

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

CURSO DE AGRONOMIA

VICTOR GONÇALVES JUNQUEIRA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DE BIOCARVÕES TRATADOS COM AI OU
Mg**

UBERLÂNDIA - MG

2023

VICTOR GONÇALVES JUNQUEIRA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DE BIOCARVÕES TRATADOS COM AI OU
Mg**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Agronomia da Universidade
Federal de Uberlândia para obtenção do grau
de Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Wedisson Oliveira Santos

UBERLÂNDIA – MG

2023

VICTOR GONÇALVES JUNQUEIRA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DE BIOCARVÕES TRATADOS COM AI OU
Mg**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Agronomia da Universidade
Federal de Uberlândia para obtenção do grau
de Engenheiro Agrônomo

Aprovado pela Banca Examinadora em 26 de janeiro de 2023.

Prof. Dr. Wedisson Oliveira Santos
Orientador

Prof. Dra. Araína Hulman Batista
Membro da Banca

Me. Rosane Angélica Reis dos Anjos
Membro da Banca

UBERLÂNDIA – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por todo apoio e suporte durante todo o período de estudos, fornecer a oportunidade de focar e concentrar os esforços na minha formação, principalmente nos momentos difíceis.

Aos amigos e colegas de faculdade por caminharem junto comigo e compartilharem das mesmas dificuldades.

À Doutoranda Rosane dos Anjos que me orientou e ensinou bastante durante todo meu final de graduação, sempre com grande paciência e disponibilidade.

Ao professor Dr. Wedisson Oliveira Santos por me ajudar a finalizar o trabalho, com grande ajuda nas análises estatísticas, na interpretação dos resultados e na confecção do mesmo.

Aos técnicos, Igor e Jéssica que me auxiliaram em diversas análises, pelo conhecimento e aprendizado.

Ao grupo PET – Agronomia, que sempre me incentivou a ir além e me apoiou nos momentos críticos.

Por fim, agradeço a todos que tiveram participação direta ou indireta na realização deste trabalho.

Muito obrigado!

RESUMO

Devido à baixa eficiência da adubação fosfatada, especialmente em condições tropicais úmidas, aliada, as altas taxas de fixação de P em solos muito intemperizados e o elevado potencial poluidor de ambientes aquáticos pelo P, torna-se desejável o desenvolvimento de tecnologias capazes de recuperar este elemento de ambientes eutrofizados ou de águas residuais e reutilizá-lo na agricultura. Alguns estudos têm apontado elevado potencial de recuperação de P com uso de biocarvões submetidos a tratamentos com dopagem metálica. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência agronômica de biocarvões modificados com $MgCl_2$ e $AlCl_3$ como fertilizantes fosfatados. Foi conduzido um experimento em casa de vegetação utilizando os biocarvões enriquecidos com P como fertilizantes fosfatados em cultivo sucessivo milho (26 d) e soja (23 d), nas doses de 50 e 200 mg/dm³ P para cada fertilizante e comparando-os com a fonte comercial superfosfato triplo (ST), visando avaliar a eficiência agronômica desses materiais. Para avaliar a disponibilidade e difusividade foi feito um teste colorimétrico a fim de capturar o raio difusivo de cada material. O BMg foi o tratamento que apresentou maior eficiência agronômica no cultivo sucessivo milho-soja, corroborando com o resultado do teste colorimétrico, em que foi possível visualizar o raio de difusão semelhante ao ST e aos elevados teores de P solúveis.

Palavras-Chaves: Pirólise, ensaio agronômico, sorção, metais.

ABSTRACT

Due to the low efficiency of phosphate fertilization, especially in tropical conditions, allied to the high rates of P fixation in very weathered soils and the high polluting potential of aquatic environments by P, it is desirable to develop technologies capable of recovering this element from eutrophic environments or wastewater and reuse it in agriculture. Some studies have shown a high potential for P recovery with the use of biochar submitted for metal doping treatments. The objective of this work was to evaluate the agronomic efficiency of biochars modified with MgCl_2 and AlCl_3 as phosphate fertilizers. An experiment was carried out in a greenhouse using biochars enriched with P as phosphate fertilizers in successive cultivation of corn (26 d) and soybean (23 d), at doses of 50 and 200 mg/dm^{-3} P for each fertilizer and comparing them those with the commercial source triple superphosphate (ST), seeking to evaluate the agronomic efficiency of these materials. To evaluate the availability and diffusivity, a colorimetric test was performed in order to capture the diffusive radius of each material. The BMg was the treatment that presented the greatest agronomic efficiency in the successive cultivation of corn-soybean, corroborating the result of the colorimetric test, in which it was possible to visualize the transmission radius similar to the ST, and the high values of extractable P.

Keywords: Pyrolysis, agronomic assay, sorption, metals.

SUMÁRIO

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS	11
2.1. Síntese dos biocarvões	11
2.2. Caracterização de teores solúveis de P das fontes fosfatadas	12
2.2.1. Extrações de P em água (H ₂ O), citrato neutro de amônio mais água (CNA+H ₂ O) e ácido cítrico 2% (AC)	12
2.2.2. Fósforo total	13
2.3. Ensaio de difusão	13
2.4. Ensaio agronômico	14
2.5. Análise estatística	16
3. RESULTADOS	17
3.1. Teores solúveis de P das fontes fosfatadas	17
3.2. Ensaio de difusão	18
3.3. Ensaio agronômico	19
4. DISCUSSÃO	21
5. CONCLUSÃO	23
6. REFERÊNCIAS.....	24

1. INTRODUÇÃO

A utilização de fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade é uma realidade nos sistemas produtivos, com o intuito de suprir as necessidades nutricionais das plantas durante todo o processo de produção. Porém a dinâmica do fósforo (P) no solo é complexa, com interações físicas e químicas entre P e a parte coloidal, as quais influenciam sua solubilidade e disponibilidade (DALLA COSTA e LOVATO, 2004).

Em solos tropicais e subtropicais, de acentuado grau de intemperismo, caracterizados pela alta capacidade de fixação de P, reflete em formas pouco disponíveis às plantas, dificultando o desenvolvimento dos cultivos. Estima-se que 75% do P aplicado seja adsorvido quimicamente nas partículas de solo, resultando em baixa eficiência dos fertilizantes, em valores de aproveitamento de P pelas plantas, em geral inferiores a 20% (ARAÚJO et al., 2003; RAIJ, 2004; RAMOS et al., 2009). Diante dessa limitação torna-se essencial o desenvolvimento de técnicas, aperfeiçoamento das tecnologias de fertilizantes e o desenvolvimento de novas fontes, viabilizando o incremento no teor biodisponível de P (NOVAIS et al., 2018).

