promoveu decréscimo de 9,72% da TCR-AP; no entanto, a TCR-AP no período de 60 a 90 DAS aumentou linearmente com o incremento das doses de biocarvão de cama de frango, sendo os maiores valores obtidos com a dose de 1100 g/vaso ($0,0121\text{cm cm}^{-1}\text{ dia}^{-1}$), o que promoveu incremento de 72,73% em relação às plantas que não receberam adubação com biocarvão (Figura 5D). Com base nesses resultados, observa-se que as taxas de crescimento relativo seguiram a mesma tendência observada para as taxas de crescimento absoluto (Figura 5A e B), constatando que, após os 60 DAS, houve possivelmente, maior adaptação da cultura às condições de estresse.

A adubação com biocarvão afetou significativamente o número de aquênios viáveis (NAV) e a produção de aquênios por planta (PROD). Houve também efeito significativo na interação entre os fatores D x B para PROD.

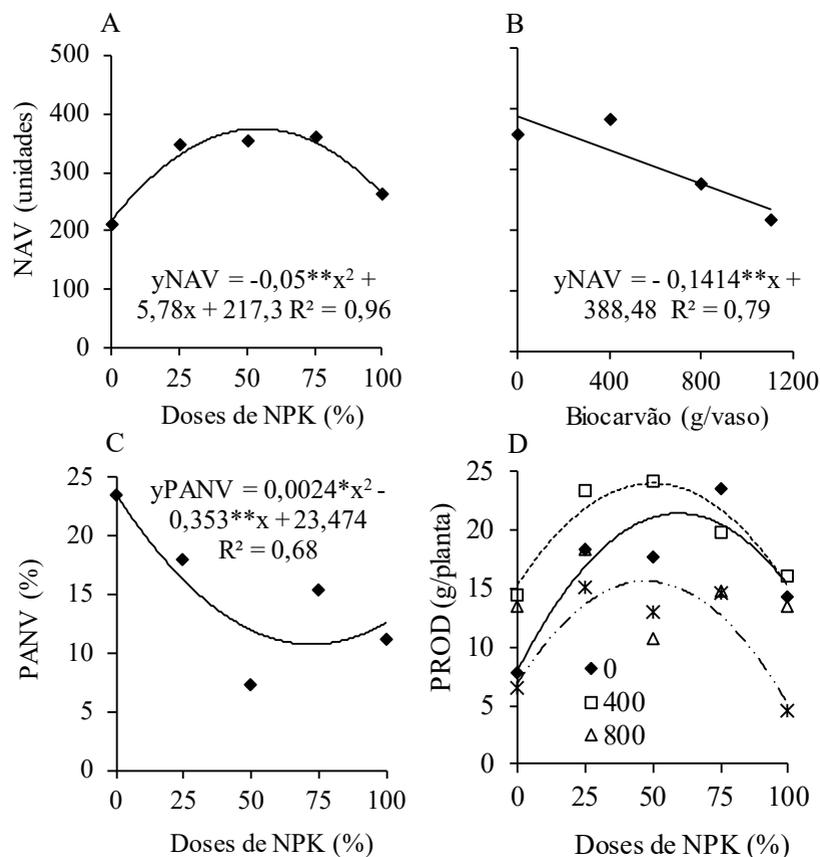
Conforme a equação de regressão (Figura 6A), verifica-se efeito quadrático sobre o número de aquênios viáveis do girassol (NAV) em função das doses de NPK, indicando que o aumento da dose até 54,48% (374 unidades) da recomendação de NPK promoveu incremento de 41,95% em relação à menor dose. Observa-se ainda que, a partir deste ponto, houve uma redução de 29,25% em relação às plantas que receberam 100% (N:P:K, 100:300:150 g/vaso) da recomendação. A adubação em torno de 50% da recomendação de NPK promoveu maior NAV, o que se justifica pela disponibilidade adequada de nutrientes, sobretudo na fase de floração (Estágio R1).

A adubação com biocarvão promoveu redução linear do NAV do girassol (Figura 6B), sendo os menores valores observados com a dose de 1100 g/vaso (233 unidades), o que correspondeu a uma redução de 40,03% em referência às plantas que não haviam sido adubadas com biocarvão (388 unidades). Novamente se observa o efeito do aumento da salinidade do solo decorrente da adubação com biocarvão.

Os resultados referentes à percentagem de aquênios não viáveis (PANV) em função das doses de NPK foram mais bem ajustados ao modelo quadrático decrescente, indicando que o aumento da adubação até a dose de 73,5% da recomendação promoveu redução da PANV de 55,23% em relação à menor dose e, a partir deste ponto, há um incremento de 13,78% em relação à dose de 100% da recomendação (Figura 6C). Esses resultados se justificam pela maior disponibilidade nutricional próximo à dose de 50% da recomendação. A PANV variou de 10,51% a 23,47%. Verifica-se, ainda, que a PANV, apresentou tendência oposta ao comportamento do NAV (Figura 6A), o que mostra coerência entre os resultados, ou seja, à medida que há incremento no NAV, ocorre redução da PANV, fato que se justifica porque as doses máximas estimadas foram próximas.

A interação entre os fatores (D x B) para a produção de aquênios por planta (PROD) pode ser observada na Figura 6D. Verifica-se, conforme equações de regressão (Tabela 5), efeito quadrático nas plantas submetidas à adubação com 0, 400 e 1100 g/vaso de biocarvão, observando incremento da PROD até a dose de 59,17% (21,29 g/planta), 49,60% (23,91 g/planta) e 48,06% (15,68 g/planta) da recomendação, respectivamente, sendo estimados os menores valores para as plantas adubadas com 100% (100:300:150 mg kg⁻¹) da recomendação de NPK.

Figura 6 - Número de aquênios viáveis - NAV em função de doses de NPK - % (A) e biocarvão de cama de frango - g/vaso (B); percentagem de aquênios não viáveis - PANV em função de doses de NPK - % (C); desdobramento da interação entre os fatores para produção de aquênios por planta - PROD (D)



Elaborado pelos autores.

Tabela 5 - Equações de regressão para a produção de aquênios por planta do girassol em função de doses de NPK e biocarvão de cama de frango

PRODUÇÃO POR PLANTA (G)			
BIOCARVÃO (g/VASO)	EQUAÇÃO	R ²	MÉDIA
0	$Y = -0,0038^{**}x^2 + 0,4497x + 7,97$	0,8258	16,34
400	$Y = -0,0035^{**}x^2 + 0,3472x + 15,31$	0,8939	19,62
1100	$Y = -0,0038^{**}x^2 + 0,3653x + 6,9056$	0,8583	10,80

(**), (*) significativos a ($p \leq 0,01$) e ($p \leq 0,05$); Y = produção de aquênios por planta (g/planta); x = doses de NPK (%). Elaborado pelos autores.

Em relação às plantas que receberam a dosagem de 800 g/vaso de biocarvão, observa-se, conforme estudos de regressão (Figura 6D), não haver efeito significativo sobre a PROD, sendo alcançado um valor médio de 14,21 g/planta. Tal como para os demais componentes de produção, observa-se que a maior PROD se situou próxima à dose de 50% da recomendação. Verifica-se também que, apesar de a adubação com biocarvão promover redução dos componentes de produção, comprovada pelos valores de NAV (Figura 6B), a dose de 400 g/vaso (19,62 g/planta) promoveu incremento na PROD de 16,72% em relação às plantas que não haviam sido adubadas com biocarvão (16,34 g/planta). Constata-se, ainda, que a dose de 1100 g/vaso (10,80 g/planta) promoveu redução de 44,95% na PROD em relação à dose de 400 g/vaso, em função, provavelmente, do excesso de sais no solo.

Conforme o exposto, pode-se concluir, resumidamente, que: a) a adubação com biocarvão de cama de frango a partir de 400 g/vaso e maior salinidade desencadeada do solo das unidades experimentais reduziu os componentes de crescimento e produção de girassol, mostrando as reduções no número de folhas

(NL), altura da planta (PH), diâmetro do caule (SD) e número de aquênios para cada cabeça (NAH); b) adubação com 50% da recomendação do NPK (50:150:75 mg kg⁻¹) foi o melhor tratamento e promoveu os valores de crescimento e componentes de produção, quando comparada com outros NPK tratamentos; c) a combinação de 50:150:75 mg kg⁻¹ (50%) de adubação NPK e 1.100 g/vaso de biocarvão de cama de frango produziu maior diâmetro de cabeça (HD) de girassol; d) a adubação com 50% da recomendação de NPK (50:150:75 mg kg⁻¹) promoveu os maiores valores de área foliar e produção de fitomassa das plantas de girassol, quando comparada com os demais tratamentos a níveis de NPK; e) a aplicação de doses crescentes de biocarvão de cama de frango promoveu redução da área foliar, da razão de área foliar e da área foliar específica do girassol; f) a adubação com biocarvão promoveu aumento nas taxas de crescimento do girassol nas épocas de avaliação; g) a adubação com 400 g/vaso de biocarvão promoveu um aumento de 16,72% na produção de aquênios por planta; h) a combinação de 50:150:75 mg kg⁻¹ de NPK e 400 g/vaso de biocarvão promoveu maior produtividade de girassol (23,91 g/planta).

ESTUDO DE CASO 2

Crescimento do gergelim em função da adubação com NPK e biocarvão de cama de frango (Furtado, et al. 2016)⁴

Objetivando avaliar o efeito da fertilização com NPK associado a doses de biocarvão de cama de frango sobre o crescimento

⁴ . FURTADO, G. F.; CHAVES, L. H. G.; LIMA, G. S.; ANDRADE, E. M. G.; SOUZA, L. P. Growth of sesame in function fertilization with npk and poultry litter biochar. **International Journal of Current Research**, v. 8, n. 9, p. 38499-38504, 2016.

inicial do gergelim cv. BRS Seda, foi desenvolvido um experimento em ambiente protegido (LIS/UAEA/CTRN/UFMG) sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 5 x 4, constituídos por cinco doses de adubação mineral com N, P e K (D1 = 0; 0 e 0 mg kg⁻¹; D2 = 13,5; 50,0 e 14,0 mg kg⁻¹; D3 = 27,5; 100,0 e 27,5 mg kg⁻¹; D4 = 41,0; 150,0 e 41,5 mg kg⁻¹; D5 = 54,5; 200,0 e 55,0 mg kg⁻¹), associados a quatro doses de adubação com biocarvão de cama de frango (0; 20 g kg⁻¹; 40 g kg⁻¹ e 55 g kg⁻¹), calculadas com base no volume de solo. Foram utilizados vasos plásticos com 20 L de capacidade, os quais foram preenchidos com 20 kg de solo classificado como areia franca, não salino e não sódico, proveniente do município de Campina Grande-PB e retirado na camada de 0-20 cm, cujos atributos físico-químicos foram determinados conforme metodologia proposta pela Embrapa (2011) (Tabela 1).

Tabela 1 - Atributos físico-químicos do solo utilizado no experimento

CT	DS	PT	PH	M.O.	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺ +Al ³⁺	CTC
	g cm ⁻³	%	(H ₂ O)	--mg dm ⁻³ --		-----cmol _c dm ⁻³ -----					
AREIA FRANCA	2,71	52,03	6,4	4,8	4,6	2,10	2,57	0,06	0,14	4,05	6,65

CT – Classificação textural; Ds – Densidade do solo; PT – Porosidade Total; M.O. – Matéria orgânica; P – Fósforo disponível; CTC – Capacidade de troca catiônica; P, K, Na: extrator Mehlich; Al, Ca, Mg: extrator KCl 1,0 mol L⁻¹; H+Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0; M.O.: Digestão Úmida Walkley-Black. Elaborado pelos autores.

O biocarvão, produzido a partir do processo de pirólise convencional da cama de frango (450°C x 0,5 hora x pressão atmosférica), apresentou os seguintes atributos químicos, conforme

metodologia proposta pela EMBRAPA (2009): pH (H₂O) = 10,1; N = 42,31 g kg⁻¹; P = 32,56 g kg⁻¹; K⁺ = 48,56 g kg⁻¹; Ca²⁺ = 57,75 g kg⁻¹; Mg = 12,40 g kg⁻¹; Na = 14,37 g kg⁻¹; Fe = 137,00 g kg⁻¹; Cu = 812,00 g kg⁻¹; Zn = 700,00 g kg⁻¹; Mn = 862,00 g kg⁻¹.

O solo foi incubado com o biocarvão por um período de 20 dias, mantendo a umidade de 80% da capacidade máxima de retenção de água, conforme a pesagem de vasos. Após esse período, foi aplicada a cada unidade experimental a adubação com ureia, fosfato monoamônico (MAP) e cloreto de potássio (KCl), de acordo com cada tratamento. O MAP foi aplicado a cada sete dias, a partir dos 25 dias após a semeadura (DAS), e o potássio foi aplicado aos 30 DAS, via solução. Cada unidade experimental recebeu quinze sementes da cultivar de gergelim BRS Seda, tendo realizado raleio para manter uma planta por vaso.

As avaliações foram realizadas aos 30 e 45 DAS, em que se determinou a altura de plantas (AP) em cm, aferindo-se a partir da superfície do solo até a inserção do meristema apical; diâmetro do caule (DC) em mm, aferindo-se a 0,02 m do colo da planta; número de folhas por planta (NF), determinada por contagem; área foliar (AF) em cm², mensurada pelo método não destrutivo, empregando a metodologia proposta por Silva *et al.* (2002), conforme a equação 1:

$$\blacksquare AF = C \times L \times F \quad (1)$$

Em que AF= área foliar (cm²); C= comprimento da nervura central das folhas de cada planta (cm); L= largura da folha (cm); F= fator de correção (0,7).

Ao final do experimento, as plantas foram cortadas rente ao solo e foi determinada a fitomassa da parte aérea (FPA), após se-

cagem em estufa de circulação de ar forçado a 65°C até peso constante. Da mesma forma, foram retiradas amostras de solo de cada unidade experimental, secas ao ar, peneiradas (2 mm de abertura); e determinados os teores de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, CO₃⁻, HCO₃⁻, SO₄⁻, Cl⁻, CE_{es} e pH_{es} do extrato de saturação, conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (2011).

Os dados obtidos foram avaliados mediante análise de variância pelo teste 'F' ao nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade e, nos casos de significância, realizou-se análise de regressão polinomial linear e quadrática utilizando o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

As doses de NPK tiveram efeito significativo sobre AP, DC, NF e AF do gergelim somente aos 45 DAS. Antes desse período, por exemplo aos 30 DAS, não houve diferença significativa, devido ao fato de não terem sido aplicado tais nutrientes nas unidades experimentais. De acordo com Arriel *et al.* (2006), os picos de absorção de potássio (K) e de nitrogênio (N) pelo gergelim ocorrem entre 35 dias após a emergência e o final do ciclo; e entre os 30 e 74 dias após a emergência, respectivamente.

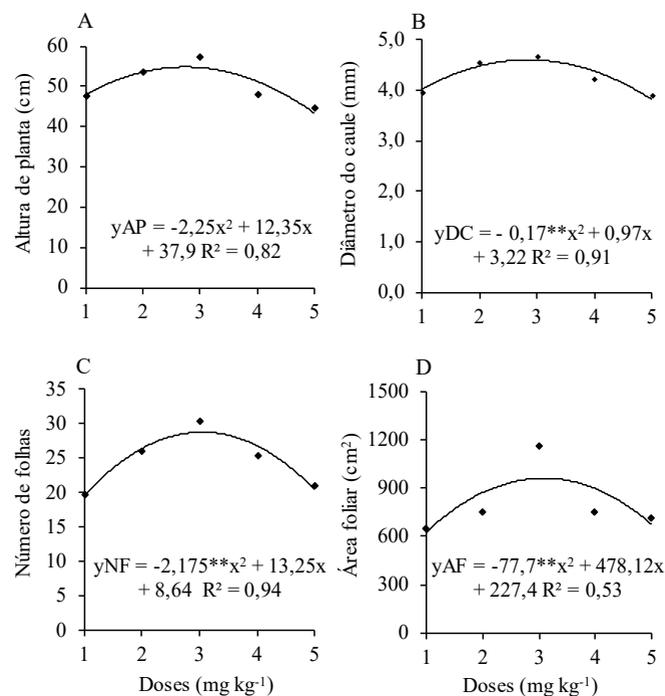
O biocarvão afetou significativamente todas as variáveis nas duas épocas de avaliação, todavia não houve efeito significativo da interação entre os fatores Adubação mineral x Biocarvão para nenhuma variável analisada.

Os maiores valores de altura de plantas (57,27 cm) e de diâmetro do caule do gergelim (4,66 mm) foram observados com a dose 3 (N:P:K = 27,5; 100,0; 27,5 mg kg⁻¹) de NPK, o que correspondeu a um incremento, respectivamente, de 20,09% e 17,38% em relação à menor dose (47,69 cm; 3,97 mm). Como a adubação mineral teve efeito quadrático sobre essas variáveis, a partir da dose 3 (N:P:K = 27,5; 100,0; 27,5 mg kg⁻¹) até a dose 5 (54,5; 200,0;

55,0 mg kg⁻¹ de NPK), houve uma redução de 22,24% na altura de plantas e de 16,52% no diâmetro do caule (Figuras 1A e B).

O comportamento do número de folhas por planta e área foliar do gergelim em função de doses de NPK se ajustou ao modelo quadrático (Figuras 1C e D), em que se observa que os maiores valores destas variáveis, 30 folhas e 1159,87 cm², foram obtidos com a dose 3 (27,5; 100,0; 27,5 mg kg⁻¹ de NPK); e os menores com a dose 5 (54,5; 200,0; 55,0 mg kg⁻¹ de NPK; 21 folhas por planta e 714,23 cm² de área foliar), havendo uma redução de 30,53% e 38,42%, respectivamente.

Figura 1 - Altura de plantas (A), diâmetro do caule (B), número de folhas por planta (C) e área foliar (D) do gergelim aos 45 DAS em função de doses de NPK (mg kg⁻¹)



Elaborado pelos autores.

O efeito quadrático das doses de biocarvão sobre a altura de plantas aos 30 DAS (Figura 2A) mostrou que a maior altura atingida, 22,40 cm, correspondeu à dose de 11,21 g kg⁻¹, o que proporcionou um aumento de 2,99% em relação ao tratamento em que não foi aplicado biocarvão (21,74 cm).

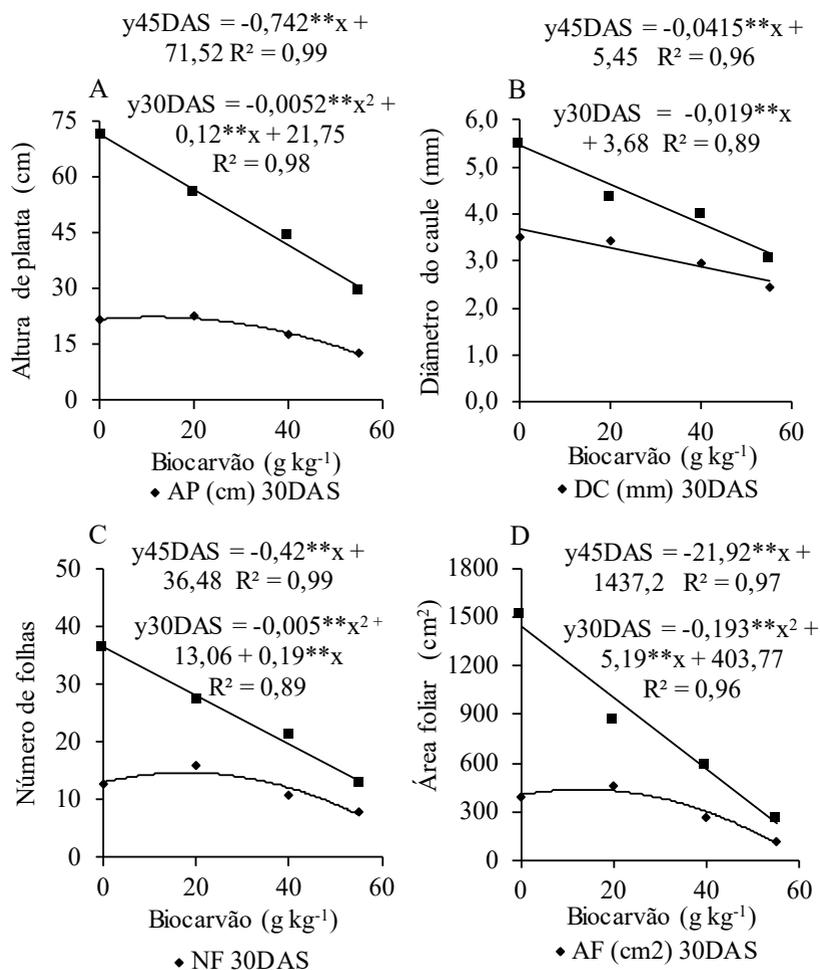
Observa-se ainda que, a partir desse ponto (maior altura), houve redução de 44,50% em relação à dose de 55 g kg⁻¹ de biocarvão (12,43 cm). Todavia, aos 45 DAS, a aplicação das doses crescentes de biocarvão promoveu redução linear da altura de planta, atingindo o menor valor, com a dose de 55 g kg⁻¹ (30,71 cm), o que correspondeu a um decréscimo de 57,05% em relação à altura das plantas que não receberam biocarvão (71,51 cm).

