

ANÁLISE DA SINERGIA ENTRE BIOCARVÃO, FERTILIZANTE MINERAL E *RHIZOBIUM TROPICI*

Lorena de Oliveira Felipe¹, Edson Romano Nucci², Felipe Antônio Lacerda³, Francine Silveira Vieira⁴, Guilherme Guimarães Ascendino⁵, Kaíque Souza Gonçalves Cordeiro Oliveira⁶, Sílvia Natália Guimarães Lima⁷, Bruno Meireles Xavier⁸

RESUMO - A disseminação do uso de carvão como adjuvante de fertilidade do solo depende do desenvolvimento de tecnologias que tragam benefícios comerciais também no curto prazo. Desse modo, o objetivo desse artigo consistiu na avaliação da interação do biocarvão com a fertilização convencional (NPK 4:30:16) e o bioinoculante (*Rhizobium tropici*). Para tal, foi aplicada a metodologia do Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR) tendo como variável resposta a avaliação da produtividade do feijoeiro, nodulação de raiz e pH do solo das parcelas experimentais. O experimento foi realizado em duplicata, com dois pontos centrais. Observou-se que as interações das variáveis testadas foram significativas ($p < 0,05$) para a produtividade do feijoeiro, sendo que o maior estímulo foi observado nos níveis +1 de *R.tropici*, biocarvão e NPK. Entretanto, o incremento no estímulo à produtividade foi menor nos níveis mais altos das variáveis estudadas, indicando uma relação de custo-benefício ideal de NPK 4:30:16 e *R.tropici* compatível com as recomendações feitas pela literatura especializada e adição de 7,5% m/m de biocarvão. Assim, nossos resultados indicam que, aplicado nessas proporções, o biocarvão otimize o rendimento da produção agrícola quando aliado a técnicas tradicionais de fertilização.

Palavras-chave: biocarvão, desenvolvimento sustentável, fertilidade do solo, gerenciamento ambiental, produtividade agrícola, segurança alimentar.

ANALYSIS OF THE SYNERGY AMONG BIOCHAR, MINERAL FERTILIZER AND *RHIZOBIUM TROPICI*

ABSTRACT - The spread of biochar use as soil fertility adjuvant depends on the development of technologies that bring benefits also in the short term. Thereby, we aimed to study interactions of biochar with the conventional fertilizer (NPK 4:30:16) as well as biological inoculation (*Rhizobium tropici*). The Central Composite Rotatable Design (CCRD) approach was employed in this work. The following free responsible-variables was analyzed: evaluation of bean productivity, root nodulation and soil pH. This work was done in duplicate with two central points. Results indicated that biochar and NPK promoted root nodulation as it raised soil pH ($p < 0,05$). Among the levels of biochar tested, the addition of 7,5% of biochar to soil provided best interactions with other variables studied in terms of plant growth and productivity, with NPK at 500 Kg ha⁻¹ and *R. tropici* at 16 Kg per Kg of seed. Taken

¹ Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável (PPGTDS). UFSJ/Campus Alto Paraopeba. lorenaob@gmail.com

² Professor Adjunto do Departamento de Química, Biotecnologia e Engenharia de Bioprocessos (DQBIO). UFSJ/Campus Alto Paraopeba. nucci@ufsj.edu.br

³ Engenheiro Civil, ex-bolsista do Programa de Educação Tutorial Biotecnologias para a Sustentabilidade. UFSJ/Campus Alto Paraopeba. felipelacerdacivil@gmail.com

⁴ Engenheira Química, ex-bolsista do Programa de Educação Tutorial Biotecnologias para a Sustentabilidade. UFSJ/Campus Alto Paraopeba. francine.silveirav@gmail.com

⁵ Engenheiro Químico, ex-bolsista do Programa de Educação Tutorial Biotecnologias para a Sustentabilidade. UFSJ/Campus Alto Paraopeba. guilherme.ascendino@gmail.com

⁶ Engenheiro Químico, ex-bolsista do Programa de Educação Tutorial Biotecnologias para a Sustentabilidade. UFSJ/Campus Alto Paraopeba. kaiquesgeq@gmail.com

⁷ Engenheira Civil, ex-bolsista do Programa de Educação Tutorial Biotecnologias para a Sustentabilidade. UFSJ/Campus Alto Paraopeba. silvia-lima18@hotmail.com

⁸ Food Research Lab, NYS Food Venture Center/NECFE, Cornell University/NYSAES, 630 W. North Street, Geneva, NY 14456. bmx2@cornell.edu



together, and compared to literature, our results indicate that biochar can have a synergistic effect with conventional fertilization techniques. Future open field studies are needed to better evaluate the extent of this effect.