Em paralelo a dificuldade de aumento dos teores de P disponível no solo, há locais que tal elemento se encontra em elevadas concentrações, de forma indesejada, causando problemas sociais, ambientais e econômicos. A destinação irregular de resíduos ricos em P produzidos pelos grandes centros urbanos, processos industriais e agrícolas têm contribuído para elevação dos teores de P em águas superficiais e águas residuais, promovendo a eutrofização destes ambientes.

O processo de eutrofização ocorre devido ao acúmulo de nutrientes nas águas superficiais, principalmente de nitrogênio (N) e P, intensificando o crescimento de algas e plantas. As algas em grande população competem ativamente pela luz e oxigênio do ambiente aquático, modificando a flora e fauna, reduzindo a biodiversidade desses microambientes (BARRETO et al., 2013). Esse processo ocorre de maneira lenta, através do descarte subsequente de resíduos urbanos e agrícolas, por exemplo, esgoto não tratado dos centros urbanos, resíduos industriais e uso de fertilizantes (DASH et al., 2020).

O saneamento básico no Brasil ainda está muito distante do ideal, principalmente quanto a coleta e tratamento do esgoto sanitário. Apesar de 99,6% dos municípios brasileiros apresentarem abastecimento de água, a taxa de coleta e tratamento de esgoto é relativamente baixa, cerca de 49,2% (IBGE, 2022). Com isso, a fatia não tratada ou parcialmente tratada recebe destinações irregulares, como principal destino, curso de águas e águas superficiais, contaminando-as e contribuindo para o processo de eutrofização, visto que tais resíduos são

ricos em matéria orgânica e compostos onde o P e o N são presentes.

Em virtude da grande quantidade de fertilizantes fosfatados utilizados nos sistemas produtivos, visando aumentar a disponibilidade de P, grande parte do que é aplicado não é utilizado pelas plantas. Dessa forma, em solos de elevada CTC, pouco intemperizados, apresentam dificuldade em adsorver P em seus colóides, facilitando formas de P solúveis e de fácil lixiviação, suscetíveis a erosão laminar, que consiste na desagregação e o deslocamento do solo de forma superficial, sendo depositado em ambientes aquáticos, além da lixiviação via perfil do solo (PINESE et al., 2008). Dessa forma, auxiliando no processo de eutrofização de recursos hídricos (OLIVEIRA et al., 2010).

Além desse viés, locais em que se utiliza manejo da água via inundação, como exemplo a cultura do arroz inundado, o P tende a estar em formas mais disponíveis no solo, visto que essa técnica busca aumentar a disponibilidade de nutrientes na solução do solo, a partir de reações de oxirredução, fornecendo um ambiente de baixa presença de oxigênio. E em função do manejo adotado, pode-se induzir à perda de fertilidade no sistema e o carreamento de P para áreas indesejadas através de processos de lixiviação, escoamento superficial e situações de extravasamento da água dos quadros em condições de precipitações pluviais elevadas (MARCHEZAN et al., 2007).

Como consequência disso, tecnologias e pesquisas vem sendo desenvolvidas para melhorar as destinações desses resíduos, de forma a colaborar com os três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental (ELKINGTON et al., 2020). Possibilitando a transformação desses compostos em energia, combustíveis, produtos químicos e fertilizantes. Com isso surge a oportunidade de utilização dos biocarvões, que em seu processo de produção utiliza-se como matéria prima resíduos, sejam eles agrícolas, urbanos ou industriais, reduzindo assim seu descarte e contaminação, como também a possibilidade de utilização dos produtos formados na agricultura.

O biocarvão é um material sólido produzido pela carbonização da biomassa, que geralmente são originados de resíduos de diferentes origens, tais como agrícolas, animais, processamento de alimentos e lodo de esgoto, decompostos a partir do tratamento térmico em ambiente de baixa disponibilidade de oxigênio (MOHAN et al., 2014, LEE et al., 2019). No processo de transformação de biomassa em biocarvão, algumas propriedades são apuradas e atribuídas à este material, como a grande área superficial específica (ASE), capacidade tamponante de pH, elevada capacidade de troca catiônica e capacidade sortiva (HUANG et al., 2020). Essas propriedades apresentam efeito positivo sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (SONG et al., 2020).

Ademais da destinação de resíduos sólidos, os biocarvões estão sendo amplamente estudados para remoção de elementos contaminantes, como o P em ambientes hídricos. Porém, os biocarvões provenientes da queima de resíduos, sem pré-tratamento, apresentam dificuldade de adsorção de P. E pensando em reaproveitamento na agricultura, tal característica impacta seu processo de produção, como fertilizante fosfatado, com isso surge as modificações químicas visando melhorar a capacidade sortiva de P por esses materiais (YAO et al., 2011; LIU et al., 2016).

A baixa sorção de P pelos biocarvões está relacionada às suas propriedades físico-químicas obtidas a partir do processo de pirólise, como a predominância de grupamentos carboxílicos e fenólicos, os quais conferem a este material caráter aniônico, com baixo potencial de adsorver ânions, como por exemplo o fosfato (PO_4^{3-}) (NOVAIS et al., 2018). Dessa forma, há necessidade de utilização de processos que melhoram a capacidade adsortiva desse material, como a dopagem, modificação eletroquímica, precipitação química de cátions e ativação química pós-pirolise.

Com destaque para a dopagem com metais, essa técnica de modificação química consiste na impregnação catiônica da matéria prima antes do processo pirolítico. Utiliza-se em grande maioria a adição de cátions metálicos devido a afinidade dos íons fosfato com os metais. Tal procedimento permite incremento de grupos funcionais, aumento da ASE e altera o perfil de cargas de superfície do biocarvão, de forma a expressar caráter catiônico, possibilitando a adsorção de ânions como também o desenvolvimento de outros processos sortivos na estrutura dos biocarvões (WANG et al., 2022). Existe uma diversidade de cátions utilizados pela literatura para elevação das características sortivas de biocarvões, dentre eles destacam-se Al, Fe, Ca e Mg, sendo os principais, os cátions atuam como catalizadores, influenciando tanto no rendimento, como na área superficial, na porosidade e perfil de cargas, características essenciais para melhoria da capacidade sortiva de P (ZHANG et al., 2012; JUNG et al., 2015; LIU et al., 2016; YIN et al 2018).

Logo, com o aperfeiçoamento e modificações nos biocarvões é possível utilizá-los na remoção de P de locais contaminados, tornando possível a captura deste elemento para posterior aplicação na agricultura como fertilizantes fosfatados. Essa medida contribui para a elevação dos teores disponíveis para a planta, como também melhoria dos atributos químicos e físicos do solo, devido às suas características e recalcitrância, perdurando durante longo tempo na matriz do solo (PINTO et al., 2019).