A aplicação de doses crescentes de biocarvão proporcionou redução linear do diâmetro de caule aos 30 e 45 DAS (Figura 2B). Os menores valores desta variável, 2,58 e 3,16 mm, respectivamente aos 30 e 45 DAS, foram observados com a dose de 55 g kg⁻¹, o que correspondeu a uma redução, respectivamente, de 29,74% e 41,88% em relação à ausência de biocarvão no solo.

O número de folhas e a área foliar das plantas do gergelim, aos 30 DAS, variaram de forma quadrática em função de doses de biocarvão, atingindo 15 folhas e 438,59 cm² com as doses respectivas de 17,67 g kg⁻¹ e 13,42 g kg⁻¹. Estes valores corresponderam a um incremento, respectivamente, de 12,66% e 8,62% em relação à ausência de biocarvão (Figuras 2C e 2D). A partir destes maiores valores até a dose de 55 g kg⁻¹, houve uma redução do número de folhas e da área foliar, respectivamente, de 50,17% e 76,24%. No entanto, aos 45 DAS, verificou-se redução linear do número de folhas e da área foliar em função das doses crescentes de biocarvão (Figuras 2C e 2D), encontrando os menores valores em torno de 13 folhas e área foliar 231,65 cm² em relação à maior

dose de biocárvão, o que correspondeu a uma redução de 63,03% e 83,88% em relação à ausência de biocárvão.

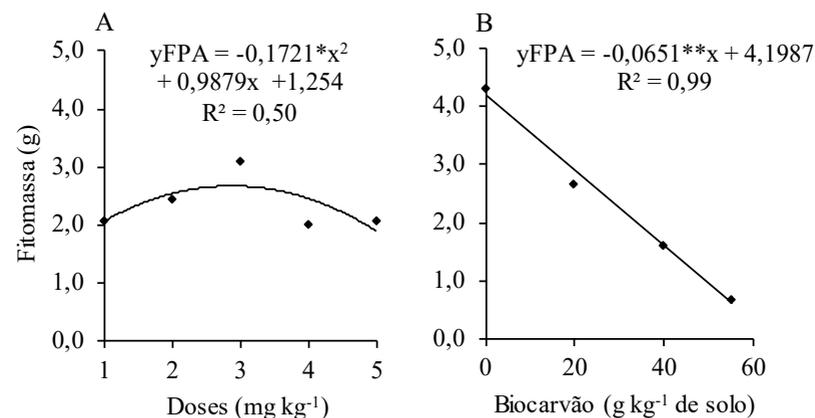
Figura 2 - Altura de plantas (A), diâmetro do caule (B), número de folhas por planta (C) e área foliar (D) do gergelim aos 30 e 45 DAS em função de doses de biocárvão de cama de frango (g kg⁻¹)



Elaborado pelos autores.

Com base na equação de regressão, verifica-se efeito quadrático para a fitomassa da parte aérea (FPA) em função das doses de NPK (Figura 3A). Observa-se incremento da FPA (2,67 g) até a dose 3 (27,5; 100,0; 27,5 mg kg⁻¹ de NPK), o que correspondeu a um incremento de 53,01% em relação à dose 1 (sem adubação); a partir desse ponto, houve redução de 29,14% até a dose 5 (54,5; 200,0; 55,0 mg kg⁻¹ de NPK). Tais resultados estão de acordo com os reportados por Perin *et al.* (2010), os quais também verificaram efeito quadrático para essa variável utilizando doses crescentes de NPK. No entanto, as doses de biocárvão proporcionaram redução linear da FPA (Figura 3B). O menor valor de FPA foi 0,61 g na dose de 55 g kg⁻¹, o que correspondeu a uma redução de 85,28% em relação à ausência de biocárvão.

Figura 3 - Fitomassa da parte aérea - FPA do gergelim aos 45 DAS em função de doses de NPK (mg kg⁻¹) (A) e biocárvão de cama de frango (g kg⁻¹) (B)



Elaborado pelos autores.

De acordo com o efeito do NPK nas características do crescimento e desenvolvimento do gergelim, pode ser visto que a dose 3 (27,5; 100,0; 27,5 mg kg⁻¹ NPK) promoveu os maiores resultados. Provavelmente, esta dose foi suficiente para o desenvolvimento do gergelim ou, acima disso, pode ter potencializado os efeitos negativos da salinidade do solo. O aumento excessivo da concentração de nutrientes no substrato pode elevar o nível salino, principalmente devido aos teores de potássio e nitrogênio, podendo ocasionar desordens nutricionais nas plantas (Epstein; Bloom, 2006).

A aplicação de biocarvão no presente experimento promoveu efeito negativo no crescimento e desenvolvimento do gergelim. Isso ocorreu, provavelmente, em virtude do incremento da salinidade do solo em função da adubação com biocarvão, o qual pode ser verificado pelo incremento do pH e da condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) nas unidades experimentais (Tabela 4). Os maiores valores foram observados com as doses de 40 e 55 g kg⁻¹ de biocarvão, sendo esses valores característicos de solos salinos (pH \geq 8,5; CEes > 4,0 dS m⁻¹) (Richards, 1954). Tais resultados podem estar relacionados ao caráter alcalino do biocarvão. O excesso de sais solúveis no solo promove incremento do potencial osmótico e redução na absorção da água e nutrientes, promovendo distúrbios metabólicos e fisiológicos nas plantas, reduzindo a taxa fotossintética e, conseqüentemente, a produção de fotoassimilados para os órgãos reprodutivos (Dias; Blanco, 2010).

O incremento nos teores de cloreto (Cl⁻), bicarbonato (HCO₃⁻), sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) de, respectivamente, 33,94%, 65,58%, 51,08% e 91,81% em relação aos tratamentos sem adubação com biocarvão; e os teores de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺), no en-

tanto, reduziram com o aumento das doses de biocarvão, promovendo incremento da relação de adsorção de sódio (RAS).

Em decorrência das escassas informações existentes acerca da utilização do biocarvão de cama de frango como fonte de adubação, principalmente para a cultura do gergelim, novas pesquisas a este respeito sobressaem em importância, inclusive utilizando diferentes doses de biocarvão, retenção e liberação de nutrientes desse material, existência ou não de componentes tóxicos, entre outras questões envolvidas no uso de biocarvão para agricultura.

Tabela 2 - Valores médios dos atributos químicos do solo cultivado com gergelim em função de doses de biocarvão de cama de frango

ATRIBUTOS NO EXTRATO DE SATURAÇÃO	DOSES DE BIOCARVÃO (g kg ⁻¹)			
	0	20	40	55
pH _{es}	5,98	7,07	7,90	8,28
CE _{es} (dS m ⁻¹)	3,31	7,28	9,50	9,32
Cloreto (mmol _c L ⁻¹)	33,32	47,73	50,44	50,43
Carbonato (mmol _c L ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	0,00
Bicarbonato (mmol _c L ⁻¹)	2,44	2,95	5,36	7,09
Sulfato (mmol _c L ⁻¹)	P	P	P	P
Cálcio (mmol _c L ⁻¹)	7,04	7,63	3,82	3,97
Magnésio (mmol _c L ⁻¹)	28,13	35,44	26,98	22,84
Sódio (mmol _c L ⁻¹)	16,98	31,03	37,01	34,71
Potássio (mmol _c L ⁻¹)	4,23	24,11	44,00	51,66
RAS	4,05	6,69	9,43	9,48

pH_{es} - pH do extrato de saturação; CEes - Condutividade elétrica do extrato de saturação; RAS - Razão de adsorção de sódio. Elaborado pelos autores.

Após a discussão dos dados, observou-se que a adubação com fertilizante mineral promoveu incremento na altura de plantas,

no diâmetro do caule, no número de folhas, na área foliar e na fitomassa seca do gergelim aos 45 DAS, atingindo máximo crescimento com as doses de 27,5; 100,0; 27,5 mg kg⁻¹ de NPK. A adubação com biocarvão de cama de frango, no entanto, promoveu decréscimo na altura de plantas, no diâmetro do caule, no número de folhas, na área foliar e na fitomassa do gergelim, e a aplicação de biocarvão de cama de frango aumentou o pH e a condutividade elétrica do solo.

■ ESTUDO DE CASO 3

Doses de biocarvão de cama de aviário e tempo de incubação: efeitos na fertilidade do solo e desenvolvimento de rabanete (Cavalcante *et al.*, 2022)⁵

Com o intuito de avaliar o efeito de doses crescentes de biocarvão de cama de aviário, incubadas em solo por diferentes períodos, sobre a fertilidade do solo e o desenvolvimento do rabanete, foi desenvolvido um experimento em casa de vegetação agrícola da Universidade Federal de Campina Grande. O solo utilizado foi analisado segundo Teixeira *et al.* (2017), revelando os seguintes atributos: pH_(H₂O) = 5,75; CE_{es} = 0,16 dS m⁻¹; Ca = 1,56 cmol_c kg⁻¹; Mg = 1,18 cmol_c kg⁻¹; Na = 0,06 cmol_c kg⁻¹; K = 0,26 cmol_c kg⁻¹; H = 1,27 cmol_c kg⁻¹; matéria orgânica = 14,8 g kg⁻¹; P = 4,9 mg kg⁻¹; argila = 158,5; silte = 120,7 e areia = 720,8 g kg⁻¹. O biocarvão

5 . CAVALCANTE, A. R.; CHAVES, L. H. G.; LIMA, W. B.; LAURENTINO, L. G. S.; SOUZA, F. G.; GUIMARÃES, J. P.; KUBO, G. T. M. Poultry litter biochar rates and incubation times: effects on soil fertility and radish development. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 43, n. 3, p. 1051-1064, 2022.

produzido a partir de um processo de pirólise, pelo qual a cama de aviário foi submetido à decomposição térmica em uma temperatura de 450°C, na ausência de oxigênio, apresentou a seguinte composição após as análises químicas, segundo Brasil (2014): pH (H₂O) = 9,45; N = 3,45%; P = 7,78%; K = 4,90%; Ca = 6,83%; Mg = 1,34%; S = 0,76%; Fe = 0,46%; Cu = 0,04%; Zn = 0,08%; Mn = 0,09%; B = 0,01%; carbono orgânico = 39,77%; matéria orgânica = 68,56%; C/N = 11,53%; e CTC = 388,90 mmol_c/kg.

Este estudo foi desenvolvido sob delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, com um arranjo fatorial 4 × 4, representado pelos seguintes fatores: quatro doses de biocarvão (50, 100, 150 e 200 g por planta, correspondendo para 12,5, 25, 37,5 e 50 t ha⁻¹, respectivamente) e quatro tempos de incubação (0, 30, 60 e 90 dias), totalizando 48 unidades experimentais. Essas doses de biocarvão foram determinadas com base na matéria orgânica recomendada (esterco de gado): 20 m³ ha⁻¹ para a maioria das culturas. Cada unidade experimental foi preenchida com 8 kg de solo seco ao ar (< 2 mm), que foi então misturado com as respectivas doses de biocarvão. Essas unidades foram irrigadas até 80% da capacidade de campo, com incrementos diários com base na perda de peso; e depois fechadas com filme plástico para evitar evaporação, para os períodos de incubação de 30, 60 e 90 dias. Após o período de incubação, as amostras de solo das unidades experimentais foram coletadas e caracterizadas quimicamente, segundo Teixeira *et al.* (2017). Em seguida, o rabanete (*Raphanus sativus* L. cv. Apolo) foi semeado diretamente nas unidades experimentais, alocando cinco sementes equidistantes por unidade experimental, a 3 cm de profundidade. Aos 15 dias após

a germinação, foi feito o desbaste das mudas, deixando apenas a planta mais vigorosa. O experimento foi conduzido por 30 dias.

Para avaliar os efeitos dos tempos de incubação e doses de biocarvão em rabanete, foram analisadas as seguintes variáveis: área foliar (cm^2); razão de área foliar; área foliar específica; índice de produção de biomassa da parte aérea; diâmetros dos tubérculos transversais e longitudinais (mm); e biomassas de tubérculos frescos e secos (g), de acordo com as equações abaixo:

■ Área foliar, $\text{cm}^2 = C \times L \times f$

Onde C = comprimento da folha, cm; L = largura da folha, cm; e f = fator de correção para rabanete (0,57), adimensional;

■ Razão da área foliar, $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} = \frac{\text{TAF}}{\text{TPS}}$

Onde TAF = Total da área foliar (cm^2); e TPS = peso seco total (g);

■ Área foliar específica, $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} = \frac{\text{AF}}{\text{PFS}}$

Onde AF = área foliar (cm^2); PFS = peso das folhas secas (g); e

■ Índice de produção de biomassa da parte aérea, $\frac{\text{g}}{\text{g}} = \frac{\text{MFPA}}{\text{MST}}$

Onde MFPA = massa fresca da parte aérea (g); e MST = matéria seca total (g).

Antes da análise de variância (ANOVA), os dados obtidos foram submetidos a testes de homogeneidade e normalidade usando Software R (Chambers, 2008). Uma vez atendidas as suposições, a ANOVA foi realizada usando o teste F no nível de probabilidade de 0,05. Quando um efeito significativo foi detectado, foram realizadas regressão polinomial linear e quadrática usando estatísticas SISVAR software (Ferreira, 2011).

Conforme as equações apresentadas na Tabela 1, pôde-se observar que a variação do pH, da condutividade elétrica e dos teores de matéria orgânica, fósforo, potássio, sódio, cálcio e magnésio do solo seguiu um comportamento polinomial quadrático em resposta às doses de biocarvão aplicadas e aos tempos de incubação. No geral, o aumento das doses de biocarvão no solo incrementou os valores de todos esses parâmetros, no entanto, esses parâmetros do solo apresentaram valores maiores nas amostras não incubadas em comparação com as incubadas por 30, 60 e 90 dias.

Os níveis de fósforo, potássio e sódio praticamente não variaram com o tempo de incubação, evidenciados por suas curvas quase sobrepostas. Provavelmente porque não houve tempo suficiente para o biocarvão reagir no solo, liberando os nutrientes de sua estrutura para ele. No entanto, o fósforo disponível no solo aumentou com doses de biocarvão até cerca de 40 t ha^{-1} . O aumento do teor de P disponível no solo deveu-se à alta concentração desse nutriente no biocarvão. A pirólise resulta na perda de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N) por volatilização, favorecendo assim o teor de P no biocarvão. Ao contrário do fósforo, as concentrações de K e Na aumentaram com as doses de biocarvão até 50 t ha^{-1} .

Tabela 1 - Equações representativas do pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, fósforo, potássio, sódio, cálcio e magnésio em função do aumento das doses de biocarvão aos 0, 30, 60 e 90 dias de incubação

DIAS	PH	R ²	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	R ²
0	$y = -0,0013x^2 + 0,11x + 4,97$	0,93	$y = -7E^{-4}x^2 + 0,0881x + 1,65$	0,98
30	$y = -0,0002x^2 + 0,06x + 5,41$	0,97	$y = 5E^{-05}x^2 + 0,0392x + 0,92$	0,99
60	$y = -8E^{-4}x^2 + 0,088x + 5,46$	0,96	$y = 4E^{-4}x^2 + 0,0257x + 1,35$	0,96
90	$y = -2E^{-4}x^2 + 0,054x + 5,04$	0,98	$y = 4E^{-4}x^2 + 0,0387x + 1,34$	0,92
Carbono Orgânico			Fósforo	
0	$y = -0,022x^2 + 1,6x + 13,09$	0,98	$y = -0,314x^2 + 21,08x + 46,06$	0,85
30	$y = 0,014x^2 - 0,25x + 19,81$	0,98	$y = -0,207x^2 + 15,86x + 50,50$	0,69
60	$y = 6E^{-4}x^2 + 0,44x + 17,64$	0,92	$y = -0,28x^2 + 20,1x + 17,54$	0,97
90	$y = -8,8 E^{-3}x^2 + 0,89x + 5,61$	0,99	$y = -0,264x^2 + 19,6x + 12,50$	0,98
Potássio			Sódio	
0	$y = -3E^{-3}x^2 + 0,35x + 0,81$	0,94	$y = -1,1E^{-3}x^2 + 0,13x + 1,28$	0,99
30	$y = 5E^{-4}x^2 + 0,08x + 0,49$	0,99	$y = 2E^{-4}x^2 + 0,03x + 0,57$	0,95
60	$y = 1,4E^{-3}x^2 + 0,044x + 0,77$	0,93	$y = 4E^{-5}x^2 + 0,039x + 0,76$	0,97
90	$y = 2E^{-4}x^2 + 0,10x + 0,48$	0,97	$y = -4E^{-5}x^2 + 0,039x + 0,73$	0,89
Cálcio			Magnésio	
0	$y = -3,4E^{-3}x^2 + 0,13x + 2,57$	0,82	$y = 7E^{-4}x^2 + 0,08x + 2,81$	0,99
30	$y = -0,0007x^2 + 0,027x + 3,06$	0,53	$y = -5E^{-5}x^2 + 0,042x + 1,71$	0,95
60	$y = -0,0017x^2 + 0,0563x + 3,23$	0,98	$y = -3E^{-4}x^2 + 0,082x + 1,95$	0,97
90	$y = -0,0016x^2 + 0,0587x + 3,19$	0,99	$y = -E^{-4}x^2 + 0,145x + 1,79$	0,89

Elaborado pelos autores.

O teor de Ca aumentou gradualmente com as doses de biocarvão até cerca de 25 t ha⁻¹, diminuindo a partir de então. Houve também pouca variação de cálcio no solo ao longo dos tempos de incubação do biocarvão. As doses crescentes de biocarvão aumentaram o teor de Mg no solo, que também aumentaram com os tempos de incubação de 30, 60 e 90 dias.

De modo geral, pode-se afirmar que a aplicação de biocarvão de cama de aviário aumentou a fertilidade do solo devido à maior disponibilidade de cátions trocáveis e de fósforo ao solo, constituindo-se em alternativa viável para culturas de ciclo curto, como a do rabanete. No presente estudo, a partir da dose de 40 t ha⁻¹, a aplicação de biocarvão no solo resultou em pH elevado, principalmente nos tempos de incubação de 30 e 60 dias, podendo prejudicar o desenvolvimento do rabanete.

Como resultado da melhoria da fertilidade do solo, o uso de biocarvão influenciou significativamente o número de folhas, a área foliar, a razão de área foliar, a área foliar específica (Tabela 2), os diâmetros transversais e longitudinais dos tubérculos e a biomassa fresca dos tubérculos (Tabela 3). O índice de produção de biomassa da parte aérea foi influenciado apenas pelo tempo de incubação e pela interação entre as doses de biocarvão e os tempos de incubação. Assim, os resultados demonstram o potencial do biocarvão de cama de aviário para ser usado como fertilizante mesmo em culturas de ciclo muito curto, como o rabanete.

O efeito das doses de biocarvão na área foliar das plantas de rabanete ajustou-se ao modelo linear. Vale ressaltar que a folha é a parte da planta em que ocorre o processo bioquímico (fotossíntese) responsável pela produção dos fotoassimilados, que serão enviados aos órgãos produtores das plantas.

A aplicação de biocarvão no solo sem incubação proporcionou o maior desenvolvimento foliar, com área foliar máxima de 395,2 cm², alcançada na maior dose de 50 t ha⁻¹. Em comparação com a menor área foliar de 211,56 cm² encontrada na dose de biocarvão de 12,5 t ha⁻¹, essa variável aumentou em torno de 86,8%.

No entanto, quando o biocarvão foi incubado no solo por 60 dias, a área foliar diminuiu, com uma redução de cerca de 21,89%

(387,9 para 302,34 cm²) da menor para a maior dose de biocarvão. Este último valor, que correspondeu a 200 g de biocarvão por planta (maior dose), corrobora Lopes *et al.* (2019). Porém, quando os pesquisadores utilizaram 200 g de cama de aviário por planta, a maior área foliar encontrada foi de 227 cm². O tempo de incubação só influenciou a área foliar na dose de biocarvão de 12,5 t ha⁻¹, fazendo com que chegasse a 352,86 cm² aos 90 dias de incubação.