Key words: biochar, sustainable development, soil fertility, environmental management, agricultural productivity, food security.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, em função da vasta aplicabilidade dos produtos de pirólise, esse processo tem sido exaustivamente estudado com o intuito de aumentar o rendimento e adaptar o processo para diferentes tipos de matérias primas (Wang *et al.*, 2015). Ainda, é válido ressaltar que a pirólise também tem se destacado em função das inúmeras possibilidades que oferece, entre as mais importantes: (i) gerenciamento de resíduos, ao considerar que pode ser empregada para converter diferentes recursos de biomassa – dejetos suínos, podas de lavoura, resíduos sólidos urbanos (RSU); (ii) a clara oportunidade de agregar valor a passivos ambientais (ii) a clara oportunidade de agregar valor à passivos ambientais, bem como (iii) contribuir para a remediação ambiental (Sharma *et al.*, 2015).

A pirólise – carbonização da biomassa sob altas temperaturas, em ambiente livre/baixa concentração de oxigênio – dependendo dos parâmetros aplicados, resulta na produção de produtos com alta densidade energética: biocarvão (sólido com alto teor de carbono), bio-óleo (líquido) e gás de síntese (combustível).

Contudo, apesar da pirólise ser exaustivamente estudada na atualidade, a carbonização da matéria orgânica é prática aplicada pela humanidade desde a antiguidade. No Brasil, o estudo das Terras Pretas de Índio (TPI) sugere que esse tipo de prática era comum entre os povos indígenas que habitavam a Amazônia nos tempos remotos. Assim, tais populações adquiriram o hábito de adicionar deliberadamente matéria carbonizada ao solo, aumentando progressivamente a fertilidade do mesmo. Portanto, a TPI tornou-se modelo de prática agrícola sustentável. Partindo dessa perspectiva, o biocarvão tornou-se produto dessas pesquisas, com o objetivo de replicar as mesmas características da TPI.

Considerado esse contexto e a potencialidade do biocarvão como condicionador de solo, bem como as pertinentes dificuldades atuais para o escalonamento

da produção de alimentos em amplitude global/nacional, o uso do biocarvão torna-se efetivamente promissor como tecnologia para o desenvolvimento sustentável. Tal fato pode ser justificado ao levar-se em conta que o uso do biocarvão pode contribuir para melhorar a produtividade agrícola por sua atividade condicionadora de solo (Lone *et al.*, 2015). Adicionalmente, pode também colaborar para o manejo racional dos recursos hídricos e energéticos (menor demanda de fertilizantes químicos), subsidiando assim um cenário mais otimista para a segurança alimentar (Novak *et al.*, 2015).

Além dos fatores anteriormente mencionados, do ponto de vista do gerenciamento ambiental, o biocarvão mostra-se como uma ferramenta chave (Lehmann & Joseph, 2015). Dentre as principais contribuições nesse sentido, vale ressaltar: (i) pode ser utilizado como leito fixo em biodigestores, favorecendo a produção de biogás em função de seu efeito tamponante; (ii) considerando a sua capacidade adsorvente, pode ser usado na remediação ambiental de diferentes poluentes; (iii) é claramente considerado uma fonte de sumidouro de carbono da atmosfera e, assim, mitigador de mudanças climáticas; (iv) por fim, tem potencial de auxiliar na redução da taxa de emissão de óxido nitroso (um dos gases de efeito estufa) na agricultura.

Entretanto, embora seja encontrada uma infinidade de trabalhos sobre biocarvão na literatura científica, não existem relatos de estudos analisando o efeito sinérgico desse produto com outros métodos de adubação tradicional, simultaneamente ao uso de inoculante biológico para avaliação da fixação biológica de nitrogênio.

