DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM AGREGADOS DO SOLO: EFEITO DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE E DOSE DE BIOCARVÕES DE CASCA DE EUCALIPTO

Maria Eduarda Pagotto Barros da Silva, Renato Ribeiro Passos, Danilo Andrade Santos, Thaís Vaillant Moraes da Silva, Lorena Contarini Machado, Mateus Hastenreiter Rodrigues Silva Loquez, Camila Barbiero Siqueira, Chansislayne Gabriela da Silva, Amanda Gomes Silva, Leticia Camilato de Paula

Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Departamento de Agronomia, Alto Universitário, s/n, Guararema – 29500-00 – Alegre-ES, Brasil, eduarda.pagottob@gmail.com, danilo_as@live.com, renatoribeiropassos@gmail.com, vaillanthais@outlook.com, contarini.machado@gmail.com, mateushastenreiter@gmail.com, cbarbiero2709@gmail.com, chansislayne_silva@outlook.com, gomesamanda211@gmail.com, leticia.c.paula@ufes.br

Resumo

Os biocarvões apresentam grande potencial para beneficiar a agregação e a estabilidade física do solo, bem como para incrementar a disponibilidade de nutrientes às plantas. Diante disso, o presente trabalho objetivou avaliar a formação de macro e microagregados, além da disponibilidade de fósforo (P), em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetidas à aplicação de biocarvões de casca de eucalipto. O experimento foi conduzido em laboratório sob delineamento de blocos casualizados, em ambiente controlado (± 25 ºC), durante um período de 161 dias. O ensaio foi disposto em esquema fatorial 2 x 5, correspondendo a duas temperaturas finais de pirólise do biocarvão (350 ºC e 600 ºC) e cinco doses de aplicação (0, 10, 20, 40 e 80 t ha^{-1}), com quatro repetições por tratamento. Os resultados indicaram que a aplicação do biocarvão não proporcionou aumento significativo na proporção de macro e microagregados. Contudo, constatou-se um incremento linear nos teores de P disponível em ambas as classes de agregados à medida que se elevaram as doses do material carbonizado, independentemente da temperatura de pirólise (350 ºC ou 600 °C).

Palavras-chave: Propriedades físico-químicas. Condicionadores de solo. Nutrição de plantas. Matéria orgânica carbonizada.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias. Agronomia.

Introdução

A degradação estrutural do solo compromete severamente o potencial produtivo das terras agrícolas. Tais alterações afetam outros atributos edáficos, diminuindo a estabilidade dos agregados e resultando na perda ou indisponibilidade de nutrientes essenciais às plantas.

No que diz respeito à agregação do solo e à dinâmica do P, estudos indicam que sistemas de manejo que preservam ou melhoram da estrutura física também contribuem para a disponibilidade desse elemento (MCDOWELL et al., 2007; FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015; GARLAND et al., 2017; MARGENOT et al., 2017).

A introdução de biocarvões, neste sentido, apresenta potencial em afetar positivamente tanto a agregação e estabilidade de agregados do solo quanto a disponibilidade de fósforo para as plantas (XUE et al., 2026). Nestes casos, as melhorias na agregação e na estabilidade dos agregados do solo pela presença de biocarvões são variáveis. Por um lado, elas dependem das propriedades intrínsecas do biocarvão, como a área superficial específica, a porosidade e a presença de grupos funcionais em sua superfície que interagem com as fases minerais e orgânicas do solo (MUKHERJEE e LAL, 2013; ISLAM et al., 2021). Por outro lado, a magnitude dessas melhorias também é fortemente

ditada por características locais e de manejo, incluindo a textura e a declividade do solo, o clima, o nível inicial de carbono e a quantidade de biocarvão aplicada (BLANCO-CANQUI, 2017; ISLAM et al., 2021).

Neste sentido, este trabalho objetivou incorporar diferentes doses de biocarvão ao solo, produzido em duas temperaturas de pirólise, para verificar a formação de macro e microagregados e a disponibilidade de fósforo após a incorporação de biocarvões ao solo com a promoção de ciclos de umedecimento e secagem.