Tabela 2 - Análise de variância do número de folhas, da área foliar, da biomassa fresca e seca das folhas de rabanete em função de diferentes doses de biocarvão e períodos de incubação

FV	GL	NÚMERO DE FOLHA	ÁREA FOLIAR	BIOMASSA FRESCA DE FOLHA	BIOMASSA SECA DE FOLHA
Dose (D)	3	34,14**	13240,78**	30,08*	0,65**
Eq. linear	1	96,27**	27881,41**	43,29*	0,05 ^{ns}
Eq. quadrática	1	5,33*	1995,46 ^{ns}	46,47*	1,91**
Incubação (I)	3	2,92 ^{ns}	5466,05*	23,76**	0,61**
Eq. linear	1	0,04*	21243,90**	0,35 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Eq. quadrática	1	0,30 ^{ns}	1671,71 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,02 ^{ns}
D x I	9	6,90**	10098,87**	7,12**	0,23 ^{ns}
Erro	30	1,22	2350,8	6,84	0,11
CV	%	15,70	14,60	14,80	21,60

**,* significativos a 0,01 e 0,05. ^{ns} não significativo respectivamente.

Elaborado pelos autores.

O componente morfofisiológico que expressa a área foliar útil para a fotossíntese e o peso seco total do rabanete, ou seja, a razão de área foliar, foi significativamente afetado pela interação entre o tempo de incubação (somente a 0, 30 e 90 dias) e as doses de biocarvão. Esses dados se ajustaram ao modelo quadrático, com as razões máximas de área foliar encontradas na dose de 50 t ha⁻¹: 108,77, 8,22 e 95,99 cm² g⁻¹ aos 0, 30 e 90 dias de incubação, respectivamente. A interação entre as doses de biocarvão e os

tempos de incubação só afetou essa variável na dose de 50 t ha⁻¹, com ponto máximo de 108,57 cm² g⁻¹, observado nas plantas que receberam biocarvão sem incubação.

O biocarvão não incubado forneceu a maior proporção de área foliar, influenciando assim a fotossíntese. A área foliar específica, que expressa a área fotossinteticamente ativa do rabanete em relação ao seu peso seco foliar, foi influenciada pela interação tempo de incubação versus doses de biocarvão. Essa variável apresentou ajustes linear e quadrático dos dados, com 426,57, 321,45 e 299,39 cm² g⁻¹, encontrados nos tempos de incubação de 0, 60 e 90 dias, respectivamente, na dose de 50 t ha⁻¹. Vale ressaltar que a maior área foliar específica foi obtida sem a incubação do biocarvão, sugerindo que não necessita de incubação para liberar os nutrientes necessários ao rabanete.

Houve um efeito significativo da interação doses de biocarvão vs. tempo de incubação no índice de produção de biomassa da parte aérea, cujos dados mostraram ajustes quadráticos e lineares com pontos máximos de 0,34, 0,41, 0,35 e 0,40 nas doses de biocarvão de 19, 50, 12,5 e 35 t ha⁻¹, respectivamente. Analisando os dados, observamos que a dose de 50 t ha⁻¹ proporcionou o maior acúmulo de biomassa seca da parte aérea no tempo de incubação de 30 dias, provavelmente devido à concentração de nutrientes que o biocarvão forneceu durante a incubação.

Os diâmetros transversal e longitudinal do tubérculo foram influenciados pela interação entre as doses de biocarvão e os tempos de incubação, com efeito significativo a 1% de probabilidade. No entanto, essas doses, isoladamente, afetaram apenas a biomassa fresca dos tubérculos.

O diâmetro transversal do tubérculo ajustou-se a um modelo quadrático, com valores máximos de 45,29, 43,87, 46,06 e 42,43

mm nas doses máximas de biocarvão de 31,55, 32,46, 50 e 30,22 t ha⁻¹, respectivamente, no melhor tempo de incubação de 60 dias. Na interação entre doses de biocarvão e tempo de incubação no diâmetro transversal, 37,5 t ha⁻¹ de biocarvão sem incubação resultaram no maior diâmetro de 45,9 mm.

O diâmetro longitudinal foi significativamente afetado pelo tempo de incubação versus interação das doses de biocarvão. Os dados ajustaram-se a um modelo quadrático, com diâmetro máximo de 92,12 mm, obtido na dose de 12,5 t ha⁻¹ e tempo de incubação de 30 dias. A análise da interação entre as doses de biocarvão e os tempos de incubação revelou que o maior diâmetro de 84,9 mm foi obtido com um tempo de incubação de 42 dias, utilizando a dose de biocarvão de 12,5 t ha⁻¹.

Em geral, a diminuição de algumas variáveis da planta do rabanete com o aumento das doses de biocarvão de cama de aviário provavelmente está relacionada ao efeito salino causado pela presença de sais que se acumulam no solo, proporcionados pela composição desse biocarvão. Essa maior salinidade do solo aumentou a condutividade, mas esta variável diminuiu com o tempo de incubação do biocarvão.

O rabanete é um alimento de alta umidade, com teor médio de água de 95,6 g por 100 g de tubérculo. Apesar dos diferentes pesos apresentados pelo tubérculo no estado fresco, após a secagem, a perda de água resultou em pesos muito semelhantes. Isso, provavelmente, explica o efeito não significativo das doses de biocarvão na biomassa seca do tubérculo, apesar do efeito significativo na biomassa fresca.

Conforme o exposto, pode-se dizer que o biocarvão de cama de aviário foi capaz de fornecer nutrientes às plantas em um curto período, proporcionando aumentos gerais na área foliar, razão de

área foliar, área foliar específica e diâmetros transversal e longitudinal dos tubérculos. A dose de 33,69 t ha⁻¹ resultou na maior produção de biomassa fresca de rabanete, de 48,4 g. As doses de biocarvão de cama de aviário de 25 a 37,5 t ha⁻¹ foram as faixas que proporcionaram os melhores resultados das variáveis vegetais analisadas, em um período de incubação de 0 a 30 dias. Finalmente, o biocarvão de cama de aviário pode ser considerado uma fonte alternativa viável de fertilizante orgânico.

■ ESTUDO DE CASO 4

Produção de beterraba em função de doses de biocarvão (Chaves; Tito, 2021)⁶

Com o objetivo de analisar o efeito do biocarvão produzido através da cama de aviário na cultura da beterraba (*Beta vulgaris*), foi conduzido um experimento em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. Foi utilizado no experimento um argissolo acizentado distrófico coletado na camada de 0-20 cm de profundidade, seco ao ar e peneirado com malha de 2,0 mm, com as seguintes características químicas, conforme Teixeira *et al.* (2017): pH (H₂O) = 5,42; Ca = 2,20 cmol_c kg⁻¹; Mg = 2,40 cmol_c kg⁻¹; Na = 0,04 cmol_c kg⁻¹; K = 0,11 cmol_c kg⁻¹; H + Al = 2,38 cmol_c kg⁻¹; MO = 17,9 g kg⁻¹; P = 3,8 mg kg⁻¹; CTC = 7,13 cmol_c kg⁻¹.

O biocarvão foi produzido através da cama de aviário acondicionada em cadinho tampado, para diminuir o O₂, levado a uma

6 . CHAVES, L. H. G.; TITO, G. A. Produção de beterraba em função de doses de biocarvão. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA - CONTECC, 2021, Goiana. **Anais** [...]. 2021. v. 1. p. 1-5.

mufla em temperatura de 350°C, durante 3 horas, e retirado da mufla somente após o resfriamento total do material, em torno de 24 horas. O biocarvão foi peneirado em peneira com malha 2 mm para utilização nos experimentos e caracterizado quimicamente, de acordo com o *Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos* (Brasil, 2014), apresentando os seguintes resultados: Nitrogênio Total (g kg^{-1}) = 30,6; Fósforo (P_2O_5) Total (%) = 5,76; Potássio (K_2O) (%) = 6,61; Ca (%) = 5,27; Mg (%) = 1,08; pH = 8,97; Carbono orgânico (g kg^{-1}) = 400,2; Relação Carbono/Nitrogênio = 13,08 e CTC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) = 58,61.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, compreendendo as seguintes doses crescentes de biocarvão: 0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10 t ha^{-1} , com três repetições, totalizando quinze unidades experimentais. As unidades experimentais, correspondentes a vasos plásticos, foram preparadas com 5 kg de solo, previamente seco, peneirado e misturado com doses crescentes de biocarvão. Depois do preparo das unidades experimentais, o material (solo + biocarvão) foi incubado durante 20 dias, mantendo a umidade próxima à capacidade de campo. Após esse período, amostras do solo das unidades experimentais foram coletadas e, em seguida, analisadas quimicamente.

As mudas de beterraba (*Beta vulgaris*) foram produzidas em bandejas próprias para semeadura. Após a semeadura, o transplante das unidades experimentais foi realizado quando as mudas apresentaram, em média, 10 cm de altura. Após 10 dias do transplante, foram feitos os desbastes, deixando uma planta/vaso. A irrigação das plantas foi feita com água de abastecimento, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo. Não foi feita adubação mineral para não mascarar os efeitos dos tratamentos.

As variáveis biométricas foram analisadas aos 70 DAS, após a colheita dos frutos: biomassa fresca das folhas (BFF) e biomassa fresca das beterrabas (BFB), diâmetro longitudinal (DL) e diâmetro transversal (DT) das beterrabas e, em seguida, todo o material foi colocado em estufa com 65°C para determinação da biomassa seca das folhas (BSF) e das beterrabas (BSB).

Os resultados foram submetidos às análises de variância e de regressão por polinômios ortogonais, utilizando-se o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

Figura 1 - Visão geral das plantas e das beterrabas em função das doses de biocarvão; beterraba com a maior dose de biocarvão

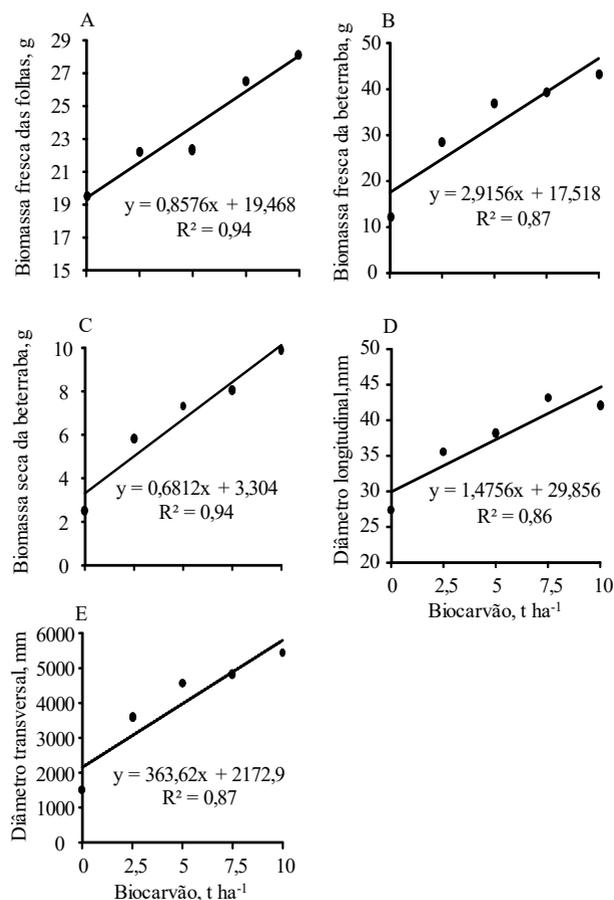


Elaborado pelos autores.

Conforme o resumo da análise de variância, os tratamentos influenciaram de forma significativa a biomassa fresca das folhas das beterrabas (BFF) e as biomassas fresca (BFB) e seca (BSB) das beterrabas em nível de $p \leq 0,05$; influenciaram também nos diâmetros longitudinal (DL) e transversal (DT) em nível de $p \leq 0,01$.

A biomassa fresca das folhas (BFF) apresentou uma tendência crescente de forma linear com a incorporação do biocarvão, promovendo um aumento de 44% quando comparada à maior dose com a testemunha (Figura 2A).

Figura 2 - Biomassa fresca das folhas de beterraba (A), biomassa fresca (B) e seca (C) da beterraba e diâmetro longitudinal (D) e transversal (E) da beterraba em função das doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

Conforme as Figuras 2B e 2C, as biomassas frescas (BF) e secas (BS) das beterrabas aumentaram de forma linear em função das doses crescentes de biocarvão, apresentando aumentos de 166,43% e 206,17%, respectivamente, quando se comparam as

maiores doses com a testemunha. Da mesma forma, os diâmetros longitudinal (DL) (comprimento da raiz) e transversal (DT) das beterrabas aumentaram de forma linear, sendo que houve aumentos de 49,42% e 167,43%, respectivamente, comparando entre as maiores doses com a testemunha (Figuras 2D e 2E). É importante observar que os dados na Figura 2D são transformados, por isso aparecem números altos. Na realidade, os valores de diâmetro transversal originais variaram de 22,26 mm (testemunha) a 44,94 mm (10 t ha⁻¹), ou seja, um aumento de 71,13% entre estes valores. Esses dados do diâmetro, tanto longitudinal como transversal, foram menores do que aqueles encontrados por Zárate *et al.* (2010) utilizando cama de aviário.

Em geral, todas as variáveis biométricas avaliadas no presente trabalho responderam linearmente à aplicação de biocarvão de cama de aviário ao solo.

De acordo com as análises químicas das amostras do solo das unidades experimentais após a incubação destas com biocarvão, observou-se que, com exceção do cálcio, o conteúdo de cátions trocáveis (Na, Mg e K), o pH, o conteúdo de P disponível, a matéria orgânica e a soma de bases aumentaram com as concentrações de biocarvão da cama de aviário. O valor do pH do solo variou de 5,4 a 6,7, ou seja, houve um aumento de 1,3 unidade correspondente a um aumento de 24%. Em geral, entre os macronutrientes do solo, os teores de potássio e fósforo foram os que mais aumentaram devido ao aumento das doses de biocarvão, ou seja, variaram de 0,13 a 2,42 cmolc kg⁻¹, e de 4,01 a 209,99 mg kg⁻¹, correspondente a um aumento de 1754% e 5131%, respectivamente.

O teor de potássio foi o que mais contribuiu para aumentar a soma das bases dos solos incubados com o biocarvão, ficando o sódio e o magnésio em segundo e terceiro lugares.

O considerável aumento no teor de potássio é justificado pela presença no biocarvão de compostos como cloreto de potássio (KCl), aluminossilicato de potássio (KAlSiO₄) e fosfato de potássio dibásico (K₂HPO₄). Este último composto contribuiu para o aumento significativo do teor de fósforo do solo. Outra possibilidade que influenciou os teores de P pode estar relacionada ao aumento do pH do solo pela aplicação de biocarvão, isto porque, quando o pH do solo é superior a 5,7, o P deixa de ser adsorvido e fica em forma disponível no solo (Troeh; Thompson, 2005). O aumento dos atributos químicos do solo disponibilizou, provavelmente, os nutrientes essenciais para a cultura da beterraba, proporcionando incrementos em todas as variáveis biométricas analisadas.

De acordo com o exposto, as doses de biocarvão proporcionaram incrementos nas variáveis biométricas da beterraba; a maior dose de biocarvão, 10 t ha⁻¹, propiciou maiores valores das variáveis analisadas; e a aplicação de biocarvão no solo aumentou todos os atributos químicos do solo, melhorando assim o nível de fertilidade do solo.

ESTUDO DE CASO 5

Biocarvão nas propriedades químicas do solo e produção de pimenta-biquinho (*Capsicu Chinense*) (Tito *et al.*, 2020)⁷

Objetivando avaliar o efeito do biocarvão da cama de aviário nas propriedades químicas do solo e na cultura da pimenta-bi-

7 . TITO, G. A.; CHAVES, L. H. G.; DANTAS, E. R. B.; LAURENTINO, L. G. S.; SOUZA, F. G.; GUERRA, H. O. C. Biochar on soil chemical properties and beak pepper (*Capsicu chinense*) production. *Agricultural Sciences*, v. 11, p. 1133-1142, 2020.

quinho (*Capsicu Chinense*), foi conduzido um experimento em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola/UFCCG, utilizando um argissolo acizentado distrófico coletado na camada de 0-20 cm de profundidade, com as seguintes características físico-químicas, conforme Teixeira *et al.* (2017): classificação textural como areia franca; 869,6 g kg⁻¹ de areia; 90,4g kg⁻¹ de silte e 40,0 g kg⁻¹ de argila, densidade do solo = 1,46 g cm³; densidade das partículas = 2,69 g cm³; porosidade total = 45,73 %; pH (H₂O) = 5,42; Ca = 2,20 cmol_c kg⁻¹; Mg = 2,40 cmol_c kg⁻¹; Na = 0,04 cmol_c kg⁻¹; K = 0,11 cmol_c kg⁻¹; H + Al = 2,38 cmol_c kg⁻¹; MO = 17,9 g kg⁻¹; P = 3,8 mg kg⁻¹; CTC = 7,13 cmol_c kg⁻¹.

O biocarvão foi produzido através da cama de aviário em uma mufla, em temperatura de 350°C, durante 3 horas, e caracterizado quimicamente de acordo com o *Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos* (Brasil, 2014), apresentando os seguintes resultados: Nitrogênio Total (g kg⁻¹) = 30,6; Fósforo (P₂O₅) Total (%) = 5,76; Potássio (K₂O) (%) = 6,61; Ca (%) = 5,27; Mg (%) = 1,08; pH = 8,97; Carbono orgânico (g kg⁻¹) = 400,2; Relação Carbono/Nitrogênio = 13,08 e CTC (cmol_c kg⁻¹) = 58,61.

As unidades experimentais, correspondentes a vasos plásticos, foram preparadas com 5 kg de solo, previamente seco, peneirado e misturado com doses crescentes de biocarvão. Depois do preparo das unidades experimentais, o material (solo + biocarvão) foi incubado durante 20 dias, mantendo a umidade próxima à capacidade de campo. Após esse período, amostras do solo das unidades experimentais foram coletadas e, em seguida, analisadas quimicamente.

As mudas de pimenta-biquinho (*Capsicu chinense*) foram produzidas em casa de vegetação, sendo utilizado substrato de fibra de coco em bandejas próprias para semeadura. Após a se-

meadura, o transplante às unidades experimentais foi realizado quando as mudas apresentaram, em média, 15 cm de altura. Após 10 dias do transplantio, foram feitos os desbastes, deixando uma planta/vaso.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, compreendendo as seguintes doses crescentes de biocarvão: 0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10 t ha⁻¹, com três repetições, totalizando 15 unidades experimentais. A irrigação das plantas foi feita com água de abastecimento, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo. Não foi feita adubação mineral para não mascarar os efeitos dos tratamentos.

As variáveis biométricas foram analisadas aos 120 DAS, após a colheita dos frutos: altura de plantas (AP), o diâmetro do caule (DC), a biomassa fresca da parte aérea (BFPA) e a biomassa fresca dos frutos (BFF); e, em seguida, todo o material foi colocado em estufa com 65°C para determinação da biomassa seca da parte aérea (BSPA) e dos frutos (BSF).

Os resultados foram submetidos às análises de variância e de regressão por polinômios ortogonais, utilizando-se o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

Após aplicação de biocarvão nos solos e incubação por 20 dias, com exceção da condutividade elétrica (CE), as doses de biocarvão afetadas influenciaram significativamente as propriedades químicas do solo. Com exceção do cálcio, o teor de cátions trocáveis (Na, Mg e K) aumentou com as concentrações de biocarvão. A maior dose do biocarvão da cama de aviário (10 t·ha⁻¹) aumentou os teores de Na, Mg e K do solo em 0,50, 0,93 e 2,29 cmol_c·kg⁻¹, respectivamente; ou seja, entre esses valores e o controle, houve um aumento de 151%, 39% e 1754%, respectivamente.

Além do aumento do teor de cátions trocáveis (K, Ca e Mg), o pH, o teor de P disponível, a matéria orgânica e a soma de bases aumentaram com as concentrações de biocarvão. Os valores de pH do solo aumentaram linearmente após a adição do biocarvão; na maior dose de biocarvão aumentou o pH do solo em 1,38 unidades; o teor de P disponível aumentou 209,99 mg·kg⁻¹; a matéria orgânica aumentou 15,29 g·kg⁻¹ e a soma das bases aumentou 3,324 cmol_c·kg⁻¹, ou seja, houve aumento de 26%, 5131%, 106% e 60% em relação ao controle, respectivamente. Em geral, a aplicação de biocarvão de cama de aviário no solo aumentou todos os atributos químicos do solo, melhorando assim seu nível de fertilidade.