Face ao exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência agrônômica de biocarvões modificados com MgCl_2 e AlCl_3 como fertilizantes fosfatados e caracterização dos teores

solúveis de P.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de tabaco (*Nicotiana tabacum*) foi o material utilizado para a produção dos biocarvões, que se trata de um subproduto da produção de cigarro, gerado em elevada quantidade por uma indústria localizada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. Antes da síntese dos biocarvões, o resíduo de tabaco (pó de fumo) foi moído em moinho tipo Willey e peneirado (20-60 mesh) e, em seguida, seco em estufa de circulação forçada de ar ($60 \pm 5^\circ\text{C}$) até atingir estabilidade de massa.

2.1. Síntese dos biocarvões

Amostras de pó de fumo foram submetidas ao pré-tratamento em soluções sub-saturadas com os cátions Al e Mg, cuja concentração dos sais foi igual à 50 g L^{-1} . Para isso, foram preparadas amostras de 50 g de pó de fumo que ficaram imersas em béqueres contendo 500 mL das seguintes soluções: $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($445,63 \text{ g L}^{-1}$) e $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($416,67 \text{ g L}^{-1}$), com proporção m/v de 1:10, respectivamente. Para o tratamento controle, o resíduo foi imerso em água deionizada. As soluções contendo os materiais ficaram em repouso durante 2 h e, posteriormente, as amostras foram filtradas e secas em estufa ($70 \pm 5^\circ\text{C}$) até atingirem estabilidade de massa e, em seguida, moídas em almofariz e peneiradas (20-60 mesh) novamente.

Após o pré-tratamento, os materiais foram colocados em cadinhos (3 cadinhos/tratamento) no interior do reator de pirólise e submetidos a pirólise lenta, com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C min}^{-1}$, até atingir a temperatura ótima de cada material, permanecendo por 4 h. As temperaturas ótimas foram determinadas em estudos preliminares, nos quais investigou-se o efeito da temperatura (entre 350 e 550°C) na sorção máxima de P pelos biocarvões modificados com diferentes cátions. Quanto ao efeito da temperatura, concluiu-se que a sorção máxima de P para o controle foi à 468°C , 442°C para o biocarvão modificado com Al e 460°C para o biocarvão modificado com Mg.

Os biocarvões produzidos foram então lavados com água deionizada a fim de se retirar o excesso de sais, com proporção m/v de 1:600. Posteriormente, os biocarvões foram secos em estufa, moídos e passados em peneira (70 mesh). Para efeito de processamentos estatísticos, a distribuição dos tratamentos foi considerada como inteiramente casualizado, perfazendo um esquema fatorial 5×3 , que consistiu em cinco temperaturas (350 , 400 , 450 , 500 e 550°C), dois

cátions dopadores (Mg e Al) e um tratamento controle (sem adição de cátions). Os materiais selecionados foram nomeados como biocarvão puro (B), biocarvão modificado com Al (BAI) e biocarvão modificado com Mg (BMg). A síntese dos biocarvões foi baseada no trabalho de (PINTO et al., 2019), porém com algumas alterações.

A partir da síntese, os biocarvões foram enriquecidos com P de forma a garantir a máxima sorção. Para os mesmos, foram preparados frascos Erlenmeyers (250 mL) contendo 3 g de biocarvão e 150 mL de solução de P em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ conforme tratamento, os quais foram mantidos sob agitação (160 rpm) em temperatura ambiente por 24 h. Em seguida, as amostras foram filtradas e lavadas com água deionizada na proporção m/v de 1:50, com intuito de retirar o excesso de P não sorvido. Por fim, os biocarvões enriquecidos foram secos em estufa, moídos e novamente passados em peneira (70 mesh). Os materiais foram identificados como biocarvão puro enriquecido com P (B-P), biocarvão modificado com Al enriquecido com P (BAI-P) e biocarvão modificado com Mg enriquecido com P (BMg-P).

2.2.Caracterização de teores solúveis de P das fontes fosfatadas

A determinação dos teores solúveis de P das fontes fosfatadas, os biocarvões B-Al, B-Mg e o fertilizante referência (superfosfato triplo) foram secos em estufa de circulação forçada de ar a 65°C , por 24 h. Após a secagem, as amostras foram moídas e avaliadas quanto aos teores de P_2O_5 total e as frações solúveis em água, ácido cítrico a 2 %, e citrato neutro de amônio + água, conforme Instrução Normativa SDA N° 28 de 27 de julho de 2007 para Análise de Fertilizantes do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). A quantificação do P extraído de cada método foi realizada em espectrofotômetro de absorção molecular (400 nm).

2.2.1. Extrações de P em água (H_2O), citrato neutro de amônio mais água (CNA+ H_2O) e ácido cítrico 2% (AC)

Para extração de P em H_2O preparou-se um conjunto de balão volumétrico (200 mL), funil e papel filtro (filtragem média) contendo 0,2 g de amostra. As amostras foram lavadas com pequenas porções sucessivas de água deionizada até completar o volume do balão. Na extração em CNA+ H_2O , utilizaram-se frascos béqueres (100 mL) contendo 0,5 g de amostra e 25 mL de solução de CNA, os quais foram cobertos com vidro relógio e levados para chapa aquecedora, para fervura suave por 10 min. Por fim, os extratos foram transferidos para balão volumétrico (200 mL), completados com água deionizada e filtrados para determinação da

concentração de P. A extração em AC consistiu no preparo de frascos Erlenmeyers (125 mL) contendo 0,25g de amostra e 25 mL de solução de AC 2%. Durante 30 min as amostras foram agitadas (35 rpm) e, em seguida, filtradas (filtragem média) para leitura. As extrações foram baseadas nas metodologias propostas por Brasil (2017) para fertilizantes fosfatados.

2.2.2. Fósforo total

As fontes fosfatadas foram submetidas à extração ácida para a determinação do P total, em triplicata. A extração de P dos biocarvões foi realizada por digestão úmida quente, utilizando tubos de digestão contendo 0,2 g de amostra e 5 mL HNO_3 + 2 mL HClO_4 (ENDERS e LEHMANN, 2012). Após digestão (clareamento dos extratos), cerca de 4 h a 210°C em bloco digestor, os extratos foram transferidos para balões volumétricos (500 mL) e completados com água deionizada. No caso do ST, a extração de P foi realizada por digestão úmida fria, utilizando tubos falcon contendo 0,2 g de amostra e 30 mL HNO_3 $2,5 \text{ mol L}^{-1}$, mantendo-os sob agitação (90 rpm) por 1 h (BALLOTIN et al., 2021). Em seguida, os extratos foram também transferidos para balões (500 mL) e completados com água deionizada. Com os dados das leituras em espectrofotômetro foi calculado o teor total de P de cada fonte.