Metodologia

O experimento foi conduzido no Laboratório de Solos do CCAE/UFES (Alegre, ES), em ambiente controlado (± 25 ºC) por 161 dias. Utilizou-se delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 5, com quatro repetições. Os fatores consistiram em biocarvões de casca de eucalipto produzidos em duas temperaturas de pirólise (350 ºC e 600 ºC) e cinco doses de aplicação (0, 10, 20, 40 e 80 t ha^{-1}). Os biocarvões foram produzidos a partir de cascas de eucalipto (fornecidas pela Usina Bragança, Sul do ES). As cascas foram picadas e carbonizadas em reator metálico (modelo SPPT-V60) sob temperaturas finais de 350 °C e 600 °C, com taxa de aquecimento de 12 °C min^{-1} e tempo de residência de 60 min. Após resfriamento no próprio reator, o material foi macerado e peneirado para obtenção da granulometria de interesse (< 2 mm). Em seguida, procedeu-se à caracterização elementar (C, H, N e O) e à quantificação de macro e micronutrientes via digestão nitroperclórica (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Teores elementares[1] C, H, N e O e relações C/N, H/C e O/C em biocarvões de casca de eucalipto produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 ºC e 600 ºC).

Biocarvão/ Temperatura	Teor elementar (%)				C/N	H/C	O/C
	C	H	N	O			
350 °C	54,99	3,12	0,60	41,28	107,01	0,68	0,56
600 °C	65,05	1,44	0,51	34,37	149,80	0,26	0,38

[1]Determinados em Analisador Perkin Elmer Serie II 2400; O (%) =100-C-H-N. Fonte: Próprio autor

Tabela 2. Valores de pH e teores totais de macronutrientes[1] presentes nos biocarvões de casca de eucalipto produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 ºC e 600 ºC).

Variável	350 ºC	600 ºC
pH em água	7,1	8,1
P (dag kg-1)	0,07	0,09
K (dag kg-1)	0,57	0,70
Ca (dag kg-1)	2,64	3,31
Mg (dag kg-1)	0,41	0,57

[1]Obtidos por digestão nitroperclórica (EMBRAPA, 1997). Fonte: Próprio autor

Foram coletadas amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo na profundidade de 0-20 cm, em área de pastagem localizada no município de Alegre, Espírito Santo. O solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), e retirou-se uma subamostra para caracterização química e física. Cada parcela experimental foi composta por 200 g de TFSA homogeneizada com a respectiva dose de biocarvão e acondicionada em potes plásticos abertos. A umidade inicial foi ajustada com água deionizada para uma tensão de -20 kPa, previamente determinada para cada tratamento em extrator de Richards. O experimento durou 161 dias, compreendendo 23 ciclos semanais de umedecimento e secagem. A secagem ocorreu por evaporação livre e o umedecimento consistiu na reposição da água perdida, controlada gravimetricamente (pesagens a cada 7 dias). Ao final dos 161 dias, a reposição hídrica foi suspensa por 15 dias para a secagem das amostras ao ar antes das avaliações.

Após o período de incubação e secagem ao ar, as amostras foram levadas ao conjunto de peneiras separando-as em macro agregados (>0,250 mm) e microagregados (<0,250 mm). Posteriormente, foram obtidos a massa do solo em ambas as classes e foi calculado a proporção de macro e micro agregados para cada um dos tratamentos. Após classificação da proporção de agregados, foi separado

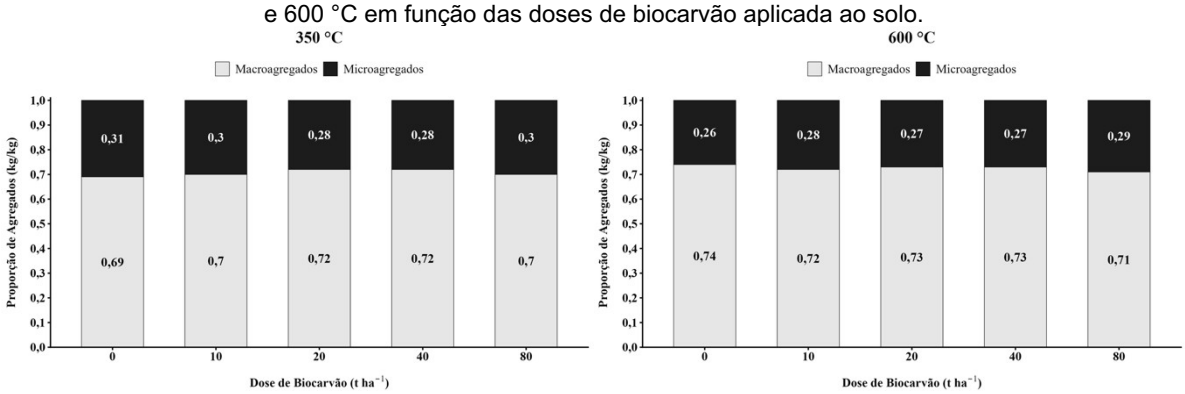
uma amostra de 10 g de solo de cada um dos tratamentos, conforme a classe de macro e microagregados, e submetido à determinação dos teores de P disponíveis a partir das soluções Mehlich (EMBRAPA, 1997).