Analisando o resumo da análise de variância, verifica-se que os tratamentos foram significativos no nível de $p < 0,05$ e $p < 0,01$ apenas para a biomassa fresca da parte aérea e para a biomassa seca da parte aérea, respectivamente.

De acordo com os tratamentos, verifica-se que a biomassa fresca da parte aérea (BFPA) apresentou uma tendência crescente linear ($BF = 0,0004x + 0,7132$; $R^2 = 0,81$) com a incorporação do biocarvão, variando de 29,67 a 54,57g (dados não transformados), promovendo um aumento de 84,5% quando se compara à maior dose com a testemunha.

As doses do biocarvão influenciaram significativamente, de forma quadrática, a biomassa fresca dos frutos ($BFF = -0,0274x^2 + 0,2823x + 0,9571$; $R^2 = 0,96$), em que o rendimento máximo da BFR foi 1,68 g (1,82 g, dado não transformado) na dose 5,15 t ha⁻¹, favorecendo um acréscimo de 75,5%. Não houve produção de pimenta-biquinho na testemunha (sem biocarvão) e na maior dose de biocarvão (10 t ha⁻¹), porém os dados foram transformados.

Os efeitos positivos no crescimento da planta de pimenta-biquinho, após a aplicação de biocarvão de cama de aviário, estão associados à melhoria das propriedades químicas do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes e melhorando a sua eficiência nas plantas, principalmente em solos arenosos, como é o caso do presente trabalho, no qual a perda de nutrientes é um grande problema agrônômico e ambiental.

A biomassa fresca do fruto (BFF) da pimenta-biquinho não se ajustou ao teste t, sendo aplicado o teste Kruskal-Wallis, em que se verifica diferença significativa nas doses 2,5; 5,0 e 7,5 t ha⁻¹ de biocarvão em relação à testemunha, promovendo um acréscimo de 165,7; 234,3 e 242,8%, respectivamente. No entanto, elas não se diferenciaram entre si. Por outro lado, na dose de 10 t ha⁻¹, foi verificada uma redução significativa, não diferindo estatisticamente da testemunha.

De maneira geral, os macronutrientes do solo, principalmente os teores de potássio e fósforo, aumentaram com o aumento das doses de biocarvão e podem ser usados como corretivo de acidez. Da mesma forma, a saturação por bases atingiu 90% (necessário para o plantio de pimenta), o que indica que o biocarvão afetou positivamente o desenvolvimento das plantas. No entanto, a produção de frutos foi afetada pelas doses 0 e 10 t ha⁻¹. Com a menor dose ou ausência de biocarvão, os nutrientes presentes no solo não foram suficientes para as plantas produzirem frutos; com a maior dose de biocarvão, devido ao aumento do teor de sódio no solo e da condutividade elétrica (2,0 dS m⁻¹), a floração e a produção de frutos foram prejudicadas. Em várias unidades experimentais, as plantas floresceram, mas rapidamente as flores caíram, as plantas não suportaram essas flores até a formação dos frutos.

Enfim, para melhorar as propriedades químicas do solo, recomenda-se a maior dose de biocarvão, ou seja, 10 ton ha⁻¹, porém esta dose pode prejudicar a produção de frutos de pimenta-biquinho, portanto, para esta cultura deve-se recomendar 5 ton ha⁻¹.

■ ESTUDO DE CASO 6

Potencial nutricional, crescimento e produção do biocarvão e nitrogênio na cultura do pimentão (Lima *et al.*, 2019a⁸, 2019b⁹; Silva *et al.*, 2020¹⁰)

Objetivando-se avaliar o efeito da adubação com biocarvão de cama de aviário em combinação com a adubação nitrogenada (N) sobre o crescimento do pimentão (*Capsicum annuum* L.), foi conduzido um experimento em casa de vegetação na UFCG, Campina Grande – PB, em citropotes de polipropileno com dimensão de 8 dm³. Os tratamentos resultaram da combinação entre dois fatores: quatro doses de nitrogênio (0; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹) associados a quatro doses de biocarvão (0; 7; 14 e 21 m³ ha⁻¹), distribuídos no delineamento inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 4 x

8 . LIMA, W. B.; CAVALCANTE, A. R.; BONIFÁCIO, B. F.; OLIVEIRA, L. D.; CHAVES, L. H. G. Potencial nutricional do biocarvão e nitrogênio na cultura do pimentão. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA - CONTECC, 2019, Palmas, TO. **Anais** [...]. v. 1, p. 1-5, 2019a. .

9 . LIMA, W. B.; CAVALCANTE, A. R.; BONIFÁCIO, B. F.; SILVA, A. A. R.; OLIVEIRA, L. D.; SOUZA, R. F. A.; CHAVES, L. H. G. Growth and development of bell peppers submitted to fertilization with biochar and nitrogen. **Agricultural Sciences**, v. 10, n. 6, p. 753-762, 2019b.

10 . SILVA, A. A. R.; CHAVES, L. H. G.; CAVALCANTE, A. R.; LIMA, W. B.; OLIVEIRA, L. D.; BONIFÁCIO, B. F.; SOUZA, R. F. A.; NASCIMENTO, R. Production and photosynthetic pigments of bell peppers all big (*Capsicum annuum* L.) subjected to fertilization with biochar and nitrogen. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 11, p. 1736-1741, 2020.

4, com três repetições, totalizando 48 unidades experimentais. A cultivar do pimentão utilizado foi “IKEDA”, pertencente ao grupo conhecido como Cascadura.

O preenchimento dos citropotes foi realizado colocando-se uma manta geotêxtil (Bidim OP 30) e 0,3 kg de brita (número zero), a qual cobria a base do citropote, e 6,0 kg de um coletado entre a camada de 0 - 20 cm de profundidade, proveniente da zona rural do município de Lagoa Seca - PB, sendo devidamente destorroado e peneirado, cujas características físico-hídricas e químicas foram determinadas conforme metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017): Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ = 1,56; 1,18; 0,06; 0,26 e 1,27 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente; pH (água 1:2,5) = 5,75; CEes = 0,16 dS m^{-1} ; matéria orgânica = 14,8 g kg^{-1} ; areia, silte e argila = 720,8, 120,7, e 158,5 g kg^{-1}

As adubações foram definidas com base na recomendação de adubação para o estado de Pernambuco para a cultura do pimentão. As doses de biocarvão foram baseadas conforme a recomendação de matéria orgânica (esterco bovino) de 20 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, como também as doses de nitrogênio com 30 kg ha^{-1} na fundação e 90 kg ha^{-1} na cobertura, utilizando a ureia como fonte de N. Utilizaram-se 120 kg ha^{-1} de fósforo e 70 kg ha^{-1} de potássio como fontes monoamônico e cloreto de potássio. O biocarvão utilizado no experimento foi produzido utilizando cama de aviário e apresentou a seguinte composição: N = 3,45%; P_2O_5 =7,78%; K_2O =4,90%; Cálcio= 6,83%; Magnésio= 1,34%; Enxofre =0,76%; Ferro=0,46%; Manganês= 0,09%; Cobre=0,04%; Zinco=0,08%; Boro=0,01%; pH=9,45; Relação carbono/Nitrogênio =11,53%; Carbono orgânico= 39,77%; matéria orgânica =68,56% e CTC (mmolc /kg) 388,90. Visando suprir a necessidade de micronutrientes, foram

aplicados 2,5 g L^{-1} de Ubyfol [(N (15%); P_2O_5 (15%); K_2O (15%); Ca (1%); Mg (1,4%); S (2,7%); Zn (0,5%); B (0,05%); Fe (0,5%); Mn (0,05%); Cu (0,5%); Mo (0,02%)] via foliar, aos 30, 45 e 60 dias após a semeadura.

O semeio foi realizado em bandeja de plástico, utilizando-se de um substrato comercial, em que foram colocadas três sementes em cada célula da bandeja; aos 28 dias após o semeio, foi realizado o transplantio para os citropotes; e após 8 dias do transplantio, foi feito o desbaste, deixando apenas uma planta por citropote. Foi realizado o tutoramento para auxiliar na sustentação das plantas de pimentão até o final do ciclo.

Determinaram-se os efeitos dos tratamentos sobre as plantas de pimentão através da altura de planta (AP), do diâmetro caulinar (DC), do número de folhas (NF), da área foliar (AF) aos 15, 30 e 45 dias após o semeio. A área foliar (cm^2) foi determinada conforme recomendação de Tivelli *et al.* (1997). Os frutos maduros foram colhidos em intervalos semanais a partir dos 80 DAS para avaliar o número de frutos (NF), a massa fresca e seca dos frutos (MFF e MSF) e os diâmetros longitudinal e transversal dos frutos (DLF e DTF).

A quantificação dos teores de pigmentos fotossintéticos (clorofila a e b e carotenoides) foi realizada seguindo o método laboratorial desenvolvido por Arnon (1949), em que foram feitos extratos vegetais a partir de amostras de discos do limbo da terceira folha madura a partir do ápice. A partir desses extratos, foram determinadas as concentrações de clorofila e carotenoides nas soluções por meio do espectrofotômetro no comprimento de onda de absorvância (ABS) (470, 646, e 663 nm), por meio das seguintes equações:

- Clorofila a (Cla) = $(12,21 \times \text{ABS663}) - (2,81 \times \text{ABS646})$
- Clorofila b (Clb) = $(20,13 \times \text{ABS64}) - (5,03 \times \text{ABS663})$
- Carotenoides (Car) = $((1000 \times \text{ABS470}) - (1,82 \times \text{Cla}) - (85,02 \times \text{Clb})) / 198$.

Os valores obtidos para os teores de Clorofila a, b e carotenoides nas folhas foram expressos em $\mu\text{m g}^{-1}$ MF (matéria fresca).

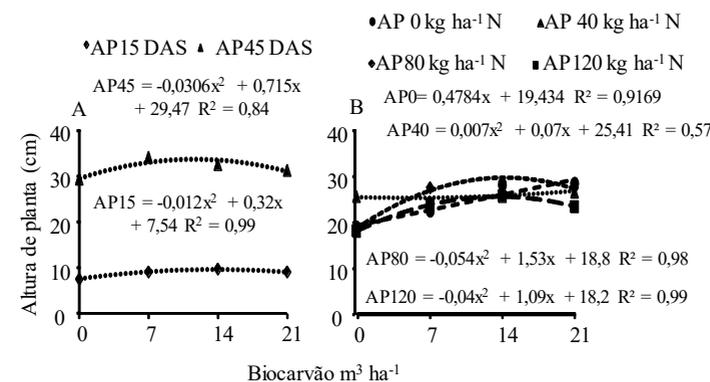
Os dados coletados foram submetidos à análise de variância pelo teste F aos níveis de 0,05 de probabilidade e, quando significativos, realizou-se análise de regressão polinomial linear e quadrática, utilizando-se do software estatístico SISVAR (Ferreira, 2011). De acordo com esta análise, as variáveis altura e diâmetro caulinar, número de folhas e área foliar analisadas aos 15, 30 e 45 DAS foram influenciadas significativamente com doses de biocarvão. No entanto, doses de nitrogênio influenciaram somente a altura e o diâmetro caulinar das plantas aos 30 e 45 DAS, respectivamente, enquanto a interação entre esses fatores influenciou somente a altura de plantas aos 30 DAS.

Em relação à altura das plantas, observam-se efeitos significativos para as doses de biocarvão aos 15 e 45 DAS, num comportamento quadrático, com a maior AP de 9,82 e 33,64 cm nas doses 13,67 e 11,68 m^3ha^{-1} de biocarvão, respectivamente (Figura 1A). A presença de 68,56% de matéria orgânica do biocarvão, provavelmente, melhorou as características do solo e a CTC, tornando os nutrientes mais disponíveis para a absorção das plantas de pimentão.

Em relação à altura das plantas aos 30 DAS, após análise de desdobramento da interação entre os tratamentos, verificou-se que o acréscimo das doses de biocarvão ocasionou efeito quadrático para as doses de 40, 80 e 120 kg ha^{-1} , encontrado o ponto

máximo de 25,63; 29,66 e 25,23 cm nas doses de 13,63; 14,26 e 5,12 m^3ha^{-1} respectivamente (Figura 1B). Quando as plantas só receberam biocarvão, o comportamento foi linear crescente, observando uma altura máxima de 29,48 cm nas doses de 21 m^3ha^{-1} , verificando uma diferença de 3,85 e 4,25 cm em relação às plantas adubadas com 40, 120 kg ha^{-1} , não havendo diferença quando adubado com 40 kg ha^{-1} combinado com 14,26 m^3ha^{-1} de biocarvão. Portanto, a concentração de nitrogênio que contém no biocarvão já é suficiente para atender à necessidade nutricional do pimentão.

Figura 1 - Altura da planta aos 15 e 45 DAS para biocarvão (A), interação de nitrogênio dentro de biocarvão para altura da planta aos 30 DAS (B) sob doses de biocarvão (F) na cultura do pimentão

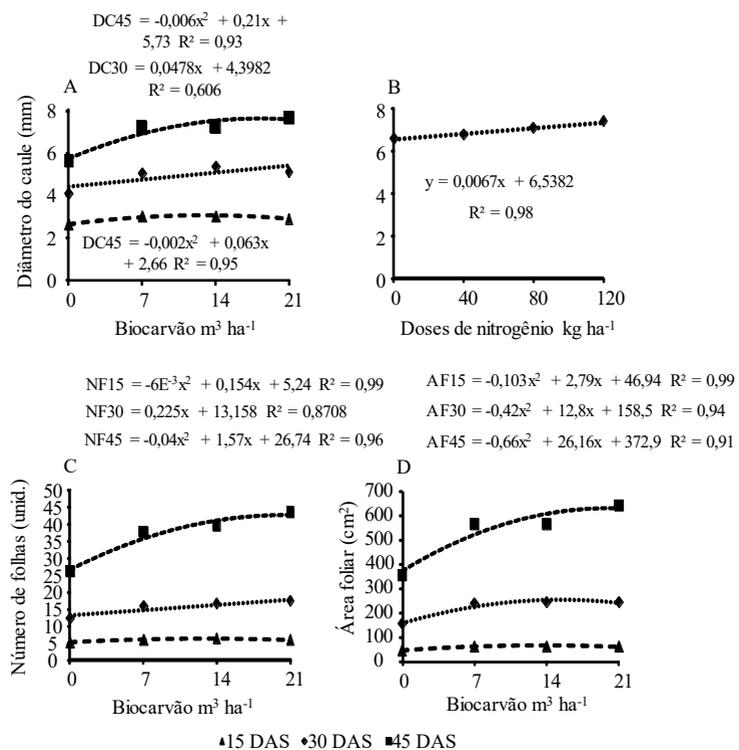


Elaborado pelos autores.

Quanto ao diâmetro caulinar (Figura 2A), verificou-se, aos 15 e 45 DAS, comportamento quadrático como ponto máximo de 3,06 e 7,62 mm nas doses de 18,07 e 13,02 m^3ha^{-1} , respectivamente. Já aos 30 DAS, o comportamento foi linear crescente, com incremento de 0,33mm no diâmetro, com o aumento de 7 m^3ha^{-1} , com o maior diâmetro de 5,4 mm. Esse aumento no diâmetro caulinar

com adubação do biocarvão está diretamente relacionado à disponibilidade de nutrientes e à eficiência em aumentar a concentração nutricional no solo, elevando consequentemente a produção de biomassa das plantas (Lehmann *et al.*, 2003). Ao analisar o efeito isolado das doses de nitrogênio (Figura 2B) aos 45 DAS, observam-se efeitos lineares crescentes, com o maior diâmetro de 7,34 nas doses de 120 kg ha⁻¹.

Figura 2 - Diâmetro do caule aos 15, 30 e 45 DAS para biocarvão (A), diâmetro caulinar aos 45 DAS nas doses de nitrogênio (B), número de folhas aos 15, 30 e 45 DAS sob doses de biocarvão (C) e área foliar aos 15, 30 e 45 DAS sob doses de biocarvão (D) na cultura do pimentão



Elaborado pelos autores.

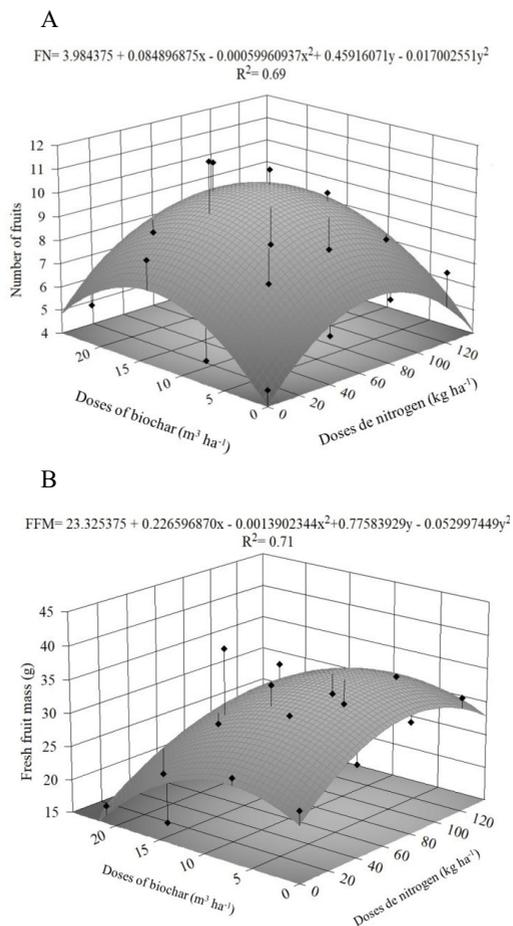
Verificou-se, consequentemente, um aumento no número de folhas com as doses de biocarvão (Figura 2C), encontrando valores máximos de 6,22 e 42,74 folhas por plantas nas doses de 12,8 e 20,43 m³ha⁻¹ aos 15 e 45 DAS, respectivamente. Observa-se, aos 30 DAS, que o comportamento no NF foi linear crescente, com um aumento de 1,57 folhas por planta no acréscimo de 7 m³ ha⁻¹, verificando o maior número de folhas de 17,88 por planta. Quando comparados os valores médios no número de folhas com as doses de N de 5,83; 15,51 e 36,62 folhas por planta, observa-se que as plantas adubadas com biocarvão ocasionaram um aumento de 6,27; 13,25 e 14,32 % em relação às plantas adubadas com nitrogênio.

O mesmo comportamento foi observado para área foliar (Figura 2D), que está diretamente relacionado ao número de folhas, em que os dados se ajustaram à equação quadrática, com valores máximos de 65,84; 256,85 e 632,93 cm² aos 15, 30 e 45 DAS. Quando comparado aos valores médios da área foliar nas plantas adubadas com nitrogênio, observa-se uma redução de 11,03; 13,78 e 15,05% nas plantas adubadas com biocarvão, com a dose de 19,8 m³ha⁻¹ aos 45 DAS, o que ocasionou maior área foliar, justificando ainda mais os efeitos positivos do biocarvão no crescimento do pimentão. Portanto, o aumento na área foliar está relacionado a uma alteração na composição e abundância da comunidade microbiana no solo, que melhora os aspectos nutricionais e a disponibilidade de nutrientes para o pimentão (Kolton *et al.*, 2011).

As doses de biocarvão influenciaram significativamente o número de frutos, massa fresca e seca dos frutos e diâmetro longitudinal; já as doses de nitrogênio afetaram significativamente ($p < 0,01$) apenas o número de fruto (NF) e a massa seca de fruto (MSF). Entretanto, a interação desses fatores influenciou, de

forma significativa ($p < 0,01$), o número de frutos (NF) e a massa fresca do fruto (MFF) (Figura 3).

Figura 3 - Número de frutos – NF (A) e massa fresca do fruto – MFF (B) das plantas de pimentão em função da interação entre doses de biocarvão e doses de nitrogênio



Nota: X e Y correspondem a doses de nitrogênio e doses de biocarvão, respectivamente. Elaborado pelos autores.