Portanto, o objetivo central desse trabalho foi avaliar a interação entre o biocarvão, fertilizante mineral (NPK 4:30:16) e o inoculante biológico (*Rizobium tropici*) na produtividade do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), alimento de importância central na alimentação do cidadão brasileiro. Para tal, empregou-se ferramenta estatística baseada na metodologia de superfície de resposta para avaliar a interação das variáveis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Materiais

Amostra de solo, classificado como Latossolo vermelho de textura argilosa⁹ foi amostrado e utilizado para preparo das amostras contendo diferentes concentrações de carvão. Amostras de solo foram tamisadas em peneira de 20 mm, destorroadas/secas ao ar antes de serem utilizadas para a montagem das replicatas. Para fins experimentais, utilizou-se o carvão vegetal obtido a partir de resíduos de uma carvoaria localizado no distrito de Santa Rita de Ouro Preto/MG. O carvão foi tamisado em peneira de 20 mm, tendo sido utilizada a parte não retida. As sementes de feijão (cultivar Pérola) foram obtidas diretamente na EMBRAPA Sete Lagoas/MG. Por fim, o inoculante biológico *Rhizobium tropici* (NITRO 1000®) e o NPK (Hering®) formulação 4:30:16 foram adquiridos comercialmente.

As parcelas experimentais foram estruturadas em vasos contendo 10 L de mistura solo/carvão vegetal (Tabela 1) e homogeneizados em betoneira. Anteriormente ao plantio, as sementes de feijão foram inoculadas com *Rhizobium tropici* seguindo as instruções do fabricante. Logo em seguida, em cada vaso experimental foram plantadas três sementes de feijão e a adubação ao plantio foi realizada adicionando-se manualmente NPK na superfície do vaso. Posteriormente, oito dias após a emergência, realizou-se o desbaste das plantas emergentes, mantendo-se a planta mais vigorosa.

O experimento foi realizado em campo aberto nas dependências da Universidade Federal de São João-del-Rei/Campus Alto Paraopeba, em Ouro Branco/MG (20°31'15"S e 43°41'31"W) a 1052 m de altitude. Irrigação artificial foi realizada em todos os dias não chuvosos, sendo que a lâmina de irrigação utilizada foi calculada tomando como base o tercil médio de distribuição climatológica da chuva monitorada desde 1961 para a região de Belo Horizonte/MG e disponibilizado pelo INMET (INMET, 2015)

O experimento foi conduzido por 90 dias, tendo sido utilizado o fim do estado fenológico do cultivar como ponto de referência. Ao final do período de incubação, as plantas foram removidas inteiras, destorroadas e cuidadosamente lavadas para a remoção do solo. Em seguida, procedeu-se a retirada manual

dos nódulos das raízes e remoção das vagens, os quais foram dispostos em estufa a 65°C/72 h e pesados em balança de precisão quando apresentaram massa constante. Para a determinação do pH do solo, após a estruturação das parcelas experimentais, amostras de 5 g foram retiradas de cada vaso, tendo sido analisado o pH da mistura em água seguindo protocolo determinado pela EMBRAPA (EMBRAPA, 1997).

2.2. Planejamento Experimental

A metodologia de superfície de resposta foi empregada utilizando o planejamento experimental do tipo Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR) para avaliar a interação em três diferentes níveis entre as seguintes variáveis-controle: carvão vegetal, NPK 4:30:16 e inoculante biológico (*Rhizobium tropici*) na produtividade do feijoeiro comum. A escolha dos níveis empregados são mostrados na Tabela 1. Para variáveis-resposta, avaliou-se: produtividade do feijoeiro (massa seca de vagem), nodulação de raiz (massa total de nódulos de cada planta) e pH das parcelas experimentais.

A análise estatística dos dados obtidos foi realizada usando o programa STATISTICA 7 (Statsoft, USA). As estimativas dos efeitos de cada uma das variáveis foram feitas a 95% de confiança, tendo sido consideradas estatisticamente significativas aquelas com $p < 0,05$. Excetuando-se os valores dos pontos centrais, considerou-se a média das duplicatas na análise estatística.

3. RESULTADOS

3.1. Matriz Experimental

O efeito das variáveis de estudo foi investigado de acordo com matriz experimental apresentada na Tabela 2, a qual mostra também as respostas da produtividade do feijoeiro, nodulação de raiz e pH das parcelas experimentais.

3.2. Produtividade do feijoeiro

Na Tabela 3 é mostrada as estimativas dos efeitos para a produtividade do feijoeiro, respectivamente. A partir desses dados, observa-se que foram significativos os termos lineares para NPK e *R. tropici*, bem como a interação entre o carvão vegetal e o NPK. Assim, através dos resultados obtidos foi possível realizar o cálculo do F_{calc} e compará-lo com o F_t . Nesse

¹⁰ F_{calc} = F calculado. F_t = F tabelado. R^2 = coeficiente de determinação.