2.3. Ensaio de difusão

A difusibilidade de P no solo a partir da aplicação das fontes fosfatadas pôde ser avaliada por um teste colorimétrico, realizado em placas de Petri. Para isso, amostras de solo argiloso, classificado como Latossolo, foram coletadas sob vegetação nativa, na camada de 0-20 cm, no município de Uberlândia, Minas Gerais (843 m altitude, $18^\circ 54' 41'' \text{ S}$ e $48^\circ 15' 44'' \text{ O}$). O solo foi seco ao ar e passado em peneira de 4 mm para ensaio agronômico e em 2 mm para análise química. Os resultados da análise química apresentaram disponibilidade muito baixa de P ($0,0 \text{ mg dm}^{-1}$, extrator Mehlich-1), pH em água igual à 5,6, C orgânico de 2 g kg^{-1} , teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} iguais à 0,2 e $0,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$, respectivamente, CTC de $1,42 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e saturação por bases de 16%. Assim, baseado nesses resultados, o solo foi colocado em sacos plásticos e corrigido com uma mistura 4/1 $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$. Os cálculos foram feitos de acordo com o método de saturação por bases, objetivando elevar a saturação por bases para 70 % (ALVAREZ et al., 1999). Posteriormente, o solo foi umedecido à 80 % de sua capacidade de campo e incubado por 30 d e, após esse período, foi novamente seco ao ar e homogeneizado.

O experimento de difusão de P foi realizado com quatro tratamentos (controle, BA1-P, BMg-P e ST), em triplicata. Foram preparadas placas de Petri ($\Phi 9 \text{ cm}$) preenchidas com o solo

corrigido e passado em peneira de 0,84 mm, umedecido conforme sua capacidade de campo com auxílio de borrifador. Após a homogeneização da umidade, foi feito um buraco no centro de cada placa para a deposição do fertilizante. A profundidade do buraco foi de 6 mm para todas as fontes, porém variou-se o diâmetro, já que a quantidade das amostras foi variável devido a diferença de concentração de P, mantendo-se a mesma de P aplicado (12,35 mg de P). Portanto, o diâmetro do buraco foi de 20 mm para o BAl, 14 mm para o BMg e 7 mm para o ST. Cuidadosamente, os buracos foram fechados após a aplicação dos fertilizantes e as placas foram incubadas em temperatura ambiente, mantendo a umidade inicial ao longo do experimento. A difusão de P foi avaliada no 1º, 5º, 10º e 20º dia após a aplicação das fontes, conforme o método de Degryse e Mclaughlin (2014).

A captura do P foi realizada por meio de papel filtro impregnado com óxido de Fe, colocado minuciosamente na superfície do solo por 30 min. Para o desenvolvimento de cor utilizou-se o verde de malaquita, o qual indica a presença de P com formação de halo esverdeado, representando a zona de difusão do elemento. Os papéis foram secos, escaneados e analisados com o auxílio do software IMAGE-J para determinar a área de difusibilidade.

2.4. Ensaio agronômico

Os biocarvões de elevada capacidade sortiva de P foram avaliados quanto a capacidade de fornecimento de P às plantas, em experimento com cultivo sucessivo milho (26 d) - soja (23 d), conduzido em vasos sobre bancada em casa de vegetação. O experimento foi realizado em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, sendo três fontes de P (BAl-P, BMg-P e ST), duas doses do nutriente (50 e 200 mg dm⁻³ P), mais um tratamento controle (sem adição de P). A parcela experimental correspondeu à um vaso plástico (1 dm⁻³).

Os tratamentos foram aplicados no solo corrigido, misturando-os em todo volume de solo correspondente ao tamanho do vaso. Posteriormente, o solo adubado foi transferido para sacos plásticos e colocados em vasos (1 dm⁻¹) devidamente identificados e, no mesmo dia, realizou-se a semeadura de sete sementes de milho/vaso (híbrido 20A38 VIP3). As plantas menos uniformes foram eliminadas aos 5 dias após a emergência (DAE), mantendo-se quatro exemplares por vaso. Com o desbaste, iniciou-se as fertilizações com os demais nutrientes, através de solução nutritiva aplicada semanalmente, conforme as recomendações de Novais et al. (1991). Aos 26 dias após emergência (DAE), foi colhida a parte aérea do milho e, também, amostras de solo das unidades experimentais para análise química. Em seguida, nos mesmos vasos com o solo revolvido, porém sem aplicação das fontes fosfatadas, foi feito o plantio da

soja (FOCO IPRO) (sete sementes/vaso) já inoculada. Assim como no milho, realizou-se desbaste (7 DAE), deixando-se 3 plantas/vaso, e fertilizações semanais. Por fim, aos 23 DAE coletou-se a parte aérea da soja e amostras de solo das unidades experimentais. Em ambos os cultivos, a irrigação foi realizada diariamente, mantendo a umidade próxima à capacidade de campo do solo.

Os materiais vegetais coletados foram lavados com água deionizada e secos em estufa com circulação forçada de ar (65°C), até estabilidade de massa e, então, determinada a massa de matéria seca (mMS). Em seguida, foram triturados em moinho tipo Willey e passados em peneira com malha inferior a 0,149 mm (100 mesh). Para a extração de P, amostras de 0,5 g de material moído foram colocadas em tubos de digestão com uma mistura 3/1 HNO₃/HClO₄ (MILLER e KALRA, 1998). Em bloco digestor, as amostras foram digeridas à 160°C até clarearem (~3 h). Com os extratos foram preparadas soluções para leitura da concentração de P em espectrofotômetro de absorção molecular (725 nm). A partir da determinação de P foi possível calcular o teor de P, conteúdo de P (Equação 1) e taxa de recuperação de P (TRP) (Equação 2) (BARRETO et al., 2018).

$$\text{Conteúdo de P (mg vaso}^{-1}\text{)} = \text{Teor de P (mg g}^{-1}\text{)} \times \text{mMS (g vaso}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

$$\text{TRP} = \frac{(P - P_0) \times 100}{P_A} \quad (2)$$

Onde, TRP é a taxa de recuperação de P (%), P é a quantidade de P exportado com a aplicação de fertilizante (mg dm⁻³), P₀ é a quantidade de P exportado sem aplicação de fertilizante (mg dm⁻³), e P_A é o total de P aplicado via fonte de fósforo (mg dm⁻³).