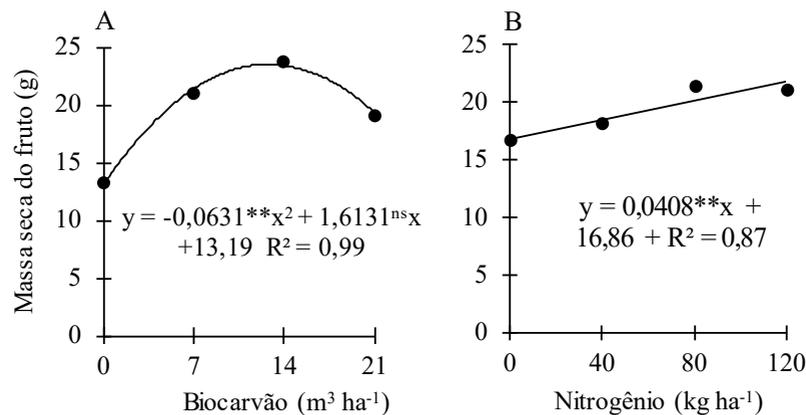
De acordo com a equação de regressão (Figura 3A), as plantas de pimentão do tratamento testemunha, isto é, as que não receberam aplicação de biocarvão e de nitrogênio, produziram o menor número de frutos (3,98 frutos). No entanto, a aplicação de $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de biocarvão, juntamente com 70 kg ha^{-1} de nitrogênio, proporcionou o maior número de frutos (10,08 frutos), correspondendo a um acréscimo de 153,27% (6,10 frutos) em relação às plantas não adubadas (testemunha). Tal resposta ressalta a importância da utilização do biocarvão como fonte de matéria orgânica, pois quando aplicado em doses adequadas, juntamente com a adubação nitrogenada, incrementa a produção das culturas.

O efeito benéfico do nitrogênio até a dose de 70 kg ha^{-1} pode estar relacionado com a eficiência deste elemento em elevar a produção do pimentão, melhorando, desta forma, o suprimento de aminoácidos e outras substâncias orgânicas, proporcionadas pela maior eficiência fotossintética (Campos *et al.*, 2008).

A maior massa fresca de frutos ($35,3 \text{ g}$) foi obtida com a aplicação de $7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de biocarvão e 80 kg ha^{-1} de nitrogênio, representando um aumento de 51,5% ($12,0 \text{ g}$) em relação às plantas do tratamento testemunha. Ao contrário, a menor massa fresca de frutos ($16,24 \text{ g}$) foi obtida com a aplicação de $21 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de biocarvão e 0 kg ha^{-1} de nitrogênio (Figura 3B). O efeito benéfico da aplicação do biocarvão e do nitrogênio sob a massa fresca dos frutos possivelmente ocorre devido à melhor eficiência do uso do nitrogênio.

As doses de biocarvão estimularam a variável MSF, verificando-se que os dados se ajustaram ao modelo quadrático (Figura 4A), com o valor máximo estimado em $23,5 \text{ g}$ das plantas submetidas a $12,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de biocarvão, ocorrendo depleção a partir desta dose. O valor mínimo encontrado de MSF foi de $13,19 \text{ g}$ das plantas de pimentão que não foram adubadas com biocarvão.

Figura 4 - Massa seca do fruto – MSF (A) em função das doses de biocarvão e Massa seca do fruto – MSF (B) em função das doses de nitrogênio



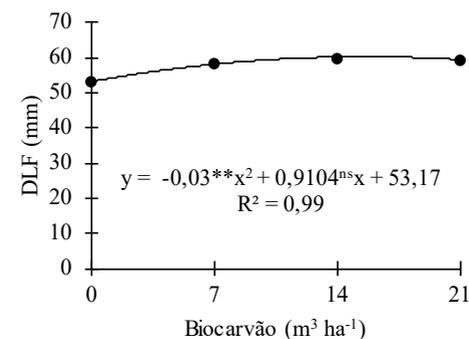
Elaborado pelos autores.

A massa seca de fruto (MSF) também foi afetada de forma positiva pela aplicação de nitrogênio (Figura 4B). O modelo linear ajustado indica que as plantas, quando foram adubadas com dose de 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio, proporcionaram a maior MSF (21,76 g) e a menor (16,86 g) com as plantas cultivadas na ausência da adubação nitrogenada (0 kg ha⁻¹), ou seja, uma redução de 22,52% (4,9 g) entre a maior (120 kg ha⁻¹) e a menor (0 kg ha⁻¹) dose de nitrogênio.

No que se refere ao diâmetro longitudinal do fruto (DLF), observou-se, conforme equação de regressão (Figura 5), efeito quadrático das dosagens de biocarvão, com o valor máximo estimado em 60,3 mm nas plantas submetidas a 15,54 m³ ha⁻¹ de biocarvão, ocorrendo depleção a partir desta dose. O valor mínimo encontrado foi de 53,12 mm nas plantas de pimentão que não foram adubadas com biocarvão, isto é, redução de 13,56% (7,18 mm).

O aumento no DLF até a dose de 15,54 m³ ha⁻¹ pode ser justificado pelo fato de que o biocarvão aplicado em doses adequadas aumenta a disponibilidade de nutrientes e a absorção de água pela planta (Hammer *et al.*, 2014).

Figura 5 - Diâmetro longitudinal dos frutos (DLF) em função das doses de biocarvão

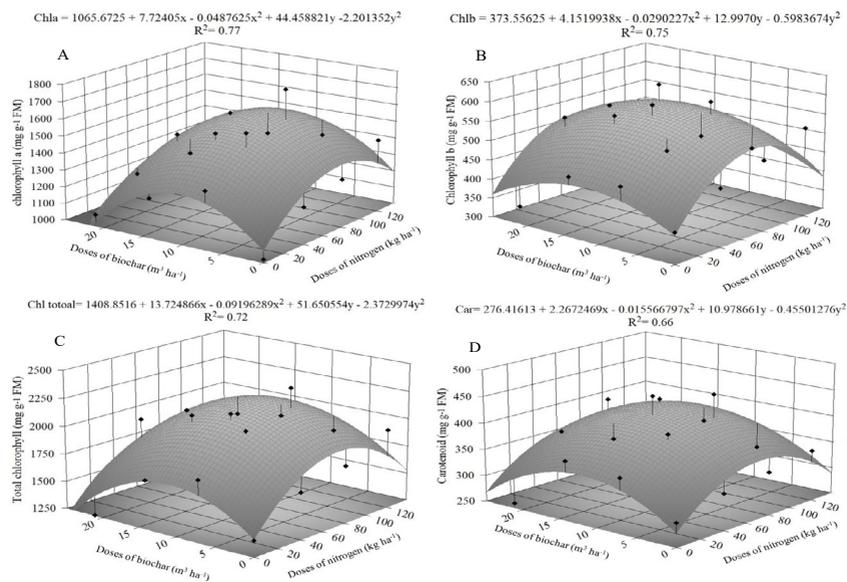


Elaborado pelos autores.

Com base no resumo do teste F (Tabela 2), os pigmentos fotossintéticos do pimentão avaliados pela clorofila a (Cl_a), clorofila b (Cl_b), clorofila total (Cl total) e carotenoides (Car) foram afetados significativamente (p < 0,01) pela interação entre as doses de biocarvão e de nitrogênio. O fator doses de biocarvão afetou todas as variáveis analisadas, exceto a clorofila total. Com relação às doses de nitrogênio, observou-se haver efeito significativo (p < 0,01) para clorofila a, clorofila total e carotenoides.

A interação entre as doses de biocarvão e de nitrogênio influenciou significativamente o teor de clorofila a. Nota-se, por meio da equação de regressão (Figura 6A), que as plantas adubadas com 70 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 10 m³ ha⁻¹ de biocarvão tiveram o maior teor de clorofila a (1596 mg g⁻¹ MF).

Figura 6 - Clorofila *a* (A), Clorofila *b* (B), Clorofila total (C) e Carotenoides (D) do pimentão em função da interação entre doses de biocarvão e doses de nitrogênio



Nota: X e Y correspondem a doses de nitrogênio e doses de biocarvão, respectivamente. Elaborado pelos autores.

Já as plantas de pimentão da testemunha obtiveram um teor de clorofila *a* de 1065,67 mg g⁻¹ MF, correspondendo a uma redução de 33,23% (530,33 mg g⁻¹ MF) quando comparadas às plantas com maior teor de clorofila *a*. O menor teor de Cla (1028,51 mg g⁻¹ MF) foi obtido nas plantas adubadas apenas com 21 m³ ha⁻¹ de biocarvão.

Para clorofila *b* das plantas de pimentão (Figura 6B), verifica-se efeito semelhante ao da clorofila *a*, isto é, a adubação com 70 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 10 m³ ha⁻¹ de biocarvão promoveu o maior teor de clorofila *b* (592,18 mg g⁻¹ MF). Já as plantas do tratamento controle, ou seja, plantas que não foram adubadas, obtiveram um

teor de clorofila *b* de 373,56 mg g⁻¹ MF, correspondendo a uma redução de 36,92% (218,62 mg g⁻¹ MF) quando comparadas às plantas com maior teor de clorofila *b*.

Assim como observado na clorofila *a* e *b*, as plantas adubadas com 70 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 10 m³ ha⁻¹ de biocarvão obtiveram o maior teor de clorofila total (Figura 5C) e carotenoides (Figura 5D), constatando-se, por meio do estudo de regressão, que os maiores valores foram de 2188,18 mg g⁻¹ MF para clorofila total e de 423,13 mg g⁻¹ MF para carotenoides. Entretanto, as plantas de pimentão que não receberam adubação com nitrogênio (0 kg ha⁻¹) e biocarvão (0 m³ ha⁻¹) alcançaram valores de 1408,85 mg g⁻¹ MF para clorofila total e de 273,42 mg g⁻¹ MF para carotenoides, correspondendo a reduções de 35,62 e 34,67% para Cl total e Car, respectivamente, quando comparadas às plantas que obtiveram os maiores valores.

Com base no exposto, pode-se constatar que o biocarvão ocasionou efeito significativo nas variáveis de crescimento de plantas de pimentão, como altura de planta, diâmetro do caule, número de folhas e área foliar, com recomendação de 15 m³ ha⁻¹, que atende à necessidade nutricional do pimentão até os 45 dias após o semeio.

A adubação com 70 kg ha⁻¹ de nitrogênio, associado a 14 m³ ha⁻¹ de biocarvão, promoveu o maior rendimento de pimentão quanto ao número de frutos e à massa fresca de fruto por planta.

Os maiores teores de pigmentos fotossintéticos foram obtidos nas plantas adubadas com 70 kg ha⁻¹ de nitrogênio, associado a 10 m³ ha⁻¹ de biocarvão. Doses de biocarvão acima de 15,54 m³ ha⁻¹ afetam negativamente o diâmetro longitudinal dos frutos de pimentão

Sendo assim, a recomendação de 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 20 m³ ha⁻¹ de biocarvão reduz a produção e os pigmentos fotossintéticos do pimentão.

ESTUDO DE CASO 7

Sintomas de deficiência e crescimento inicial do milho cultivado com biocarvão sob omissão de nutrientes (Mendes *et al.*, 2022)¹¹

Com o objetivo de caracterizar os sintomas visuais de deficiência de macronutrientes e sua relação com o crescimento inicial em plantas de milho BRS 2022, cultivado com biocarvão da cama de aviário, foi realizado um experimento em casa de vegetação pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, com delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial (7 × 3) com os seguintes tratamentos: solução nutritiva completa (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cl, Cu, Fe, Mn, e Zn); soluções nutritivas completas, com omissão apenas de nitrogênio (-N), fósforo (-P), potássio (-K), cálcio (-Ca) ou magnésio (-Mg); e ausência total de nutrientes e três doses crescentes de biocarvão (0, 5 e 10 t ha⁻¹). Três réplicas foram usadas.

O método utilizado para detectar a disponibilidade de nutrientes no biocarvão da cama de aviário para o crescimento inicial do milho foi por meio de medições biométricas e identificação visual de sintomas nutricionais, usando o método “diagnóstico por subtração” nas plantas, que foram submetidas a diferentes deficiências nutricionais (Afrousheh *et al.*, 2010).

As soluções nutritivas foram preparadas conforme Coelho (2007), considerando a curva de absorção de nutrientes da cultura do milho até 40 dias após a semeadura (DAS), o que correspon-

11 . MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; DANTAS, E. R. B.; LAURENTINO, L. G. S.; SILVA, A. A. R.; OLIVEIRA, L. D.; SANTOS, B. D. B.; KUBO, G. T. M. Symptoms of deficiency and initial growth of maize cultivated with biochar under nutrient omission. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, n. 5, p. 2079-2092, 2022.

deu a uma aplicação por vaso de: 2,072 g N, 0,238 g P₂O₅, 1,554 g K₂O, 0,391 g Ca, 0,162 g Mg, 0,157 g S, 0,001 g B, 0,001 g Cu, 0,005 g Mn e 0,004 g Zn

O biocarvão utilizado neste estudo foi produzido no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS), a partir da cama de aviário, resultante da criação de frangos de corte, sob pirólise lenta, a 350°C em mufla. Esse biocarvão apresentou os seguintes atributos: pH = 9,44; CE = 7,33 dS m⁻¹; N = 2,25%; P₂O₅ = 4,08%; K₂O = 4,35%; Ca = 5,04%; Mg = 1,28%; S = 0,41%; B = 0,01%; Zn = 0,05%; Cu = 0,01%; Mn = 0,05%; Fe = 0,72%; umidade = 4,52%; carbono orgânico = 42,22%; e relação C/N = 18,8. A Tabela 1 descreve os tratamentos testados no presente estudo

Tabela 1 – Tratamentos formados pela combinação entre doses de biocarvão e solução nutritiva

TRATAMENTOS	AREIA LAVADA	BIOCARVÃO t ha ⁻¹	N	P	K	CA	MG
1	+	0	-	-	-	-	-
2	+	5	-	-	-	-	-
3	+	10	-	-	-	-	-
4	+	0	+	+	+	+	+
5	+	5	+	+	+	+	+
6	+	10	+	+	+	+	+
7	+	0	-	+	+	+	+
8	+	5	-	+	+	+	+
9	+	10	-	+	+	+	+
10	+	0	+	-	+	+	+
11	+	5	+	-	+	+	+
12	+	10	+	-	+	+	+
13	+	0	+	+	-	+	+
14	+	5	+	+	-	+	+
15	+	10	+	+	-	+	+
16	+	0	+	+	+	-	+
17	+	5	+	+	+	-	+
18	+	10	+	+	+	-	+
19	+	0	+	+	+	+	-
20	+	5	+	+	+	+	-
21	+	10	+	+	+	+	-

Nota: + e -, presença e ausência, respectivamente. Elaborado pelos autores.

A unidade experimental constituiu-se por vasos de Leonard (Vincent, 1970), preenchidos com aproximadamente 1500g de areia lavada e biocarvão, de acordo com cada tratamento. O biocarvão foi utilizado em quantidades que se seguiram a cada tratamento, ou seja, 0, 5,19 e 10,38 g por vaso. Dependendo da composição química do biocarvão, essas quantidades adicionadas aos vasos corresponderam a 0,12, 0,23, 0,21, 0,26 e 0,07 g de N, K₂O, P₂O₅, Ca e Mg, respectivamente, para o tratamento incluindo 5,19 g por vaso; e 0,23, 0,45, 0,42, 0,52 e 0,13 g de N, K₂O, P₂O₅, Ca e Mg, respectivamente, para o tratamento incluindo 10,38 g por vaso.

Quatro sementes de milho, previamente imersas em água destilada por 14 horas, foram semeadas em cada unidade experimental, germinando em aproximadamente três dias. Quando as mudas atingiram o estágio de duas folhas definitivas, aproximadamente seis dias após a emergência, foi realizado o desbaste, deixando apenas a planta mais vigorosa por unidade experimental. Após isso, a cada dois dias, dependendo dos tratamentos, foram aplicados 25 e 50 mL das soluções de macronutrientes e micronutrientes, respectivamente. Durante todo o período experimental, o substrato foi mantido na capacidade do campo e irrigado com água destilada. Vinte dias após a germinação (DAG), o volume da solução de macronutrientes foi aumentado para 50 mL (considerado necessário devido ao aumento da temperatura do ar, que causou um aumento da demanda de evapotranspiração).

O volume total da solução de macro e micronutrientes aplicados após 40 DAG, dependendo dos tratamentos, correspondeu a 750 e 1000 mL por planta, respectivamente. Os sintomas observa-

dos nas plantas de milho, causados pelos tratamentos de omissão de nutrientes, foram descritos e acompanhados até sua completa definição (40 DAG). Nesse momento, as plantas foram coletadas, separadas parte aérea e raízes, e realizadas as seguintes medidas biométricas: altura da planta, diâmetro do caule, número de folhas e área foliar. O material vegetal colhido foi lavado com água deionizada e seco em estufa de ar, forçado a 65°C até peso constante. Esse material foi então utilizado para determinar o peso seco da parte aérea e das raízes.

Os dados foram submetidos à análise estatística e, se significativos pelo teste F ($P < 0,05$ e $P < 0,01$), as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, por meio do programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

De acordo com essa análise, as variáveis indicativas de crescimento e produção de matéria seca das plantas de milho foram influenciadas significativamente ($p < 0,01$), com exceção do diâmetro caulinar (DCL) e da relação entre biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz (BSPA/BSRA), pela interação entre os fatores de omissão de nutrientes e doses de biocarvão. No entanto, notou-se efeito isolado de tais fatores, ambos a ($p < 0,01$) para DCL e BSPA/BSRA.

As médias de altura de planta (APL) e número de folhas (NF) do milho cultivado sem N e P, na ausência de biocarvão, não diferem significativamente entre esses tratamentos e o tratamento sem adubação (Figuras 1A e 1B).

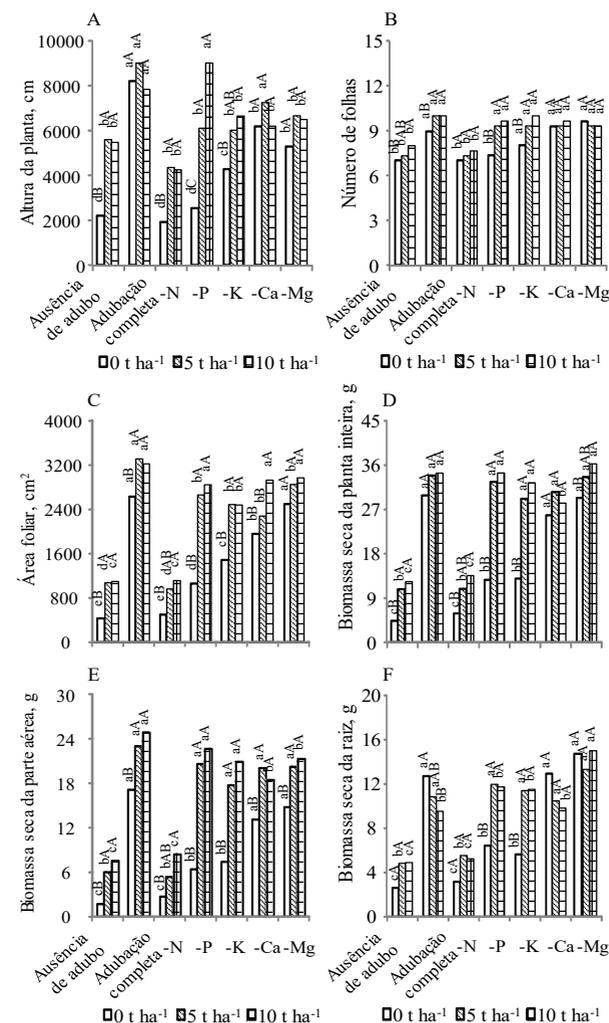
A omissão de nitrogênio na ausência de biocarvão limitou consideravelmente o crescimento do milho, pois, ao final do experimento, essas plantas apresentavam altura das plantas e nú-

mero de folhas menores do que aquelas sob solução completa. Nesse período, o milho apresentou 38,2 cm de altura (dados não transformados) com sete folhas, correspondendo a uma redução de 47,1 e 22,2%, respectivamente, dos valores obtidos com as plantas cultivadas em solução nutritiva completa. Além disso, a omissão de N também reduziu a produção de biomassa seca total (Figura 1D), de biomassa seca da parte aérea (Figura 1E) e de biomassa seca da raiz (Figura 1F) em 80,62, 84,77 e 75,12%, respectivamente, em comparação com as plantas sob a solução nutritiva completa.

Como também mostrado na Figura 1F, a biomassa seca da raiz diminuiu com a aplicação de biocarvão no tratamento completo, atingindo a menor média em 10 t ha⁻¹. Esse mesmo comportamento foi encontrado no tratamento com omissão de Ca, exceto que, neste caso, não houve diferença nas médias entre as diferentes taxas de biocarvão. Com exceção de número de folhas e de biomassa seca da raiz, os tratamentos com deficiência de N (-N) combinados com 5 e 10 t ha⁻¹ de biocarvão induziram aumentos significativos em todas as variáveis analisadas.