Tabela 1 - Valores utilizados no DCCR para a avaliação da interação entre o carvão vegetal, NPK 4:30:16 e *R.tropici* na produtividade do feijoeiro comum

Variáveis	Níveis				
	-1,68	-1	0	+1	+1,68
Carvão vegetal (% m/m)	0	2,5	7,5	12,5	15,5
NPK (4:30:16) (Kg/ha)	0	160	400	640	800
<i>Rhizobium tropici</i> (Kg/50 Kg semente)	0	200	500	800	1000

Tabela 2 - Matriz padrão para o DCCR Delineamento Central Composto Rotacional e valores obtidos das variáveis respostas

Ensaio	Carvão vegetal (%m/m)	NPK 4:30:16 (Kg/ha)	<i>R.tropici</i> (g/50 Kg semente)	Carvão vegetal (%m/m)	NPK 4:30:16 (Kg/ha)	<i>R.tropici</i> (g/50 Kg semente)	Produtividade do feijoeiro (g)	Nodulação de raiz (mg)	pH (H ₂ O)
1	-	-	-	2,5	160	200	7,81	80	5,62
2	-	-	+	2,5	160	800	16,35	85	5,37
3	-	+	-	2,5	640	200	6,34	85	5,65
4	-	+	+	2,5	640	800	16,31	80	5,42
5	+	-	-	12,5	160	200	8,59	240	6,7
6	+	-	+	12,5	160	800	8,69	260	6,74
7	+	+	-	12,5	640	200	16,53	205	6,29
8	+	+	+	12,5	640	800	19,48	185	6,25
9	-1,68	0	0	0	400	500	10,16	75	5,25
10	1,68	0	0	15,5	400	500	15,02	85	6,72
11	0	-1,68	0	7,5	0	500	1,77	140	6,65
12	0	1,68	0	7,5	800	500	17,15	250	5,73
13	0	0	-1,68	7,5	400	0	9,91	90	5,57
14	0	0	1,68	7,5	400	1000	14	100	5,6
15(C)*	0	0	0	7,5	400	500	12,66	20	5,45
16 (C)	0	0	0	7,5	400	500	14,81	40	5,38

(C)* Ponto central.

Tabela 3 - Estimativa dos efeitos do Delineamento Central Composto Rotacional para a produtividade do feijoeiro

Variáveis	Coef.de regressão	Erro padrão	t(6)	p-valor	Lim. de conf. -95%	Lim. de conf. + 95%
Média	13,41	1,74	7,72	0,00	9,16	17,66
(1) Carvão vegetal (L)	2,17	1,40	1,56	0,17	-1,24	5,59
Carvão vegetal (Q)	0,02	1,83	0,01	0,99	-4,46	4,50
(2) NPK 4:30:16 (L)	6,32	1,35	4,67	0,00	3,01	9,64
NPK 4:30:16 (Q)	-2,32	1,63	-1,42	0,21	-6,30	1,67
(3) <i>R.tropici</i> (L)	4,19	1,35	3,09	0,02	0,87	7,50
<i>R.tropici</i> (Q)	-0,52	1,63	-0,32	0,76	-4,50	3,47
1 L x 2 L	5,06	1,76	2,87	0,03	0,75	9,37
1L x 3 L	-3,87	1,76	-2,19	0,07	-8,18	0,45
2 L x 3 L	1,07	1,76	0,61	0,57	-3,24	5,38

caso, o F_{calc} obtido foi de 33,10 e o $F_{3; 12; 0,95}$ foi igual a 3,4903, com um R^2 igual a 89,22%. Desse modo, o teste F foi altamente significativo, confirmando que

o modelo de primeira ordem apresentado na Equação 1 mostrou-se coerente para descrever os resultados através da superfície de resposta.

$$Produtividade\ do\ feijoeiro = 13,41 + 6,32 * NPK + 4,19 * Rhizobium\ tropici + 5,06 (Rhizobium\ tropici * Carvão\ vegetal)$$

Equação 1

⁹ pH: 5,80. Fração - argila: 50%; silte: 12%; areia: 38%; pedregulho: 0%.