Quanto a análise do teor de P disponível das amostras de solo, utilizou-se o método Mehlich-1 (0,05 mol L⁻¹ de HCl + 0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄). Primeiramente, o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2 mm. Em Erlenmeyers, amostras de 5 cm³ foram colocadas em contato com o extrator Mehlich, na proporção solo: solução de 1:10, agitando-os (200 rpm) por 5 min, permanecendo em repouso por 16 h para decantação do solo. A partir dos extratos foram coletadas alíquotas para o preparo das soluções de leitura realizada em espectrofotômetro de absorção molecular (725 nm), determinando-se então o teor de P disponível.

2.5. Análise estatística

Os dados do ensaio agrônômico foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias. Para as variáveis que não foram atendidas as pressuposições, os dados originais foram transformados utilizando-se o modelo Box-Cox. Atendidas as pressuposições, aplicou a análise de variância (ANOVA) e a comparação de médias utilizando-se o teste Scott-Knott. Para todos os testes foi considerado nível de significância de 0,05. Foram adotados os softwares R (R CORE TEAM, 2019) para as análises estatísticas e Sigma Plot para a construção dos gráficos de regressão.

3. RESULTADOS

3.1. Teores solúveis de P das fontes fosfatadas

Nas extrações individuais o teor total de P no BMg-P foi maior que no BAl-P, sendo respectivamente de 8% e 1,9%, a menor solubilidade do fertilizante BMg-P foi em água (15,7%), enquanto nos extratores CNA+H₂O e AC apresentou alta solubilidade, 99,5 e 98,3% nesta. Quanto ao BAl-P além da baixa solubilidade em água e apresentou igualmente os menores valores em todos os demais extratores, de 53% e 3%, para CNA+H₂O e AC. O Super-Triplo (ST) assim como esperado de um fertilizante de alta solubilidade, apresentou valores elevados em todos os extratores, em H₂O de 82%, em CNA+H₂O de 95% e 85% para o AC.

Quanto a extração sequencial nota-se a grande quantidade de P insolúvel no BAl-P de quase metade do teor total (47%) e a maior quantidade de P foi solubilizada foi em CNA+H₂O (50%) e baixa solubilidade em H₂O (0, 1%) e em AC (2%). O BMg-P apresentou baixa solubilidade em água de 11% corroborando com as extrações individuais e nota-se que a maior extração de P foi em CNA+H₂O (98%) para esse fertilizante, além de apresentar P insolúvel nulo. O ST apresentou sua maior solubilidade em H₂O (70%) assim como é esperado de um fertilizante comercial.

Tabela 1. Teores totais e solúveis de P em água (P_{H2O}), citrato neutro de amônio (P_{NAC+H2O}) e ácido cítrico 2% (P_{CA}) das fontes fosfatadas. Fonte: ANJOS (2023).

Fonte ^a	Teores de P				P Insolúvel %
	P Total	P _{H2O}	P _{NAC+H2O}	P _{CA}	
	% m m ⁻¹		% total ^c		
BAl-P	1.86±0.29	0.47±0.11	53.10±1.15	3.01±0.14	
BMg-P	8.00±0.52 ^b	15.73±0.87	99.47±0.85	98.28±0.92	
ST	20.47±0.32	82.23±2.94	94.82±0.73	85.08±2.84	
	% total	P _{H2O}	P _{NAC+H2O}	P _{CA}	
			% total ^d		
BAl-P	100	0.15±0.04	50.40±0.42	2.17±0.12	47.28
BMg-P	100	11.26±0.51	87.52±1.24	1.21±0.08	0
ST	100	69.68±10.9	23.89±7.66	0.50±0.19	5.93

a Fontes fosfatadas: biocarvão tratado com MgCl₂ e enriquecido com P (BMg-P); biocarvão tratado com AlCl₃ e enriquecido com P (BAl-P); superfosfato triplo (ST); b Desvio Padrão; c Teor de P insolúvel obtido pela diferença entre o P-total e as extrações sequenciais em H₂O, CNA+H₂O e AC a partir de uma única amostra para cada fonte.

3.2. Ensaio de difusão

A partir do teste colorimétrico de difusão, foi possível medir o raio difusivo de P dos diferentes fertilizantes (Figura 2). Detecta-se uma evolução da difusão ao longo do tempo para os tratamentos com os fertilizantes Superfosfato Triplo (ST) e o biocarvão modificado com Mg BMg-P. Quanto ao BAl-P, nota-se semelhança com o tratamento controle, não expressando o raio difusivo.

A análise de forma individual evidencia para o ST um crescimento em todo o período observado, inicialmente no 1º d a taxa é relativamente baixa 1 % de incremento comparado a área de deposição do grânulo, no 10º d nota-se 294 % de incremento em relação ao 1º d, ao 20º d incremento superior a 100 % comparado ao 10º d. Partindo do BMg-P observa-se incremento de 150 % no raio difusivo do BMg-P, ao 10º d, em relação ao 1º dia (26 %), porém ao final do experimento 20º d ocorreu redução da taxa de incremento (18 %).