Por exemplo, a aplicação dessas doses de biocarvão aumentou a altura das plantas, que foi de 54,9 e 54,3 cm, respectivamente (dados não transformados). Da mesma forma, a biomassa seca da planta inteira aumentou 109,9% e 162,7% com as doses de biocarvão de 5 e 10 t ha⁻¹, respectivamente. Esses resultados mostram que o teor de nitrogênio presente na cama de aviário (2,25%) provavelmente foi aproveitado pela cultura, mas não foi suficiente para o desenvolvimento saudável do milho.

Figura 1 - Altura da planta, número de folhas, área foliar, biomassa seca da planta inteira, biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz em função da interação omissão de nutrientes e doses de biocarvão



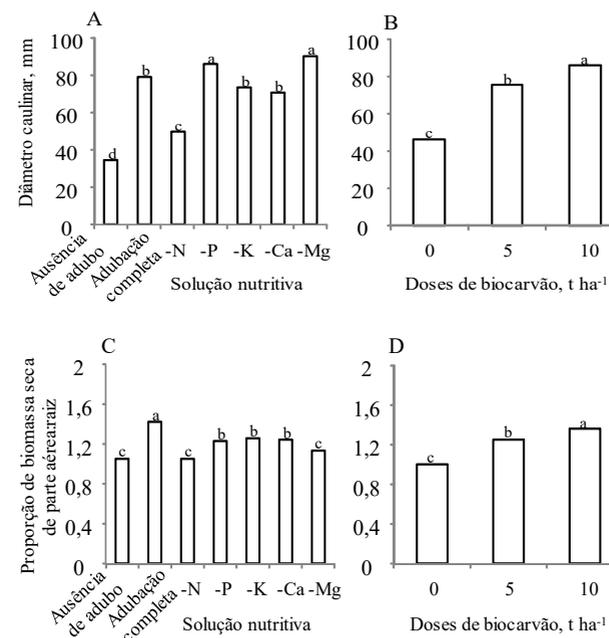
Nota: Em médias seguidas de mesma letra minúscula, as soluções não diferem entre si dentro da mesma dose de biocarvão; e em médias seguidas de mesma letra maiúscula, as doses de biocarvão não diferem entre si dentro da mesma solução nutritiva. Elaborado pelos autores.

Depois do N, o fósforo foi o segundo elemento mais limitante. Comparando o tratamento com a ausência de P e o tratamento completo com nutrientes, foram observadas reduções significativas de 39,6, 22,2, 59,7, 57,2, 63,1 e 49,2% em altura de plantas, número foliar, área foliar, biomassa seca da planta inteira, biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz, respectivamente.

Em relação ao diâmetro caulinar (Figura 2A), a omissão de P resultou em 12,37 mm (dados não transformados), estatisticamente superior aos 12,01 mm obtidos com o tratamento completo com nutrientes. Esses resultados corresponderam ao efeito isolado das soluções nutritivas, portanto a contribuição das taxas de biocarvão explica o aumento do diâmetro caulinar no tratamento -P, que foi maior do que o observado no tratamento completo com nutrientes.

Comparando com o tratamento de ausência de biocarvão, as doses de biocarvão na solução com -P aumentaram significativamente todas as variáveis analisadas. Entretanto, exceto para altura de plantas, as médias não diferiram entre as doses de 5 e 10 t ha⁻¹. Quando comparamos a ausência de biocarvão com a aplicação de 10 t ha⁻¹ do produto, houve aumentos notáveis em altura de plantas, área foliar, biomassa seca da planta inteira, biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz, das ordens de 72,8 (dados não transformados), 167,8, 170,4, 260,3 e 80,9%, respectivamente. No entanto, as médias dessas variáveis não diferiram entre a solução completa e sem P sob 10 t ha⁻¹ de biocarvão.

Figura 2 - Diâmetro caulinar e relação entre biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz em função do efeito isolado de solução nutritiva e doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

Apesar da alta disponibilidade de P no solo proporcionada pelo biocarvão, acredita-se que não supere a eficiência dos fertilizantes minerais. No entanto, pode melhorar a disponibilidade desse nutriente. No tratamento -P, as plantas de milho apresentaram uma relação entre biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz de 1,6 (dados não transformados), o que foi estatisti-

camente inferior ao resultado obtido com o tratamento completo com nutrientes, mas não difere dos tratamentos com omissão de K e Ca (Figura 2C).

A planta foi afetada pela omissão de potássio, sendo este o terceiro elemento mais limitante do crescimento e da produção de biomassa do milho. Na dose zero de biocarvão, com a omissão de K, as plantas de milho apresentaram, independentemente da variável analisada, médias estatisticamente superiores às do tratamento de ausência de nutrientes. No entanto, o mesmo comportamento não foi verificado em relação ao tratamento completo, constatando que a omissão de potássio na solução nutritiva promove efeitos negativos no desenvolvimento vegetativo da planta, cuja diminuição na altura da planta, na área foliar, na biomassa seca da planta inteira, na biomassa seca da parte aérea e na biomassa seca da raiz foram de 24,74; 43,88; 56,61; 56,91 e 56,22%, respectivamente.

O efeito de doses de biocarvão dentro de solução promoveu aumentos significativos no número de folhas, área foliar, biomassa seca da planta inteira, biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz, cujas médias não diferem entre si com a aplicação de 5 e 10 t ha⁻¹, contudo foram estatisticamente superiores a dose zero. É importante destacar que o biocarvão incrementou em 125,46% e 150,54% a biomassa seca da planta inteira, aplicando-se 5 e 10 t ha⁻¹, respectivamente. Também se verificaram acréscimos na altura da planta com o uso do biocarvão, sem diferença da dose 5 t ha⁻¹ para as doses zero e 10 t ha⁻¹. Ainda avaliando o efeito de biocarvão, o diâmetro caulinar e a relação biomassa seca parte aérea e biomassa seca da raiz tiveram, com o uso de 10 t ha⁻¹ de biocarvão, as maiores médias.

Quanto ao efeito de solução dentro de doses de biocarvão, os tratamentos solução completa e omissão de potássio com 5 e 10

t ha⁻¹ de biocarvão promoveram médias estatisticamente semelhantes entre si para número de folhas, biomassa seca da planta inteira, biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz, evidenciando assim que o biocarvão de cama de aviário utilizado elevou a concentração de K disponível no solo. Em contraste com outros elementos que podem ser volatilizados (por exemplo, N) ou mantidos em formas relativamente insolúveis (por exemplo, Mg) durante a pirólise, o K será amplamente conservado e convertido em sais com alta solubilidade (Karim *et al.*, 2017). Por isso, neste momento, cabe lembrar que o biocarvão de cama de aviário utilizado neste trabalho apresenta, em sua constituição, compostos que contêm o potássio.

Ao analisar o efeito do biocarvão nas soluções sem Ca e Mg sobre o comportamento do milho, observamos que área foliar sob omissão de Ca, biomassa seca da planta inteira sob omissão de Mg e biomassa seca da parte aérea em ambos os tratamentos apresentaram diferenças significativas em suas médias com a aplicação de biocarvão. A área foliar e o diâmetro caulinar na solução sem Ca foram menores do que os observados no tratamento completo com nutrientes. Exceto para área foliar, as médias das variáveis analisadas sob omissão de Ca e Mg na ausência de biocarvão foram semelhantes entre si.

Além disso, com exceção de altura de plantas, biomassa seca da parte aérea e biomassa seca da raiz, as médias foram estatisticamente semelhantes quando comparadas com as encontradas na solução nutritiva completa, mostrando que a falta desses nutrientes não limitou a produção de biomassa. As concentrações de Ca e Mg presentes no substrato (areia lavada) 1,0 e 0,5 cmol_c dm⁻³, respectivamente, aparentemente supriram em parte o Ca e o Mg necessários para o crescimento do milho. O aumento mais signifi-

ficativo foi observado para SDB, correspondendo a 54,1% na dose de biocarvão de 5 t ha⁻¹ na omissão de Ca e 44,9% na dose de 10 t ha⁻¹ na omissão de Mg. A explicação para esse comportamento pode estar relacionada à menor disponibilidade de Ca e Mg induzida pela aplicação do biocarvão. O aumento da concentração de K com a aplicação de biocarvão pode causar uma interação antagônica com Ca e Mg, o que pode levar a uma diminuição da biomassa seca da raiz.

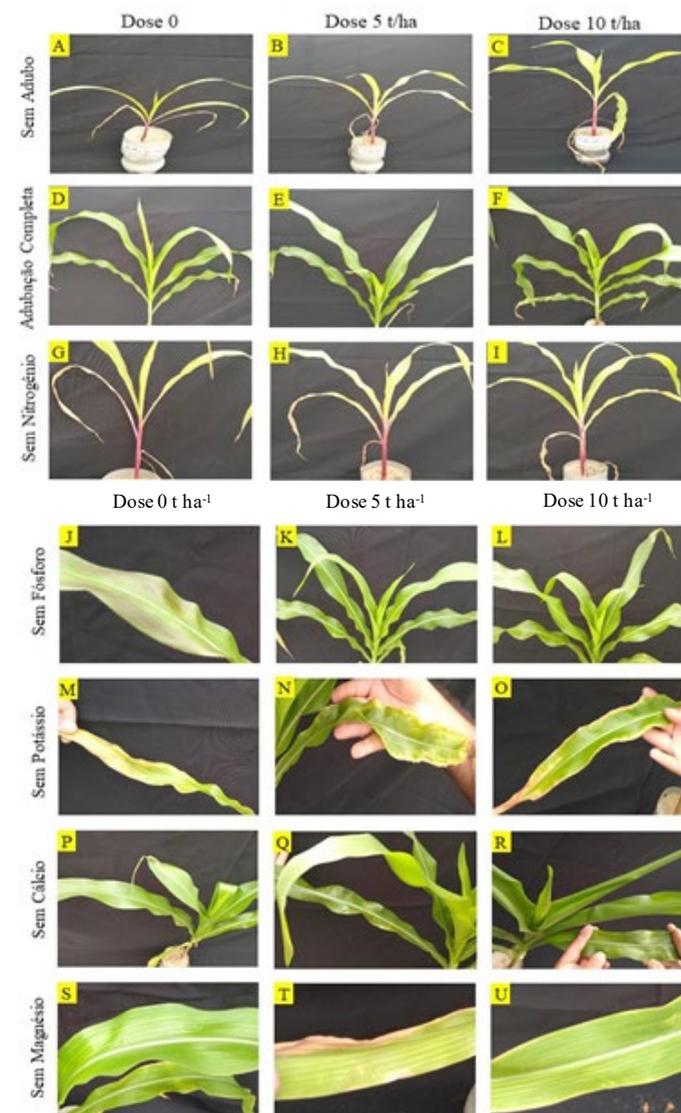
Nos tratamentos sem adubação, o crescimento das plantas foi muito baixo, com sintomas gerais de deficiência, que diminuíram com a aplicação de biocarvão (Figuras 3A, 3B e 3C). O milho cultivado nas soluções com fertilização completa apresentou sintomas leves, que diminuíram com a aplicação de biocarvão (Figuras 3D, 3E e 3F).

Os primeiros sintomas de deficiência de N foram observados 18 dias após a emergência das sementes. As plantas apresentavam caule fino e clorose, que se iniciava nas folhas mais velhas, havendo então perda uniforme da cor verde em toda a lâmina foliar (Figura 3G). À medida que a deficiência se desenvolveu durante o ciclo de crescimento, o N foi mobilizado das folhas inferiores e translocado para as folhas jovens, tornando as folhas inferiores pálidas e marrons.

Plantas cultivadas nas soluções sem nitrogênio (-N) apresentaram os mesmos sintomas de deficiência de nitrogênio quando adicionadas as doses de biocarvão de 5 e 10 t ha⁻¹ (Figuras 3H e 3I). Embora o biocarvão utilizado neste estudo tenha 2,3% de N (baixo teor deste elemento), não se sabe se ele está na forma mineralizada e disponível para as plantas.

Plantas sob omissão de P apresentaram os sintomas de deficiência, começando com uma coloração verde escura nas folhas mais velhas e tons de roxo nas pontas e bordas (Figura 3J).

Figura 3 – Diagnóstico por subtração dos macronutrientes na cultura do milho híbrido BRS 2022 aos 37 dias, após a emergência em função da aplicação das doses de biocarvão



Elaborado pelos autores.

Esses sintomas de deficiência de P não foram detectados nas plantas cultivadas em soluções com 5 e 10 t ha⁻¹ de biocarvão (Figuras 3K e 3L). Este resultado indica que parte do P no biocarvão aplicado está aparentemente na forma solúvel e prontamente disponível para as plantas. É importante destacar que a composição do biocarvão de cama de frango utilizada neste estudo inclui fosfato de potássio dibásico.

Vale ressaltar também que os sintomas visuais de deficiência de P foram observados apenas no tratamento -P sem biocarvão (Figura 3J), o que sugere que o biocarvão possui uma concentração importante de P disponível. Os sintomas diminuíram com a aplicação do biocarvão. A ausência de K (-K) na solução nutritiva produziu uma pequena clorose amarelada nas folhas mais velhas (Figura 3M), com necrose marrom claro atingindo os ápices foliares. As manchas necróticas nas bordas das folhas provavelmente se devem ao acúmulo de compostos, como putrescinas, que desencadeiam a produção de compostos oxidativos, resultando em morte celular (Chen *et al.*, 2016).

Apesar do maior crescimento das plantas de milho com a aplicação do biochar, independentemente das doses aplicadas, sintomas de deficiência de K também foram observados com a sua aplicação. A intensidade desses sintomas foi menor quando comparadas com as observadas no tratamento envolvendo a omissão de K (Figuras 3N, 3O).

No estágio inicial da deficiência, as plantas submetidas à omissão de Ca (-Ca) apresentaram folhas jovens com coloração verde pálida e, a seguir, lesões variando do amarelo ao branco nas áreas entre as nervuras foliares (Figura com 3P). Embora a ausência de Ca tenha resultado em diferenças significativas para algumas variáveis com aplicação de biocarvão (área foliar e diâmetro caulinar), a presença de Ca na areia lavada (1,0 cmol_c dm⁻¹), utilizada no

experimento, mesmo após lavagem com ácido clorídrico, contribuiu para os sintomas visuais de deficiência não tão graves. Com as doses de biocarvão de 5 e 10 t ha⁻¹ (Figuras 3T e 3R), apenas uma leve clorose foi observada nas folhas mais velhas, embora esses sintomas não sejam característicos da deficiência de Ca, pois as folhas mais novas são normalmente as primeiras a serem afetadas, devido à baixa mobilidade desse elemento no floema.

Embora a areia lavada tenha concentração de Mg de 0,5 cmol_c dm⁻³, sintomas de deficiência deste macronutriente foram observados nas plantas de milho na solução com ausência de Mg (-Mg). Inicialmente, os sintomas foram observados nas folhas mais velhas, como uma clorose amarelo pálido entre as nervuras na seção intermediária, da borda ao centro da folha, cobrindo toda a folha (Figura 3S).

Os sintomas progrediram em direção às folhas superiores e apareceram faixas marrons enferrujadas nas folhas mais velhas, o que ocorreu devido à translocação do Mg móvel para as regiões de crescimento mais novas (Marschner, 1995). Esses sintomas foram identificados independentemente da taxa de biocarvão aplicada (Figuras 3T e 3U).

Com base no exposto, pode-se dizer que, com exceção de P, nas doses de 5 e 10 t ha⁻¹ de biocarvão, foi possível caracterizar distintamente os sintomas de deficiência provocados pela omissão dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg no milho BRS 2022. Os tratamentos com as omissões individuais de N, P, K foram os que mais limitaram o crescimento; e a produção de biomassa seca do milho e do biocarvão proveniente de cama de aviário foi uma fonte prontamente disponível de nutrientes do solo, em especial, P e K. Além disso, promoveu maior crescimento e produção de biomassa do milho, independentemente, do nutriente omitido.

ESTUDO DE CASO 8

Estado nutricional, desenvolvimento, produção de milho e propriedades químicas de solo pós-colheita em função de doses de biocarvão (Mendes *et al.*, 2021)¹²

Objetivando investigar o estado nutricional, o crescimento e a produção do híbrido de milho BRS 2022, utilizando biocarvão de cama de aviário como fonte alternativa de fertilizante, e avaliar a influência deste biocarvão nas propriedades químicas do solo após a colheita da cultura foi conduzido um experimento em casa de vegetação agrícola pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - PB, utilizando amostras de solo classificado como argissolo acizentado distrófico, coletadas na camada arável (0 - 0,2 m de profundidade), no município de Lagoa Seca - PB (07^o 09 '22.42' S; 35^o 52' 09.64" W). Essas amostras foram caracterizadas quimicamente de acordo com Teixeira *et al.* (2017), apresentando os seguintes resultados: pH (H₂O) = 5,35; carbono orgânico = 18,8 g kg⁻¹; P = 1,27 mg kg⁻¹ e em cmol_c kg⁻¹: Ca = 2,78; Mg = 1,26; Na = 0,11; K = 0,17; H + Al = 3,27 e CTC = 7,59.

O biocarvão utilizado neste trabalho foi produzido no Laboratório de Irrigação e Salinidade - LIS da UFCG, a partir da cama de aviário, sob pirólise lenta a 350°C, por 3 horas, utilizando forno mufla, apresentando os seguintes atributos químicos: pH = 9,44; CE = 7,33 dS m⁻¹; P₂O₅ = 4,08%; K₂O = 4,35%; Ca = 5,04%; Mg = 1,28%; S = 0,41%; Fe = 0,72%; Mn = 0,05%; Cu = 0,01%; Zn = 0,05%; B = 0,01%; carbono orgânico = 42,22%; C / N = 18,76.

12 . MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; TITO, G. A.; GUERRA, H. O. C.; LAURENTINO, L. G. S.; KUBO, G. T. M.; DANTAS, E. R. B.; SILVA, Y. S.; OLIVEIRA, L. D. Development and production of maize as a function of biochar rates. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 42, n. 6, Suplemento 2, p. 3707-3720, 2021.

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com seis tratamentos e quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais. Os tratamentos corresponderam à aplicação de doses crescentes de biocarvão, 0,00; 2,0; 4,0; 6,1; 8,1 e 10,1 t ha⁻¹ para o cultivo de milho (*Zea mays* L.), híbrido BRS 2022. Essas doses corresponderam ao dobro das quantidades necessárias para elevar a saturação por base do solo para 63; 69; 75; 81 e 87%, respectivamente, calculadas com base no carbonato de cálcio (Poder Relativo de Neutralização Total, PRNT, 100%). Isso foi feito porque não é conhecido o PRNT do biocarvão.

Na condução do experimento, utilizaram-se recipientes plásticos de 20 dm³ de capacidade, preenchidos com aproximadamente 23 kg de solo. Após a incorporação das doses de biocarvão, de acordo com os tratamentos, o solo foi irrigado até atingir 90% da capacidade de campo (CC), de forma a garantir a efetivação do processo de germinação e de desenvolvimento das plântulas. O semeio foi realizado colocando-se três sementes do milho BRS 2022 por vaso, a 0,05 m de profundidade e distribuídas de forma equidistante. Após a germinação, por volta dos dez dias após a semeadura (10 DAS), realizou-se o desbaste, deixando-se uma planta por unidade experimental.

A irrigação foi realizada por gotejamento, automatizada através de um sistema Arduíno MEGA2560, que apresenta sensores que medem a temperatura do ambiente e a umidade do solo (higrômetro). Com leituras em tempo real, o sistema de irrigação era acionado toda vez em que a umidade do solo era inferior a 70% da CC; e desligava quando atingia 90% da CC.

A coleta das folhas para diagnose foliar foi realizada na época do florescimento, sendo retirada a folha oposta e da base da espiga na região do terço médio, quando 50% das plantas já haviam

emitido o pendão, segundo o método descrito por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Essas folhas foram secas em estufa de circulação forçada de ar, com temperatura ajustada a 65°C, por um período de 48 horas, moídas, peneiradas em 20 mesh e analisadas em relação à concentração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) no tecido foliar (Carmo *et al.*, 2000).