Os dados foram inicialmente submetidos aos testes de pressupostos para verificação da normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett). Atendidos os pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA), sendo a proporção de agregados avaliada por estatística descritiva e o efeito das temperaturas de pirólise analisado pela significância do teste F. Para o efeito das doses de biocarvão, ajustaram-se modelos de regressão. A escolha dos modelos baseou-se no comportamento gráfico, no coeficiente de determinação (R^2) e na significância dos coeficientes pelo teste t de Student. Todos os procedimentos foram realizados no software R (R Core Team, 2026).

Resultados

Observa-se que não houve diferença expressiva entre as proporções de macro e micro agregados com o aumento das doses de biocarvão em ambas as temperaturas de pirólise (Figura 1). Em média, foram obtidos uma proporção de 70% para macroagregados e 30% de microagregados.

Figura 1 - Proporção da massa de macro e microagregados (kg/kg) obtidos na temperatura de pirólise de 350 °C e 600 °C em função das doses de biocarvão aplicada ao solo.



Fonte: Próprio autor

Tabela 3 - Teores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do teor de P (mg kg^{-1}) em macro e microagregados formados no solo após aplicação de quatro diferentes doses de biocarvões (10, 20, 40 e 80 t ha^{-1}) produzidos sob duas temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C).

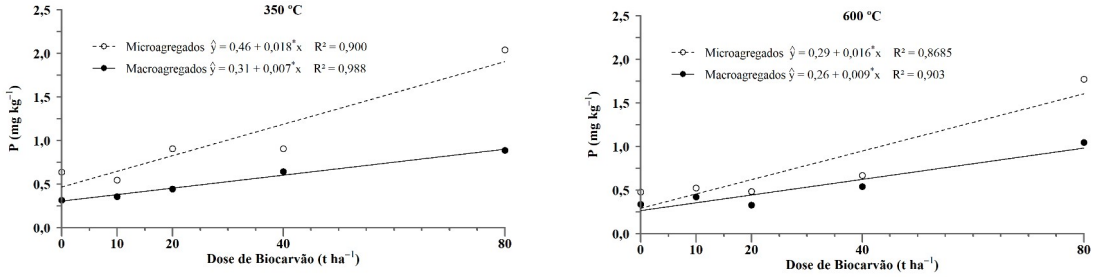
350 °C							
Dose (t ha^{-1})	**Microagregados**			**Macroagregados**			***Test t p-valor**
	P (mg kg^{-1})			**P (mg kg^{-1})**			
	Média	**Desv. P.**	**C. V. (%)**	**Média**	**Desv. P.**	**C. V. (%)**	
10	0,54675	0,10734	19,63267	0,35643	0,09774	27,42337	0,063
20	0,90704	0,32523	35,85678	0,44557	0,08866	19,89895	0,087
40	0,90568	0,09354	10,32839	0,64434	0,19385	30,08501	0,080
80	2,03938	0,20968	10,28186	0,88700	0,05724	6,453589	0,000
600 °C							
Dose (t ha^{-1})	**Microagregados**			**Macroagregados**			***Test t p-valor**
	P (mg kg^{-1})			**P (mg kg^{-1})**			
	Média	**Desv. P.**	**C. V. (%)**	**Média**	**Desv. P.**	**C. V. (%)**	
10	0,52602	0,20804	39,55085	0,42308	0,21132	49,94831	0,569
20	0,48447	0,05853	12,08173	0,32878	0,09905	30,12561	0,067
40	0,67025	0,18847	28,11953	0,54124	0,19518	36,06259	0,441
80	1,77106	0,46138	26,05114	1,04607	0,36055	34,46764	0,075

*Significância estatística (p-valor) via test t de Student para comparação dos teores de fósforo entre macro e microagregados em cada dose e biocarvão. Fonte: Próprio autor

De forma geral, observa-se u m maior teor de P disponível na classe de microagregados. No entanto, as comparações estatísticas dos teores de P disponível entre macros e microagregados indicam que apenas na dose de 80 t ha^{-1}, no tratamento com biocarvão produzido na temperatura de pirólise de 350 °C, é que houve diferença significativa quanto ao teor de P disponível, obtendo-se maiores valores na classe dos microagregados (Tabela 3).

Quando analisamos os teores de P disponíveis separadamente nos macros e microagregados, observamos ajustes de modelos lineares (Figura 2) com coeficiente angular positivo, demonstrando valores crescentes de P disponível à medida que se aumentam as doses de biocarvão aplicadas.