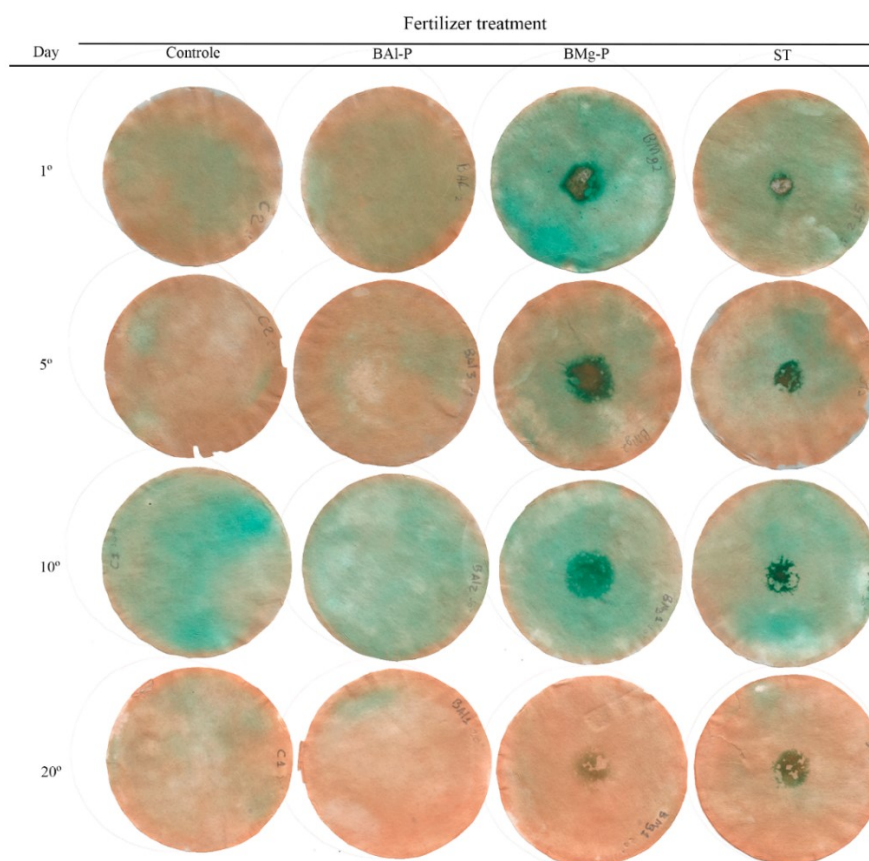


Figura 2. Zona de difusão de P visualizada aos 1, 5, 10 e 20 dias após a aplicação do fertilizante no solo. Fontes fosfatadas: biocarvão modificado com AlCl₃ e enriquecido com P (BAl-P); biocarvão modificado com MgCl₂ e enriquecido com P (BMg-P); superfosfato triplo (ST) a uma taxa de 12 mg de P/ tratamento. Fonte: ANJOS (2023).

3.3. Ensaio agronômico

De acordo com a tabela da Figura 3, o fertilizante de referência (ST) e o biocarvão dopado com Mg (BMg-P) apresentaram os melhores resultados em eficiência agronômica, demonstrado pelo maior acúmulo de massa de matéria seca (mMS) e maior absorção de P nos dois cultivos, nas doses de 50 e 200 mg dm⁻³. Com destaque para o o BMg-P na dose 50 mg dm⁻³, para as variáveis de rendimento de biomassa e na absorção de P, apresentou desempenho superior aos demais tratamentos de menor dose e superou o BAl-P também maior dose. O tratamento BAl-P e o controle apresentaram produção de mMS e absorção de P semelhantes, com os menores desempenhos.

Para taxa de recuperação de P (TRP) nota-se valores muito baixos, característicos da capacidade sortiva do solo em questão e intensificação dessa baixa, com a aplicação de BAl-P. As adubações com BMg-P e ST nas maiores doses apresentaram TRP, sendo o ST, na dose 200 mg dm⁻¹, de 0,54 % para o milho e 0,26 % para a soja. Para o BMg-P, na maior dose, TRP de 0,66 e 0,2 % nos cultivos de milho e soja, respectivamente. Na dose de 50 mg dm⁻¹ identifica-se um melhor aproveitamento do P aplicado pelo BMg-P, quando comparado à fonte de referência ST com taxa de recuperação superior tanto na soja quanto no milho mostrando estatisticamente semelhante ao BMg-P e ao ST na maior dose. Em relação ao teor de P, nota-se que não houve diferenças entre os tratamentos nas duas doses, exceto para o BMg-P, na maior dose, observou-se maior teor de P

Para a última variável, a disponibilidade de P no solo após o cultivo, a mesma foi maior nas maiores doses, sem diferir entre os tratamentos quando as doses foram iguais, apesar de alguns tratamentos apresentarem menor desempenho quanto a produção de matéria seca e absorção de P. No controle, como esperado, o teor disponível de P foi menor. Ao longo dos dois cultivos sucessivos nota-se a redução dos teores disponíveis de P no solo, nas doses maiores reduzindo cerca de 1/3 do teor disponível.

Tabela 3. Valores médios de massa de matéria seca da parte aérea (mMS), teor e conteúdo de P, taxa de recuperação e disponibilidade de P ao final do cultivo de cada cultura, em resposta à adubação com fontes fosfatadas aplicadas em duas doses (50 e 200 mg dm⁻³) e ausência de P (controle). Fonte: ANJOS (2023).

Treatment	Milho	Soja	Total	Milho	Soja	Total
	mMS (g pot ⁻¹)			Teor de P (g Kg ⁻¹)		
Control	2.14 c	1.37 b	3.51 c	1.14 b	1.10 a	-
BAI-P-50	2.04 c	1.45 b	3.49 c	1.09 b	1.02 a	-
BMg-P-50	2.28 b	1.72 a	4.00 b	1.13 b	1.06 a	-
ST-50	2.07 c	1.65 a	3.72 b	1.11 b	1.03 a	-
BAI-P-200	2.31 b	1.58 b	3.89 b	1.10 b	1.02 a	-
BMg-P-200	2.70 a	1.85 a	4.55 a	1.39 a	1.05 a	-
ST-P-200	2.96 a	1.87 a	4.82 a	1.18 b	1.08 a	-
Conteúdo de P(mg pot ⁻¹)			Taxa de Recuperação de P (%)			
Control	2.43 b	1.51 b	3.93 c	-	-	-
BAI-P-50	2.22 c	1.45 b	3.67 c	-0.43 b	-0.12 a	-0.54 b
BMg-P-50	2.56 b	1.83 a	4.39 b	0.26 a	0.65 a	0.91 a
ST-50	2.29 c	1.70 b	4.00 c	-0.27 b	0.40 a	0.13 b
BAI-P-200	2.53 b	1.62 b	4.15 b	0.05 b	0.06 a	0.11 b
BMg-P-200	3.75 a	1.94 a	5.69 a	0.66 a	0.22 a	0.88 a
ST-P-200	3.50 a	2.01 a	5.51 a	0.54 a	0.26 a	0.79 a
Disponibilidade de P (mg dm ⁻³)						
Control	0.13 c	0.05 c	0.09 b ^a			
BAI-P-50	0.97 b	0.56 b	0.41 b			
BMg-P-50	0.70 b	0.66 b	0.04 b			
ST-50	0.93 b	0.82 b	0.11 b			
BAI-P-200	6.82 a	3.87 a	2.95 a			
BMg-P-200	6.09 a	4.71 a	1.38 b			
ST-P-200	7.98 a	4.94 a	3.04 a			

Médias seguidas por letras distintas, nas colunas, indicam diferença significativa conforme o teste Scott-Knott à 5% de probabilidade; ^a Diferença de disponibilidade de P entre os cultivos de milho e soja.

4. DISCUSSÃO

A partir dos teores solúveis, foi visualizado que o BMg-P apresentou uma alta solubilidade em condições ácidas (AC) assim como indicado na literatura, porém a mesma, indica forte dependência do pH para dessorção e solubilização de P, como indica também que tal característica está relacionada ao P de rápida liberação (JEON et al., 2018). No presente trabalho, notou-se a partir dos teores solúveis, além da alta solubilidade em CNA elevada solubilidade de P também em condições neutras (CNA+H₂O), tal fato pode estar relacionada a natureza dos compostos formados durante o processo de pirólise, influenciando na estabilidade e solubilidade, impactando na liberação gradual de P (FANG et al., 2014).