As variáveis de crescimento e produção avaliadas ao término do experimento (aos **83 dias** após o semeadura do milho) foram: alturas da planta (cm) e da inserção da primeira espiga (cm), diâmetro do colmo (mm), número de folhas, área foliar (m²), comprimento de internódios (cm), número de internódios, fitomassa seca de colmos (g), de folhas (g) e total (colmos + folhas + espigas, em g), massa da espiga (g), de grãos por planta (g) e de 1000 grãos (g), comprimento e diâmetro de espigas (cm). As fitomassas e as espigas foram secas em estufa a 65°C, sob ventilação forçada, até atingirem massa constante.

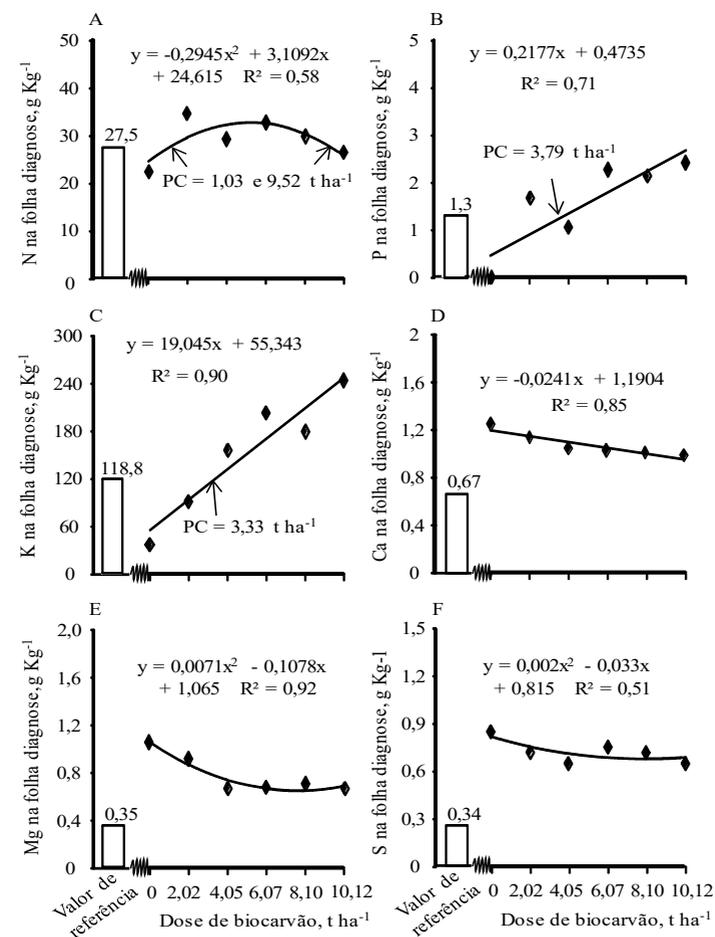
No final do experimento, 83 dias após a semeadura do milho, amostras de solo foram coletadas em função dos tratamentos e, em seguida, analisadas quimicamente quanto à concentração de cálcio, magnésio, fósforo e potássio, de acordo com Teixeira *et al.* (2017). A concentração de nitrogênio foi estimada dividindo o teor de carbono orgânico por dez.

Uma vez atendidas as pressuposições de normalidade (Teste de Shapiro Wilk) e homogeneidade (Teste de Bartlett), os dados foram submetidos à análise de variância, com nível de significância determinado pelo teste F a 5% de probabilidade. O efeito das doses de biocarvão foi analisado por meio de regressão polinomial, utilizando o software estatístico SISVAR, de acordo com Ferreira (2011).

As concentrações dos nutrientes analisados no tecido foliar foram discutidas com base nos teores críticos sugeridos por Büll (1993), ou seja, 27,5; 1,9; 17,5; 2,3; 1,5 e 1,5 g kg⁻¹ para N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente.

A maior concentração de nitrogênio (N) no tecido foliar do milho correspondeu a 32,82 g kg⁻¹, aplicando 5,28 t ha⁻¹ de biocarvão (Figura 1A).

Figura 1 - Concentração dos nutrientes no tecido foliar do milho BRS 2022 em função da aplicação de doses de biocarvão de cama de aviário



Nota: Os valores das colunas correspondem aos teores críticos dos nutrientes (Büll, 1993), cujos valores não transformados são: 27,5; 1,9; 17,5; 2,3; 1,5 e 1,5 g kg⁻¹ para N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente; e PC é a dose mínima necessária para que haja ou não deficiência nutricional. Elaborado pelos autores.

Com relação ao teor crítico, segundo Büll (1993), o uso de biocarvão entre as doses de 1,03 a 9,52 t ha⁻¹ foi suficiente para que a concentração desse nutriente variasse numa faixa considerada adequada. É comum que biocarvões apresentem baixa concentração de N em sua constituição, sendo assim, o teor deste nutriente foi influenciado pela adubação química realizada na condução do experimento. Mesmo com a adubação nitrogenada, adubando-se com 5,28 t ha⁻¹ de biocarvão, verificou-se um aumento na concentração de N foliar de 19,34% quando comparado ao teor crítico. Ainda com relação à Figura 1A, o comportamento quadrático indica uma suposta interação antagônica entre o K e o N; ou uma imobilização do nitrogênio nas doses mais elevadas de biocarvão de modo a diminuir a absorção desse nutriente pela planta.

O teor de fósforo (P) no tecido foliar do milho aumentou a uma taxa de 0,2177 g kg⁻¹ para cada t ha⁻¹ de biocarvão aplicado (0,111 g kg⁻¹, não transformado), apresentando, como maior média, 2,67 g kg⁻¹ de P (2,52 g kg⁻¹ não transformado) com o uso de 10,12 t ha⁻¹ de biocarvão (Figura 1B). Ainda com relação a esta figura, percebeu-se que, entre as doses de 3,79 a 10,12 t ha⁻¹, o teor foliar de P encontrou-se na faixa superior ao valor crítico de referência (Büll, 1993). Contudo, doses superiores ao testado nesta pesquisa poderão acarretar uma concentração excessiva de P, que, segundo Gott *et al.* (2014), corresponde a valores superiores a 3,8 g kg⁻¹. O aumento no teor de fósforo verificado neste trabalho esteve associado à biomassa utilizada na produção do biocarvão, ou seja, da cama de aviário, que apresentou compostos fosfatados em sua constituição.

Assim como o fósforo, o teor de potássio (K) também teve seu teor no tecido foliar do milho aumentado linearmente a uma taxa de 19,045 g kg⁻¹ de biocarvão aplicado (1,389 g kg⁻¹, não trans-

formado), apresentando, como maior média, 248,07 g kg⁻¹ de K (25,78 g kg⁻¹ não transformado) com o uso de 10,12 t ha⁻¹ de biocarvão (Figura 1C). Ainda com relação a esta figura, percebeu-se que, entre as doses de 3,33 a 10,12 t ha⁻¹, o teor de K no tecido foliar encontrou-se na faixa superior ao valor crítico de referência (Büll, 1993). O milho apresenta excesso de K foliar quando apresenta valores superiores a 28,9 g kg⁻¹ (Gott *et al.*, 2014). Tal valor seria alcançado neste estudo com uma dose superestimada em 13,27 t ha⁻¹ de biocarvão.

Cálcio, magnésio e enxofre (S) apresentaram comportamento semelhante, ou seja, seus teores diminuíram com o uso do biocarvão (Figuras 1D, 1E e 1F). Apesar destes decréscimos, a planta não apresentou, independentemente da dose de biocarvão aplicada, deficiência de nenhum desses macronutrientes secundários. As menores concentrações corresponderam a 0,95 g kg⁻¹ (3,75 g kg⁻¹ não transformado aplicando 10,12 t ha⁻¹); 0,656 g kg⁻¹ (2,44 g kg⁻¹ não transformado aplicando 7,59 t ha⁻¹) e 0,68 g kg⁻¹ (2,95 g kg⁻¹ não transformado aplicando 8,25 t ha⁻¹) para Ca, Mg e S, respectivamente. A diminuição dos teores de Ca e Mg pode ter ocorrido pelo excesso de K absorvido pela planta, o que compromete a absorção de Ca e Mg. O excesso de K no solo pode resultar em um efeito antagônico, no qual K reduz a absorção de Ca e Mg (Hawkesford *et al.*, 2011).

Os resultados sugerem que, apesar de o biocarvão de cama de aviário apresentar em sua constituição Ca (5,04%) e Mg (1,28%), a adição deste insumo não garante a disponibilidade imediata desses cátions para a absorção de milho. Portanto, sugere-se que a redução na absorção foi atribuída à liberação lenta de Ca e Mg devido à forte ligação com o biocarvão e/ou ao efeito antagônico promovido pelo K. Conforme as análises estatísticas, a altura

da planta aumentou em função da aplicação de biocarvão, cujas médias, quando comparadas ao tratamento controle, foram superiores em todas as dosagens. A análise de regressão revelou haver um aumento na altura do milho até a dose 7, 9 t ha⁻¹ (219,2 cm), sendo que a menor altura (170,6cm) foi observada no tratamento controle (Figura 2A).

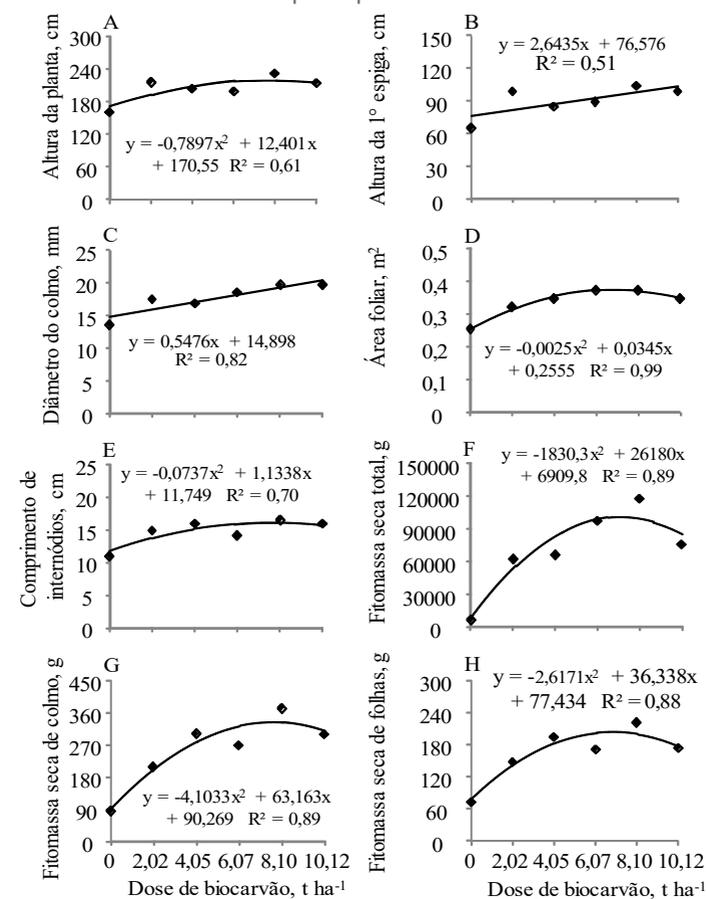
Ainda com relação à altura da planta, a maior média observada neste estudo (219,2 cm) foi superior ao relatado por Neves *et al.* (2015), ou seja, 197 cm para o híbrido BRS 2022 adubado na semeadura com 150 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, 450 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e em cobertura com 150 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio aos 30 e 60 dias após a emergência da planta, períodos que correspondem às fases vegetativas V3 e V6, respectivamente.

A altura de inserção da primeira espiga aumentou linearmente a uma taxa de 2,6 cm por tonelada de biocarvão aplicado ao solo, cuja maior altura correspondeu a 103,3 cm, aplicando-se 10,1 t ha⁻¹ deste substrato (Figura 2B). Essa altura foi 54,2% maior se comparada aos 67 cm verificados por Neves *et al.* (2015). Embora as plantas que apresentam maior altura de inserção da espiga possuam maior predisposição ao acamamento, esse evento não ocorreu no presente estudo.

Maior altura de planta e de inserção da primeira espiga obtida com o uso de biocarvão sugerem que este disponibiliza nutrientes para a cultura do milho, entre os quais, o P (40,8 g kg⁻¹). Assim como a altura de inserção da primeira espiga, os valores do diâmetro do colmo ajustaram-se ao modelo de regressão linear. Esta variável apresentou uma taxa de 0,55 mm por tonelada de biocarvão aplicado ao solo, e um maior diâmetro médio de 20,4 mm com a dose de 10,1 t ha⁻¹ (Figura 2C). Quando comparado ao tratamento

controle, a maior dose de biocarvão promoveu um aumento no diâmetro caulinar de 37,2%. Este resultado é promissor, uma vez que o colmo é uma estrutura de reserva, a qual permite a translocação de fotoassimilados para os grãos (Fabrini *et al.*, 2021).

Figura 2 - Altura da planta (A), altura de inserção da primeira espiga (B), diâmetro do colmo (C), área foliar (D), comprimento de internódios (E), fitomassa seca total (colmos + folhas + espigas) (F), dos colmos (G) e das folhas (H) por planta em função de diferentes doses de biocarvão para plantas de milho BRS 2022



A maior área foliar (AF) do milho foi de 0,375 m² para o tratamento de 6,9 t ha⁻¹ de biocarvão (Figura 2D). O aumento significativo da AF indica um maior crescimento nas plantas de milho.

O maior comprimento de internódio (16,1 cm) foi obtido com a aplicação de 7,7 t ha⁻¹ de biocarvão (Figura 2E). Contudo, é importante ressaltar que, no presente trabalho, a avaliação do comprimento de internódios foi realizada aos 83 dias após a semeadura. Geralmente, plantas que apresentam maior comprimento de internódios estão mais susceptíveis ao acamamento (arqueamento das plantas em virtude da flexão da haste) ou à quebra. No entanto, apesar de o biocarvão aumentar o comprimento de internódios, tal comportamento não foi verificado neste estudo.

No caso da fitomassa seca total (FST), as doses de biocarvão promoveram um aumento quadrático na produção desta variável (Figura 2F), sendo que a maior FST correspondeu a 175,3 g por planta (correspondente a 100.527,3 g por planta, dados transformados), aplicando-se 7,2 t ha⁻¹ do biocarvão. O acréscimo na produção entre as doses testemunha e 7,2 t ha⁻¹ foi equivalente a 339,8% (dados não transformados). Considerando que as plantas foram colhidas com um percentual de 70% de umidade, a maior matéria fresca total corresponderia a 573,5 g por planta (dados não transformados).

A fitomassa seca dos colmos das plantas de milho (FSC) aumentou em função da aplicação de biocarvão, apresentando como maior média 83,1 g planta⁻¹ (333,3 g planta⁻¹, dados transformados) para a dose de 7,7 t ha⁻¹. (Figura 2G). Mesmo comportamento também foi observado para fitomassa seca de folhas (FSF), cuja maior média foi de 29,1 g planta⁻¹ (203,6 g por planta, dados transformados) com o uso de 6,9 t ha⁻¹ de biocarvão (Figura 2H).

Os maiores rendimentos de fitomassa e crescimento do milho com o uso do biocarvão está relacionado aos nutrientes nele contidos e, provavelmente, à presença de substâncias húmicas, provenientes da sua decomposição, as quais têm propriedades hormonais que estimulam o crescimento das plantas e melhoram a produtividade (Fagbenro *et al.*, 2013). A disponibilidade de nutrientes contidos no biocarvão, particularmente dos elementos fósforo e potássio, fica demonstrada com as respostas dos parâmetros de crescimento e produção do milho obtidas neste trabalho.

O biocarvão de cama de aviário influenciou o desenvolvimento do milho, no entanto, deve-se salientar que os efeitos da aplicação deste biocarvão no rendimento das culturas são complexos e são funções de vários fatores, como propriedades da matéria-prima do biocarvão, taxa de aplicação, propriedades do solo, clima, respostas às culturas e práticas de manejo.

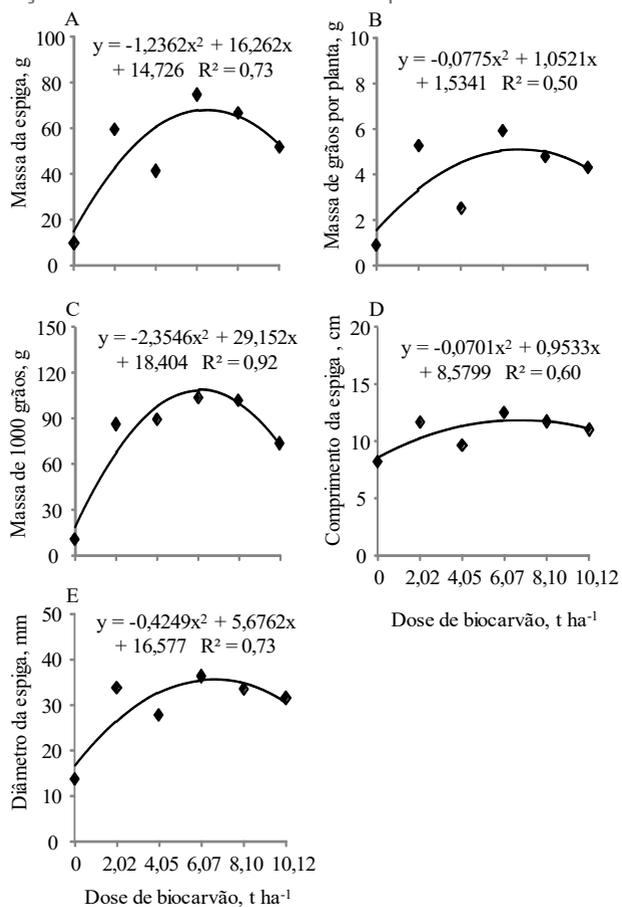
Com relação à produção de espigas, independentemente da dose aplicada de biocarvão, colheu-se apenas uma espiga por planta, mas a massa de espigas aumentou significativamente com o uso do biocarvão, cuja maior massa correspondeu a 68,2g, com o uso de 6,6 t ha⁻¹, o que representou um aumento de 363,2% quando comparado ao tratamento controle (Figura 3A).

A massa de grãos por espiga apresentou comportamento semelhante à massa de espigas, apresentando como maior média 26,0 g (dados não transformados) com o uso de 6,6 t ha⁻¹ (Figura 3B). Comparando esta produção com os 2,4 g, obtidos na ausência de biocarvão (dados não transformados), constatou-se que este insumo aumentou 1006,8%.

Ainda com relação à Figura 3B, o ajuste das médias da massa de grãos ao modelo quadrático de regressão sugere que a diminuição na produção nas doses superiores a 6,59 t ha⁻¹ pode estar as-

sociada a vários motivos, entre eles, à presença de cátions básicos no biocarvão que elevou, no solo em estudo (após a incubação), a saturação de bases (V%) para 87%, com a aplicação da maior dose (10,12 t ha⁻¹).

Figura 3 - Massa da espiga (A), massa de grãos por planta (B), massa de 1000 grãos (C), comprimento (D) e diâmetro de espigas (E) em função das doses de biocarvão aplicadas no milho BRS 2022



Elaborado pelos autores.

É importante ressaltar que o aumento na V% ocorreu principalmente pela contribuição do K e Na; e que a V% recomendada para o monocultivo do milho corresponde a 65% (Brito *et al.*, 2019).

O aumento na fertilidade do solo com aplicações de quantitativos superiores a 6,6 t ha⁻¹ de biocarvão provavelmente promoveu desequilíbrio e prejuízos ao metabolismo da planta, interferindo nos processos bioquímicos que ocorrem no seu interior. Com o metabolismo afetado, as funções vitais foram prejudicadas e os danos se refletiram na diminuição da produção de grãos.

Apesar de não apresentado neste trabalho, o número de linhas de grãos por espiga foi determinante na produção de grãos, isso porque, com exceção das espigas produzidas com 6,1 t ha⁻¹ de biocarvão, as demais apresentaram baixo enchimento de grãos. Apesar de ter realizado adubações nitrogenadas parceladas em três aplicações, a alta concentração de potássio pode ter diminuído a disponibilidade do nitrogênio para a planta, o que afetou negativamente o número de grãos por espiga e o peso da espiga.

Outro fator importante que também pode ter contribuído para a baixa produção de grãos foi o tempo de incubação neste estudo, ou seja, o plantio foi realizado três dias após a aplicação de biocarvão ao solo. A massa de mil grãos foi influenciada significativamente pelas doses de biocarvão, sendo que o maior rendimento (108,63g) foi obtido com a aplicação de 6,2 t ha⁻¹ (Figura 3C).