Figura 2 - Teor de P disponível (mg kg^{-1}) em função das doses de biocarvão (0, 10, 20, 40 e 80 t ha^{-1}) produzidos nas temperaturas de pirólise de 350 °C e 600 °C, para as frações de macro e microagregados.



*Coeficiente angular significativo a 5% de probabilidade. Fonte: Próprio autor

Discussão

Uma vez que o fósforo (P) dos biocarvões tende a estar predominantemente presente na fração inorgânica, esta é representada principalmente pelas cinzas impregnadas no material (SHEPHERD et al., 2017). Por se caracterizarem como um pó mais fino, essas cinzas tendem, no processo de separação dos agregados por peneiramento, a se acumular juntamente com a classe dos microagregados. Em consequência, as massas dos agregados de menor tamanho retêm uma maior quantidade de compostos fosfatados, o que justifica as concentrações mais elevadas de P observadas nesta classe.

Para estudos futuros, sugere-se a utilização de malhas de peneiramento com abertura superior à granulometria máxima do biocarvão aplicado. Essa adequação metodológica é fundamental para isolar a real interação do fósforo (P) com as maiores classes de agregados. Com isso, evita-se a superestimação dos resultados, em que a elevada disponibilidade de P detectada poderia ser atribuída a partículas livres de biocarvão ao invés da matriz do solo agregada. Uma abordagem análoga foi validada por Xue et al. (2026), que, ao aplicarem biocarvão com diâmetro inferior a 2 mm e avaliarem apenas os agregados maiores que 2 mm, constataram ganho de massa e aumento na disponibilidade de P nas frações maiores, comprovando o papel do material carbonizado na dinâmica de agregação.

Por sua vez, a diferença estatística observada exclusivamente na dose de 80 t ha^{-1}, sob a aplicação de biocarvão a 350 °C, pode ser explicada pela combinação de dois fatores. O primeiro refere-se ao maior aporte de P lábil por biocarvões produzidos em temperaturas mais baixas. Como demonstrado por Xu et al. (2016), temperaturas de pirólise reduzidas favorecem a preservação de frações biodisponíveis de fósforo, ao passo que a elevação térmica induz a transformação do nutriente em compostos minerais estáveis e de baixa solubilidade. O segundo fator consiste no acúmulo desse P biodisponível, veiculado pelas cinzas na classe dos microagregados. A aplicação de uma dose tão elevada promove a saturação rápida dos sítios de adsorção do solo; assim, havendo menor disponibilidade de sítios para a fixação, uma fração maior do nutriente permanece livre e prontamente disponível no sistema.

O aumento dos valores de P disponível em ambos os tipos de agregados, à medida que se elevam as doses de aplicação, é explicado primariamente pelo papel do biocarvão como fonte direta do nutriente (XU et al., 2016; SILVA et al., 2021). Assim, doses maiores de biocarvão naturalmente introduzem cargas mais elevadas de fósforo no sistema. Xue et al. (2026) atribuem adequadamente a esse aporte direto o maior teor de P encontrado nos macroagregados; contudo, os autores realizam uma inferência imprecisa ao relacionarem a melhoria na estabilidade dos agregados a uma maior

disponibilidade de fósforo. Na dinâmica estrutural do solo, a agregação confere proteção física aos compostos fosfatados, o que restringe a difusão do elemento e pode, inclusive, reduzir a sua disponibilidade imediata no interior dos agregados maiores (SANTOS et al., 2022). Logo, a maior disponibilidade observada decorre da adição do elemento pelo próprio material carbonizado, potencializada pelos seus efeitos condicionadores, como a liberação de compostos orgânicos que competem com o fosfato pelos sítios de fixação na matriz do solo e o aumento do pH em solos ácidos (SILVA et al., 2021). Isto indica que o biocarvão, por meio de suas propriedades intrínsecas, é o fator determinante para manter a disponibilidade de P em ambas as classes de agregados.

O incremento nos teores de P disponível em ambas as classes de agregados, em resposta à elevação das doses, deve-se primariamente ao papel do biocarvão como fonte direta do nutriente (XU et al., 2016; SILVA et al., 2021), uma vez que doses maiores introduzem, inerentemente, maiores cargas de fósforo no sistema. Embora Xue et al. (2026) associem de forma coerente esse aporte direto ao maior teor de P nos macroagregados, os autores extrapolam ao atrelar a melhoria na estabilidade dos agregados ao aumento na disponibilidade de fósforo. Sob a ótica da dinâmica estrutural do solo, a agregação promove a proteção física dos compostos fosfatados, o que restringe a difusão do elemento e pode, inclusive, reduzir sua disponibilidade imediata no interior dos agregados maiores (SANTOS et al., 2022). Portanto, a maior disponibilidade observada decorre da adição do elemento pelo próprio material carbonizado, em sinergia com seus efeitos condicionadores, tais como a elevação do pH em solos ácidos e a liberação de compostos orgânicos que competem com o fosfato pelos sítios de fixação (SILVA et al., 2021). Evidencia-se, assim, que as propriedades intrínsecas do biocarvão constituem o verdadeiro motor para a manutenção da disponibilidade de P nas diferentes frações agregadas.