No teste de difusividade observa-se a ausência de formação de halo de difusão no BAl-P, semelhante ao controle. Tal característica confirma as extrações sequenciais, em que grande quantidade de P presente no biocarvão apresenta-se na forma insolúvel, reduzindo assim o teor disponível em solução, dificultando a captura pelo teste colorimétrico. O mesmo resultado também foi verificado no ensaio agrônômico, com menor desempenho do BAl-P, nas diferentes doses, assemelhando-se ao controle quanto a matéria seca e conteúdo de P absorvido. Diferindo-se do mesmo, o BMg-P apresentou seu conteúdo total de P, solúvel pelos extratores, o qual foi verificado no teste de difusividade e ensaio agrônômico.

O desempenho semelhante no ensaio agrônômico do biocarvão dopado com magnésio e o Superfosfato Triplo é notório e pode ser explicado intuitivamente pelo maior teor solúvel de P no BMg-P (ARBELAEZ et al., 2021). Apesar da literatura apontar que biocarvões tratados com cátions, apresentam dinâmica de liberação lenta (YAO et al., 2013; CHEN et al., 2018), ele conseguiu suprir as necessidades fisiológicas na planta, demonstrado semelhante absorção de P, quando comparado com o ST, contribuído para o incremento visualizado em massa de matéria seca de parte aérea. Indiretamente, o resultado positivo pode estar relacionado a estimulação da matéria orgânica edáfica, principalmente devido ao aumento relatado na literatura de porosidade total de biocarvões modificados (MUKHERJEE et al., 2011; THIES e RILLIG, 2012). Contribuindo para o estímulo da matéria orgânica do solo em curto prazo, caracterizando o efeito priming positivo, em que parte da MOS é mineralizada em resposta à presença do biocarvão (BUENO et al., 2011).

Além do P nos biocarvões apresentar alta solubilidade nos extratores o resultado superior no ensaio agrônômico, pode estar relacionado ao fato do Mg desempenhar diversas funções fisiológicas relacionadas ao P. O Mg apresenta como principal função a participação como ativador enzimático em diversas reações de transferência de energia, envolvendo P.

Grande quantidade de enzimas fosforilativas, dependem da presença do Mg, para a formação pontes entre as moléculas energéticas e as enzimas. Dessa forma ocorre um sinergismo entre P e Mg, em que o Mg atua na ativação de ATPases das membranas responsáveis pela absorção iônica de P (BARKER, 2015; SILVA et al., 2015)

Em contrapartida, a adubação com BAl-P gerou resultados agronômicos semelhantes ao tratamento controle (sem fertilização com P), resultado já visualizado no teste colorimétrico. Esse menor desempenho pode estar associado à questão da toxidez de alumínio, em que espécies monucleares de Al^{3+} solubilizadas (SINGH et al., 2017; PHUKUNKAMKAEW et al., 2021), prejudicam o crescimento de raiz, o alongamento celular e diminuindo a permeabilidade celular, reduzindo o crescimento vegetal (PAVAN et al., 1982).

Foi verificado disponibilidade semelhante de P no solo entre os tratamentos de doses iguais, tal resultado contradiz o baixo desempenho do BAl-P no crescimento de massa de matéria seca e absorção de P, tal fato pode estar relacionado ao caráter ácido do extrator utilizado (Mehlich-1), em que os ácidos fortes de sua composição (HCl e H_2SO_4) provoca a dissolução de P ligado à Al, superestimando os teores disponíveis no solo (SCHLINDWEIN et al., 2013; DE OLIVEIRA et al., 2015).

5. CONCLUSÃO

A eficiência agronômica do BMg-P, comparável ao superfosfato triplo, é atribuída a sua elevada solubilidade para P.

A baixa eficiência do BA1-P como fonte de P está relacionada a grande parte do P encontrar-se na forma insolúvel.

6. REFERÊNCIAS

ANJOS, Rosane Angélica Reis et al. EFEITOS DA DOPAGEM METÁLICA EM PROPRIEDADES DE BIOCARVÕES. In: CISAGRO 2021 - Uberlândia-MG, 2021. Disponível em: <<https://www.doity.com.br/anais/cisagro2021/trabalho/227259>>. Acesso em: 12/01/2023

ARAÚJO, Iyânia Barbosa et al. Eficiência nutricional do milho em resposta a fontes e modos de aplicação de fósforo. 2003.

ARBELAEZ BRETON, Laura et al. Modificação de biocarvão derivado de madeira dura para melhorar a adsorção de fósforo. *Ambientes*, v. 8, n. 5, p. 41 de 2021.

BALLOTIN, F. C.; SANTOS, W. O.; BARROS, M. V. A.; MATTIELLO, E. M.; MENDONÇA, A. C.; SILVA, R. C. Nitric acid as a cold extractor of total nutrient contents from mineral fertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 52, n. 20, p. 2578–2587, 2021. DOI: 10.1080/00103624.2021.1953055.

BARKER, Allen V.; PILBEAM, David J. (Org.). Manual de nutrição de plantas. Imprensa CDC, 2015.

BARRETO, Luciano et al. Eutrofização em rios brasileiros. *Enciclopédia biosfera*, v. 9, n. 16, 2013.

BRASIL, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Manual De Métodos Analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos. p. 220, 2017.

BUENO, José Rafael Pires et al. Chemical and microbiological attributes of an oxisol treated with successive applications of sewage sludge¹. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1461-1470, 2011.

CHEN, Qincheng et al. Biochar derivado de esterco de vaca para recuperação de fosfato de solução aquosa e sua validação como fertilizante de liberação lenta no sistema solo-cultura. *Jornal de produção mais limpa*, v. 172, p. 2009-2018, 2018.

DALLA COSTA, Murilo; LOVATO, Paulo Emílio. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 603-605, 2004.

DASH, Siddhant; BORAH, Smitom Swapna; KALAMDHAD, Ajay S. Estudo da limnologia de áreas úmidas por meio de um modelo unidimensional para avaliação dos níveis de eutrofização induzidos por várias fontes de poluição. *Modelagem Ecológica*, v. 416, p. 108907, 2020.

OLIVEIRA GONÇALVES, Daiana; DA SILVA COSTA, Rozanda Guedes. Problemas de qualidade da água: poluição, eutrofização e educação. *Saúde & Ambiente em Revista*, v. 5, n. 1, p. 8, 2010.