3.3. Nodulação de Raiz

Na Tabela 4 é apresentada a estimativa dos efeitos e para a nodulação de raiz. A análise dos dados mostra que foram significativos o termo linear para carvão vegetal e termo quadrático para NPK. O F_{calc} obtido foi igual a 6,5 enquanto o $F_{t2; 13; 0,95}$ foi igual a 3,8056. Por outro lado, o R^2 foi igual a 74,04%. Apesar de não ter apresentado alta significância, o valor de F_{calc} foi maior que o de F_t mostrando que o modelo de primeira ordem apresentado na Equação 2 mostrou-se satisfatório para descrever os resultados através da superfície de resposta.

3.4. pH do solo

Na Tabela 5 é apresentada a estimativa dos efeitos para o pH das parcelas experimentais. Nessa mesma tabela, observa-se que foram significativos os termos

lineares e quadráticos para NPK e carvão vegetal. O F_{calc} obtido foi igual a 99,7 enquanto o $F_{t4; 11; 0,95}$ foi igual a 3,3567. Já o R^2 foi igual a 97,32%. Portanto, o teste F foi altamente significativo, mostrando que o modelo de segunda ordem apresentado na Equação 3 mostrou-se claramente adequado para descrever os resultados através da superfície de resposta.

4. DISCUSSÃO

4.1. Matriz Experimental

A análise dos dados da Tabela 2, mostra que a maior produtividade do feijoeiro foi obtida no ensaio 8, onde os níveis dos fatores estavam fixados em +1. Contudo, apesar do referido experimento ter apresentado produtividade superior às demais parcelas experimentais, a demanda da dose de NPK para alcançar tal rendimento mostra-se dispendiosa, já que foi aplicada uma dose

Tabela 4 - Estimativa dos efeitos do Delineamento Central Composto Rotacional para a nodulação de raiz

Variáveis	Coef.de regressão	Erro padrão	t(6)	p-valor	Lim. de conf. -95%	Lim. de conf. + 95%
Média	30,00	43,18	0,69	0,51	-75,66	135,67
(1)Carvão vegetal (L)	87,98	34,69	2,54	0,04	3,10	172,86
Carvão vegetal (Q)	47,12	45,52	1,04	0,34	-64,27	158,51
(2)NPK 4:30:16 (L)	10,82	33,66	0,32	0,76	-71,54	93,18
NPK 4:30:16 (Q)	127,01	40,49	3,14	0,02	27,93	226,10
(3) <i>R.tropicum</i> (L)	2,46	33,66	0,07	0,94	-79,90	84,82
<i>R.tropicum</i> (Q)	55,01	40,49	1,36	0,22	-44,07	154,10
1 L x 2 L	-27,50	43,81	-0,63	0,55	-134,71	79,71
1L x 3 L	0,00	43,81	0,00	1,00	-107,21	107,21
2 L x 3 L	-12,50	43,81	-0,29	0,79	-119,71	94,71

$$\text{Nodulação de raiz} = 87,98 * \text{carvão vegetal} + 127,01 * \text{NPK}^2$$

Equação 2

Tabela 5 - Coeficientes de regressão do Delineamento Central Composto Rotacional para o pH das parcelas experimentais

Variáveis	Coef.de regressão	Erro padrão	t(6)	p-valor	Lim. de conf. -95%	Lim. de conf. + 95%
Média	5,41	0,10	54,01	0,00	5,17	5,66
(1)Carvão vegetal (L)	0,95	0,08	11,81	0,00	0,75	1,15
Carvão vegetal (Q)	0,47	0,11	4,41	0,00	0,21	0,72
(2)NPK 4:30:16 (L)	-0,35	0,08	-4,44	0,00	-0,54	-0,16
NPK 4:30:16 (Q)	0,57	0,09	6,05	0,00	0,34	0,80
(3) <i>R.tropicum</i> (L)	-0,06	0,08	-0,81	0,45	-0,25	0,13
<i>R.tropicum</i> (Q)	0,13	0,09	1,41	0,21	-0,10	0,36
1 L x 2 L	-0,25	0,10	-2,41	0,05	-0,49	0,00
1L x 3 L	0,12	0,10	1,18	0,28	-0,13	0,37
2 L x 3 L	-0,02	0,10	-0,15	0,89	-0,26	0,23

$$\text{pH das parcelas experimentais} = 5,41 + 0,95 * \text{carvão vegetal} + 0,47 * \text{carvão vegetal}^2 - 0,35 * \text{NPK} + 0,57 * \text{NPK}^2$$