Em avaliação de curto prazo conduzida por Lee et al. (2021) mostra que o biocarvão, aplicado de maneira isolada, não induz a formação de macroagregados nas primeiras semanas. Contudo, ao ser associado a uma fonte de carbono lábil, o material atua como um núcleo de proteção física. A porosidade intrínseca do biocarvão serve de abrigo para a microbiota e protege a matéria orgânica recém-adicionada, modulando sua taxa de decomposição (LEE et al., 2021). Ao estabelecer esse micro-habitat favorável, o biocarvão cria as condições necessárias para que a atividade microbiana promova, de forma progressiva, a união dos microagregados, culminando em sua consolidação em macroagregados estáveis.

Conclusão

Conclui-se que a aplicação de biocarvões de casca de eucalipto, independentemente da temperatura de pirólise (350 ºC ou 600 ºC), não promove aumento significativo na proporção de macro e microagregados do solo a curto prazo. No entanto, o biocarvão atua primariamente como fonte direta de fósforo, elevando de forma linear a disponibilidade desse nutriente em ambas as classes de agregados à medida que se aumentam as doses aplicadas. Destaca-se um maior acúmulo de P na fração dos microagregados (especialmente na dose de 80 t ha^{-1} a 350 °C), dinâmica atribuída à concentração do nutriente inorgânico carreado pelas cinzas mais finas do material.

Referências

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687–711, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

FONTE, S. J. et al. Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 150–157, 2014.

GARLAND, G. et al. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 37–55, 2017.

MARGENOT, A. J. et al. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 157–166,2017.

MCDOWELL, R. W. et al. Influence of aggregate size on phosphorus changes in a soil cultivated intermittently: analysis by 31P nuclear magnetic resonance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, n. 4, p. 409–415, 2007.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 313–339, 2013.

NESPER, M. et al. Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, Special issue on developments in soil organic phosphorus cycling in natural and agricultural ecosystems. v. 257–258, p. 123–133, 2015.

R Core Team (2026). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

SANTOS, D. A.; SILVA, A. G.; PASSOS, R. R.; RANGEL, O. J. P. Agregados do solo e dinâmica do P: uma relação ainda pouco compreendida. In: RANGEL, O. J. P.; BERILLI, A. P. C. G.; OLIVEIRA, A. F. M.; ALVES, D. I.; ALVES, J. A.; FERRARI, J. L.; SOUZA, M. N.; MOULIN, M. M.; MENDONÇA, P. P. (Org.). **Tópicos em Agroecologia - Volume III**. 1. ed. Vitória: Edifes, 2022. v. 3, p. 336-349.

XUE, P.; et al. Effects of biochar on farmland soil aggregate stability and phosphorus desorption. **Journal of Environmental Management**, v. 398, p. 128513, 2026.

SHEPHERD, J. G. et al. Bioavailability of phosphorus, other nutrients and potentially toxic elements from marginal biomass-derived biochar assessed in barley (*Hordeum vulgare*) growth experiments. **Science of The Total Environment**, v. 584-585, p. 448-457, 2017.

ISLAM, M. U. et al. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 209, p. 104926, 2021.

XU, G.; et al. Pyrolysis temperature affects phosphorus transformation in biochar: Chemical fractionation and 31P NMR analysis. **Science of the Total Environment**, v. 569-570, p. 65-72, 2016.

LEE, M.-H. et al. Effects of Biochar on Soil Aggregation and Distribution of Organic Carbon Fractions in Aggregates. **Processes**, v. 9, p. 1431, 2021.

SILVA, C. C. da; et al. Biocarvões e disponibilidade de fósforo para a produção vegetal. In: COSTA, A. V.; PARREIRA, L. A.; PROFETI, L. P. R.; CAMPOS, O. S. (Org.). **Tópicos Especiais em Agroquímica I**. Vitória, ES: Editora UFES, 2021. p. 51-68.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Física do Solo, da Universidade Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre, pela infraestrutura para realização deste estudo, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).