DE OLIVEIRA, Clovisson Menotti Boeira et al. Capacidade de predição da disponibilidade de fósforo em solo com aplicação de fosfato solúvel e natural. *Científica*, v. 43, n. 4, p. 413-419, 2015.

DEGRYSE, Fien; MCLAUGHLIN, Mike J. Phosphorus diffusion from fertilizer: visualization, chemical measurements, and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, v. 78, n. 3, p. 832-842, 2014.

ELKINGTON, John. *Sustentabilidade: canibais com garfo e faca*. M. Books, 2020.

ENDERS, Akio; LEHMANN, Johannes. Comparison of wet-digestion and dry-ashing methods for total elemental analysis of biochar. *Communications in soil science and plant analysis*, v. 43, n. 7, p. 1042-1052, 2012.

FANG, Ci et al. Aplicação de biochar de milho modificado com magnésio para remoção e recuperação de fósforo de águas residuárias de suínos. *Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública*, v. 11, n. 9, pág. 9217-9237, 2014.

HUANG, Yimin et al. Biocarvão modificado para adsorção de fosfato em condições ambientalmente relevantes. *Chemical Engineering Journal*, v. 380, p. 122375, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Atlas de Saneamento. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_saneamento.shtm. Acesso em: janeiro.2022.

JEON, Seulki; KIM, Dong-Jin. Enhanced phosphorus bioavailability and heavy metal removal from sewage sludge ash through thermochemical treatment with chlorine donors. *Journal of industrial and engineering chemistry*, v. 58, p. 216-221, 2018.

JUNG, Kyung-Won et al. Phosphate adsorption ability of biochar/Mg–Al assembled nanocomposites prepared by aluminum-electrode based electro-assisted modification method with MgCl₂ as electrolyte. *Bioresource technology*, v. 198, p. 603-610, 2015.

LEE, Jechan; SARMAH, Ajit K.; KWON, Eilhann E. Produção e formação de biochar. In: *Biochar de biomassa e resíduos*. Elsevier, 2019. pág. 3-18.

LIU, Shao-bo et al. Production of biochars from Ca impregnated ramie biomass (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) and their phosphate removal potential. *RSC advances*, v. 6, n. 7, p. 5871-5880, 2016.

MARCHEZAN, Enio; CAMARGO, Edinaldo Rabaioli; SEGABINAZZI, Tommi. Manejo dos fertilizantes fosfatados e potássicos em arroz irrigado no sistema pré-germinado. *Bragantia*, v. 66, p. 219-226, 2007.

MILLER, R. O.; KALRA, Y. Nitric-perchloric acid wet digestion in an open vessel. *Handbook of reference methods for plant analysis*, p. 57–61, 1998.

MOHAN, Dinesh e cols. Remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos da água com biochar, um adsorvente renovável, de baixo custo e sustentável – uma revisão crítica. *Tecnologia de biorrecursos*, v. 160, p. 191-202, 2014.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R.; HARRIS, W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, v. 163, n. 3-4, p. 247-255, 2011.

NOVAIS, Sarah Vieira et al. Biochars de esterco de aviário e palha de cana-de-açúcar modificados com $MgCl_2$ para adsorção de fósforo. *Journal of Environmental Management*, v. 214, p. 36-44, 2018.

NOVAIS, RF de et al. Ensaio em ambiente controlado. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo, v. 1, p. 89-253, 1991.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. *Pesq. Agropec. Bras.*, v. 17, p. 1293-1302, 1982.

PHUKUNKAMKAEW, Suwanna et al. Morpho-physiological responses of indica rice (*Oryza sativa* sub. indica) to aluminum toxicity at seedling stage. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 29321-29331, 2021.

PINESE JÚNIOR, José Fernando; CRUZ, Lísia Moreira; RODRIGUES, Sílvio Carlos. Monitoramento de erosão laminar em diferentes usos da terra, Uberlândia-MG. *Sociedade & natureza*, v. 20, p. 157-175, 2008.

PURAKAYASTHA, TJ et al. Uma revisão sobre melhorias na condição do solo moduladas por biocarvão e dinâmica de nutrientes em relação ao rendimento das culturas: caminhos para a mitigação das mudanças climáticas e segurança alimentar global. *Chemosphere*, v. 227, pág. 345-365, 2019.

PINTO, Marina de Carvalho Eufrásio et al. Biochar from carrot residues chemically modified with magnesium for removing phosphorus from aqueous solution. *Journal of Cleaner Production*, v. 222, p. 36-46, 2019.

RAIJ, B. van. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba: Potafos, p. 106-114, 2004.

RAMOS, Sílvio Júnio et al. Biomass production and phosphorus use of forage grasses fertilized with two phosphorus sources. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 335-343, 2009.

SCHLINDWEIN, Jairo André et al. Phosphorus and potassium fertilization in no till southern Brazilian soils. *Agricultural Sciences*, v. 2013, 2013.

SILVA, ML de S.; TREVIZAM, A. R. Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. *Informações agrônômicas*, v. 149, p. 10-16, 2015.

SINGH, Shweta et al. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. *Environmental and Experimental Botany*, v. 137, p. 177-193, 2017.

SONG, Shuang e cols. Biochar para agricultura urbana: impactos nas características químicas do solo e no crescimento de Brassica rapa, teor de nutrientes e metabolismo ao longo de múltiplos ciclos de crescimento. *Ciência do Meio Ambiente Total*, v. 727, p. 138742, 2020.

THIES, Janice E.; RILLIG, Matthias C. Characteristics of biochar: biological properties. In: *Biochar for environmental management*. Routledge, 2012. p. 117-138.

WANG, YS et al. Compósitos de biochar: tendências emergentes, sucessos de campo e implicações de sustentabilidade. *Uso e Manejo do Solo*, v.38 (1), p.14-38, 2022.

YAO, Ying et al. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: characterization and phosphate removal potential. *Bioresource technology*, v. 102, n. 10, p. 6273-6278, 2011.

YAO, Ying et al. Biochar projetado recuperando fosfato de soluções aquosas: mecanismos e aplicação potencial como fertilizante de liberação lenta. *Ciência e tecnologia ambiental*, v. 47, n. 15, pág. 8700-8708, 2013.

YIN, Qianqian et al. Evaluation of nitrate and phosphate adsorption on Al-modified biochar: influence of Al content. *Science of the Total Environment*, v. 631, p. 895-903, 2018.

ZHANG, Ming et al. Synthesis of porous MgO-biochar nanocomposites for removal of phosphate and nitrate from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, v. 210, p. 26-32, 2012.