Quanto ao comprimento e ao diâmetro das espigas, suas maiores médias corresponderam a 11,8 cm e 35,5 mm, aplicando-se 6,8 e 6,7 t ha⁻¹, respectivamente (Figuras 3D e 3E); e as menores médias foram observadas para o tratamento controle (sem biocarvão). O comprimento da espiga está diretamente ligado ao potencial produtivo do milho, visto que espigas de maior tama-

nhos podem possuir maior número de grãos na fileira. Espigas que apresentam maiores tamanhos estão associadas a maiores produtividades de plantas de milho, visto que essa característica exerce efeito sobre o aumento do peso dos grãos.

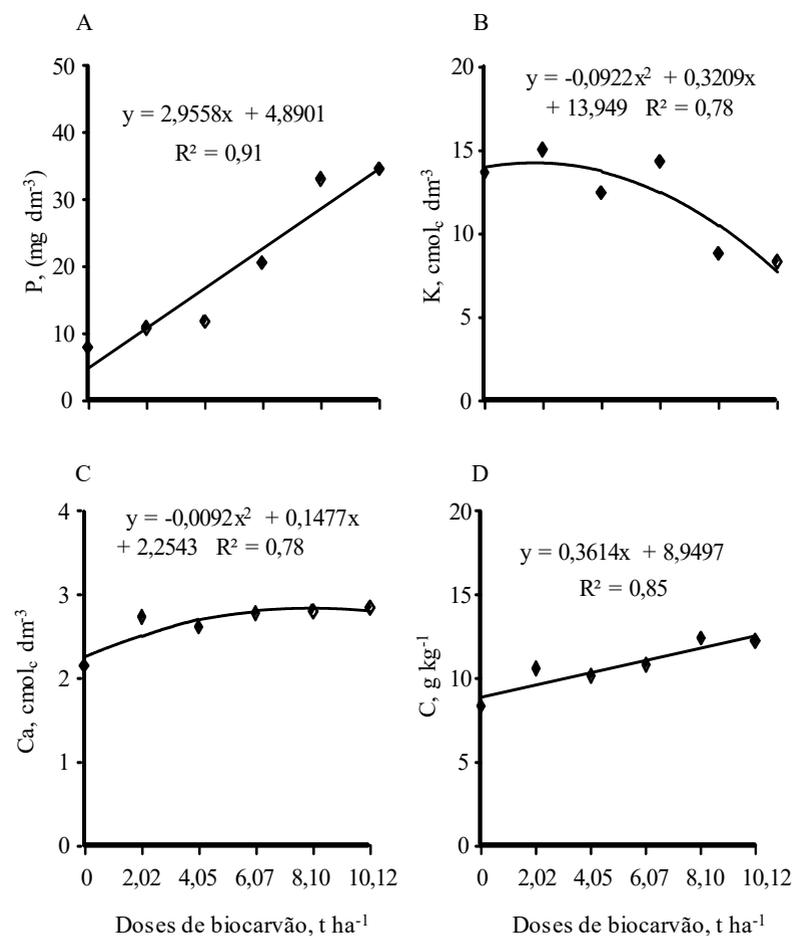
Em relação à caracterização química do solo, o fósforo, o potássio, o cálcio e o carbono orgânico foram influenciados pelo biocarvão após a colheita do milho híbrido BRS 2022. O teor de fósforo disponível no solo aumentou a uma taxa de $2,95 \text{ mg dm}^{-3}$ por tonelada de biocarvão, aplicado por hectare, sendo que a maior concentração correspondeu a $34,80 \text{ mg dm}^{-3}$ com a dose de $10,12 \text{ t ha}^{-1}$, o que representou, quando comparado à testemunha, um incremento de $611,64\%$ de P (Figura 4A). Apesar de o solo utilizado neste estudo ser um argissolo de textura areia franca, com baixo teor de fósforo disponível, após o cultivo do milho, com a aplicação de doses superiores a $2,64 \text{ t ha}^{-1}$, o solo apresentou concentrações de P maiores quando comparado ao teor observado ($12,7 \text{ mg dm}^{-3}$) antes da instalação do experimento.

Quanto ao teor de potássio, para atender aos pressupostos estatísticos da normalidade, seus dados foram transformados em $1/x$, sendo assim, o comportamento observado na Figura 4B é o inverso do que foi verificado na prática. Ou seja, considerando os dados não transformados, o menor conteúdo de K correspondeu a $0,07 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com o uso de $1,77 \text{ t ha}^{-1}$ de biocarvão. A partir dessa dose, a disponibilidade de potássio no solo aumentou para $0,13 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, aplicando-se $10,12 \text{ t ha}^{-1}$.

Apesar do aumento observado, independentemente da dose de biocarvão aplicada, após a colheita do milho, a concentração de K no solo foi inferior ao observado antes do início do experimento ($0,17 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Tal resultado evidencia que a quantidade de K

absorvido pela planta foi proporcional à quantidade de biocarvão aplicado, corroborando o que já foi discutido anteriormente.

Figura 4 - Valores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e carbono orgânico (C) após semeadura do milho BRS 2020 em função da aplicação de doses de biocarvão de cama de aviário



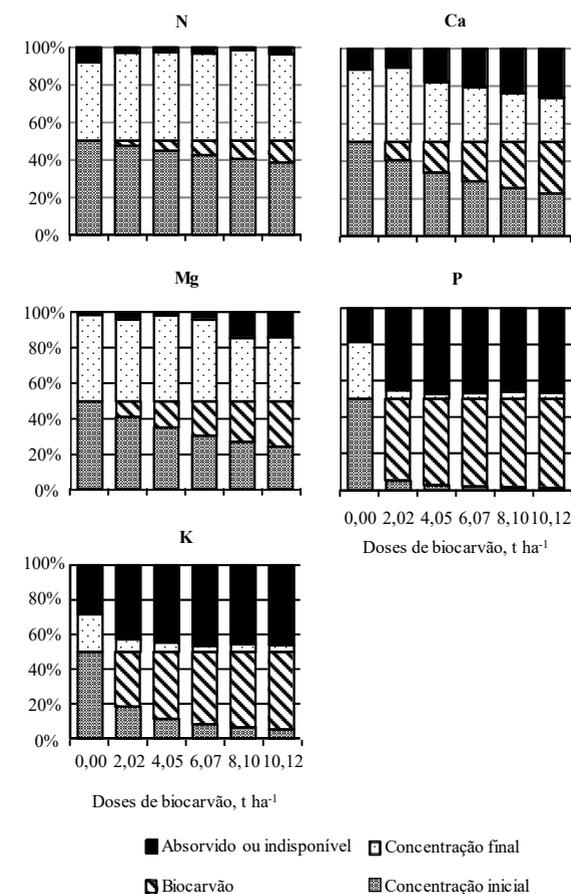
Elaborado pelos autores.

O biocarvão também influenciou o teor de cálcio no solo, cuja maior concentração correspondeu a $2,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com a dose de $8,03 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 4C). Esse aumento corrobora a hipótese discutida anteriormente, ou seja, que houve antagonismo entre K e Ca durante a absorção pela planta. Isso porque o teor de Ca no tecido foliar diminuiu com as doses de biocarvão, enquanto que o Ca no solo aumentou ao término no experimento.

Houve aumento no teor de carbono orgânico do solo a uma taxa de $0,3614 \text{ g kg}^{-1}$ por tonelada de biocarvão aplicado, por hectare. A maior média estimada, ou seja, $12,61 \text{ g kg}^{-1}$ ($10,12 \text{ t ha}^{-1}$ de biocarvão), foi 40,9% maior quando comparado ao obtido no tratamento controle (Figura 4D). Considerando a concentração inicial de C ($10,9 \text{ g kg}^{-1}$), incrementos reais deste elemento foram observados a partir da aplicação de $5,39 \text{ t ha}^{-1}$, indicando que houve mineralização da matéria orgânica nas doses mais baixas de biocarvão. Essa mineralização foi favorecida provavelmente pelo aumento da atividade microbiana do solo por causa da relação C/N do biocarvão utilizado nesta pesquisa (18,76).

As frações dos elementos nitrogênio, cálcio, magnésio, fósforo e potássio na forma absorvida ou indisponível para a planta, a concentração inicial e final no solo e o teor presente no biocarvão em função das diferentes doses aplicadas estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Fração dos elementos na forma absorvida ou indisponível para a planta, concentração final e inicial no solo e no biocarvão em função das diferentes doses de biocarvão aplicadas



Elaborado pelos autores.

Se comparado à concentração inicial, houve um leve aumento no teor de nitrogênio no solo (concentração final) após o encerramento do experimento e, com exceção do tratamento controle, a concentração de N final foi praticamente a mesma, independentemente da dose de biocarvão aplicada. Ainda com relação ao nitrogênio, verificou-se um acréscimo deste nutriente no solo, proporcional à aplicação de biocarvão, contudo, a fração absorvida pela planta não acompanhou o mesmo comportamento, não havendo muita variação entre os tratamentos que receberam biocarvão. Esse resultado evidenciou que, apesar de o biocarvão apresentar N em sua constituição, é incerta a sua disponibilidade para a planta, porque é difícil prever qual fração do N orgânico é suscetível à mineralização e à velocidade com que é mineralizado.

Apesar de o biocarvão ter aumentado a fração de Ca e Mg no solo, acreditou-se que a disponibilização destes nutrientes está relacionada com o tempo de decomposição do biocarvão. Contudo, pouco se sabe quanto à mineralização de biocarvões de cama de aviário. Assim, apesar de este insumo apresentar Ca e Mg em sua constituição, aumentando inclusive a fração absorvida ou indisponível, acreditou-se que esses nutrientes apresentaram-se preferencialmente na forma indisponível, porque seus teores diminuíram no tecido foliar do milho, mesmo havendo acréscimo de Ca no solo, ao término do experimento, em função da aplicação de biocarvão. Outro fator que também contribuiu para a menor disponibilidade de nutriente foi o efeito antagônico do potássio para com os elementos Ca e Mg.

A fração dos nutrientes fósforo e potássio, provenientes do biocarvão, aumentou em função das doses aplicadas, o que pode ser explicado pela presença de compostos inorgânicos fontes de

fósforo e potássio, tais como: fosfatos de potássio, aluminossilicato de potássio e cloreto de potássio. O mesmo comportamento foi observado para a fração absorvida ou indisponível. Porém, no caso do fósforo, assim como no tecido foliar do milho, também se verificou aumento na fração de P no solo após o experimento (concentração final), cuja concentração foi superior se comparada à inicial, com a aplicação das doses mais altas de biocarvão. Boa parte da fração de K disponibilizada pelo biocarvão foi absorvida pelo milho, de modo que, mesmo com a aplicação de biocarvão, a concentração final de K no solo foi menor que a concentração observada no início do experimento.

Enfim, a aplicação de doses crescentes de biocarvão de cama de aviário na cultura do milho híbrido BRS 2022 promoveu aumento nos teores foliares de N, P e K, refletindo-se em melhorias no estado nutricional das plantas para estes nutrientes; influenciou o desempenho agrônômico, ou seja, a altura da planta, a altura de inserção da primeira espiga, o diâmetro do colmo, a área foliar, o comprimento de internódios, a fitomassa seca de colmo, a fitomassa seca de folhas e a fitomassa seca total.

Da mesma forma, influenciou positivamente o aumento de todas as variáveis de produção analisadas, massa da espiga, massa de grãos por planta, massa de 1000 grãos, comprimento e diâmetro de espigas. Em geral, biocarvão de cama de aviário tem potencial para aumentar o rendimento do milho em um argissolo acinzentado distrófico. A dose de biocarvão utilizada e, portanto, recomendada para obtenção dos melhores resultados desta pesquisa corresponde a uma aplicação de $6,4 \text{ t ha}^{-1}$ deste insumo.

As características químicas do solo, analisadas após a colheita do milho BRS 2022, revelou que houve influência das doses de

biocarvão de cama de aviário nos teores de cálcio, carbono orgânico, potássio e fósforo.

REFERÊNCIAS

AFROUSHEH, M.; ARDALAN, M.; HOKMABADI, H. Nutrient deficiency disorders in *Pistacia vera* seedling rootstock in relation to eco-physiological, biochemical characteristics and uptake pattern of nutrients. **Scientia Horticulturae**, v. 124, n. 2, p. 141-148, 2010.

ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidases in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.

ARRIEL, N. H. C.; FIRMINO, P. T.; BELTRÃO, N. E. M.; SOARES, J. J.; ARAÚJO, A. E.; SILVA, A. C.; FERREIRA, G. B. **A cultura do gergelim**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007. 72p.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: FUNEP, 2004. 42p.

BIBAR, M. P. S. **Potencial agrícola de biocarvão proveniente de biomassas alternativas**. 2014. 101f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, SP, 2014.

BOSCO, M. R. O.; OLIVEIRA, A. B.; HERNANDEZ, F. F. F.; LACERDA, C. F. Influence of salt stress on the mineral composition of eggplant seedlings. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v. 40, p. 157-164, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Coordenação de Apoio Laboratorial, Murilo Carlos Muniz Veras (Org.). Brasília: MAPA/DAS/CGAL, 2014. 220p.

BRITO, A. R.; PEREIRA, H. S.; BRACHTVOGEL, E. L. Saturação por bases na integração lavoura-pecuária com cultivo de milho nos dois primeiros anos. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, SP, v. 15, n. 3, p. 58-68, 2019.

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L. T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 63-131.

CAMPOS, V. B.; OLIVEIRA, A.; CAVALCANTE, L. F.; PRAZERES, S. Rendimento do pimentão submetido ao nitrogênio aplicado via água de irrigação em ambiente protegido. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Aracaju, SE, v. 8, n. 2, p. 72-79, 2008.

CHAMBERS, J. **Software for data analysis: programming with R**. Springer Science & Business Media. New York: Springer, 2008. 500p.

CHEN, D.; CAO, B.; QI, L.; YIN, L.; WANG, S.; DENG, X. Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. **Annals of Botany**, v. 118, n. 2, p. 305-15, 2016.

CHEN, Y. X.; HUANG, X. D.; HAN, Z. Y.; HUANG, X.; HU, B.; SHI, D. Z.; WU, W. X. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. **Chemosphere**, v. 78, p. 1177-1181, 2010.

COELHO, A. M. **Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 96, 2007. 11p.

CORRÊA, J. C.; MIELE, M. A cama de aves e os aspectos agrônômicos, ambientais e econômicos. *In*: PALHARES, J. C. P.; KUNZ, A. (Eds.). **Manejo ambiental na avicultura**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011. p. 125-152. (Documentos, 149).

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 129-141.0

EKEBAFE, M. O.; EKEBAFE, L. O.; MALIKI, M. Utilisation of biochar and superabsorbent polymers for soil amendment. **Science Progress**, v. 96, p. 85-94, 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual e métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina, PR: Editora Planta, 2006. 403p.

FABRINI, D. F.; SILVA, M. C. P.; REZENDE, C. F. A. Development and productivity of maize submitted to the nitrogen installment in coverage. **Ipê Agronomic Journal**, Goianési, GO, v. 5, n. 1, p. 1-9, 2021.

FAGBENRO, J. A.; OSHUNSANYA, S. O.; ONAWUMI, O. A. Effect of saw dust biochar and NPK 15:15:15 inorganic fertilizer on Moringa oleifera seedlings grown in an Oxisol. **Agrosearch**, v. 13, n. 1, p. 57-68, 2013.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

GOTT, R. M.; AQUINO, L. A.; CARVALHO, A. M. X.; SANTOS, L. P. D.; NUNES, P. H. M. P.; COELHO, B. S. Diagnostic index for interpretation of foliar analysis of corn. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 18, n. 11, p. 1110-1115, 2014.

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

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MOLLER, S.; WHITE, P. Functions of Macronutrients. In: MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. Cambridge: Academic Press, 2011. p. 135-189.

JAHANGIR, A. A.; MONDAL, R. K.; NADA, K.; AFROZE, S. R.; HAKIM, M. A. Response of nitrogen and phosphorus fertilizer and plant spacing on growth and yield contributing character of sunflower. **Bangladesh Journal of Science and Industrial Research**, v. 41, n. 1-2, p. 33-40, 2006.

JIEN, S-H.; WANG, C-S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, v. 110, p. 225-233, 2013.

KARIM, A. A.; KUMAR, M.; SINGH, S. K.; PANDA, C. R.; MISHRA, B. K. Potassium enriched biochar production by thermal plasma processing of banana peduncle for soil application. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 123, p. 165-172, 2017.

KOLTON, M.; HAREL, Y. M.; PASTERNAK, Z.; GRABER, E. R.; ELAD, Y.; CYTRYN, E. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed gree-

nhouse pepper plants. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 77, n. 14, p. 4924-4930, 2011.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 403-427, 2006.

LEHMANN, J.; SILVA, J. P. D; 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, n. 2, p. 343-357, 2003.

LOPES, H. L. S.; SAMPAIO, A. S. O.; SAUSA, A. C. P.; LIMA, D. C.; SOUTO, L. S.; SILVA, A. M.; MARACAJÁ, P. B. Initial growth of radish (*Raphanus sativus* L.) culture submitted to levels and sources of organic fertilizers. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pomal, PB, v. 13, n. 1, p. 19-24, 2019.

LÓPEZ-CANO, I.; ROIG, A.; CAYUELA, M. L.; ALBURQUERQUE, J. A., SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure. **Waste Management**, v. 49, p. 553-559, 2016.

MADARI, B. E.; MAIA, C. M. B. F.; NOVOTNY, E. H. Context and importance of biochar research. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 5, p. i-ii, 2012.

MALDANER, I. C.; HELDWEIN, A. B.; LOOSE, L. H.; LUCAS, D. D. P.; GUSE, F. I.; BORTOLUZZI, M. P. Modelos de determinação não-destrutiva da área foliar em girassol. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 39, n. 5, p. 1356-1361, 2009.

MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. New York: Academic Press, 1995. 651p.

NEVES, A. L. A.; SANTOS, R. D.; PEREIRA, L. G. R.; TABOSA, J. N.; ALBUQUERQUE, I. R. R.; NEVES, A. L. A.; OLIVEIRA, G. F.; VERNEQUE, R. S. Agronomic characteristics of corn cultivars for silage production. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, PR, v. 36, n. 3, p. 1799-1806, 2015.

NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; CORREIA, K. G.; SOARES, F. A. L.; ANDRADE, L. O. Growth and flowering of sunflower under saline stress and nitrogen fertilization. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v. 41, n. 3, p. 358-365, 2010.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. (Ed.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA-SEA, 1991. p. 189-253.

PEREIRA, J. R. C. **Potencial do biocarvão para a produção de milho e melhoria da qualidade do solo**. 2019. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental para o Semiárido) - Universidade de Pernambuco, Petrolina, PE, 2019.

PERIN, A.; CRUVINEL, D. J.; SILVA, J. W. Desempenho do gergelim em função da adubação NPK e do nível de fertilidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR, v. 32, n. 1, p. 93-98, 2010.

RICHARDS, L. A. **Diagnoses and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 166p.

SANTOS, J. F.; GRANJEIRO, J. I. T. Doses de cama de galinha em relação aos componentes de produção de girassol. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, PB, v. 7, n. 2, p. 15-20, 2013.

SILVA, L. C.; SANTOS, J. W.; VIEIRA, D. J.; BELTRÃO, N. E. M.; ALVES, I.; JERÔNIMO, J. F. Um método simples para se estimar área foliar de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.). **Revista Brasileira de Oleaginosa e Fibrosas**, Campina Grande, PB, v. 6, n. 1, p. 491-496, 2002.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant Soil**, v. 291, n. 1-2, p. 275-290, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573p.

TIVELLI, S. W.; MENDES, F.; GOTO, R. Estimativa da área foliar do pimentão (*Capsicum annum* L.) cv. Elisa conduzido em ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 38, 1997, Manaus. **Anais** [...]. Suplementos..., Brasília: SOB, 1997.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Soils and soils fertility**. New York, NY, USA: Blackwell, 2005. 498p.

UTOMO, W. H.; GURITNO, B.; SOEHONO, L. A. The effect of biochar on the growth and N fertilizer requirement of maize (*Zea mays* L.) in green house experiment. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 5, p. 255-262, 2012.

ZÁRATE, N. A. H.; SANGALLI, C. M. S.; VIEIRA, M. C.; GRACIANO, J. D.; MUNARIN, E. E. O.; PAULA, M. F. S. Cobertura do solo com cama de frango, com e sem amontoa, na produção de beterraba. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 34, p. 1598-1603, 2010.

Formato *15x21 cm*
Tipologia *Poppins/Cambria/Cambria Math*
Nº de Pág. *396*

Editora da Universidade Federal de Campina Grande- EDUFCCG