Equação 3



superior à quantidade recomendada pela literatura especializada, que é de 500 Kg ha⁻¹. Nesse caso, tratando-se de aplicação prática, mesmo considerando a maior produtividade, o incremento de 28% da adubação mineral poderia comprometer a viabilidade econômica. Adicionalmente, considerando a atual crise energética enfrentada pela população mundial e a alta demanda de energia despendida para a produção de fertilizante mineral, o incremento na dose de aplicação de tal produto torna-se uma justificativa bastante frágil. Ainda, a aplicabilidade em termos práticos de carvão vegetal a 12,5% m/m e de *R.tropici* a 800 Kg 50 Kg⁻¹ semente de feijão também apresentam baixa viabilidade, principalmente, considerando custos operacionais e logísticos.

Dessa forma, apesar dos outros ensaios terem se mostrado com produtividades satisfatórias, como no caso dos experimentos identificados por 2, 7 e 12, considera-se que o rendimento obtido nas parcelas experimentais dos pontos centrais apresentou maior eficiência em relação aos recursos/produtividade. Assim, mesmo que os ensaios 15 e 16 tenham apresentado, respectivamente, produtividade 35 e 24% menor que o rendimento obtido no ensaio 8 (produtividade máxima), as doses de NPK e *R.tropici* seguem aquelas sugeridas pela literatura especializada, bem como a dose de carvão vegetal a ser empregada torna-se mais tangível para aplicação em campo.

Contudo, considerando que o pH ideal para o cultivo de feijoeiro comum situa-se entre 5,8 e 6,2 sugere-se que a correção do pH para o intervalo recomendado pudesse contribuir para incrementar a produtividade do cultivar utilizado em tal estudo (EMBRAPA, 2005). Isso porque, a mudança no valor desse último parâmetro é responsável por alterar a disponibilidade de nutrientes para a planta. Em se tratando especialmente do uso do biocarvão, tal fato encontra íntima relação com as características do produto gerado. Em função dos parâmetros de pirólise aplicados e fonte de matéria-prima, o biocarvão pode apresentar maior caráter ácido ou alcalino, influenciando diretamente na sua capacidade de alterar o pH do solo quando adicionado ao mesmo.

Nesse contexto, alguns relatos na literatura corroboram com o que foi anteriormente exposto. Crombie *et al.*, 2015 analisaram a influência das diferentes faixas e rampa de temperaturas aplicadas, além dos tipos de matérias primas, na característica condicionadora de

solo do biocarvão produzido. Desse modo, a elevação da temperatura apresentou correlação positiva com o aumento do valor de pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e fração carbônica recalcitrante. Por outro lado, a adoção de temperaturas mais baixas mostrou íntima relação com a maior disponibilidade da fração lábil do biocarvão. Experimento semelhante foi feito por Luo *et al.*, 2015. Entretanto, nesse caso, os referidos pesquisadores observaram a influência da atmosfera (ausência ou presença de gás nitrogênio) nas propriedades funcionais do biocarvão obtido. As principais percepções desse experimento foi o fato de que além da faixa de temperatura aplicada e do tipo de matéria prima, a atmosfera de produção do biocarvão apresenta influência direta na qualidade do produto. Ainda, Zhang *et al.*, 2015 observaram que faixas de temperaturas mais elevadas são capazes de influenciar diretamente a porosidade e o nível de estruturas aromáticas do biocarvão.

Todavia, apesar das diferenças encontradas nos estudos aqui mencionados, o fato é que existe um ponto de convergência entre todos eles: a clara perspectiva de que é necessário “construir” um determinado tipo de biocarvão que seja adequado para cada contexto/situação a qual o mesmo está destinado a desempenhar suporte.

4.2. Produtividade do Feijoeiro

A produtividade do feijoeiro foi diretamente influenciada pela adição de NPK e *R.tropici* ao solo. Além disso, a interação entre o carvão vegetal e o fertilizante mineral foi positiva, evidenciando que a imobilização de carvão ao solo reduz a taxa de lixiviação de NPK, tornando mais eficiente o papel desempenhado por tal aditivo na produtividade do cultivar. Tal fato pode ser explicado pelo enriquecimento de matéria orgânica ao solo promovido pela adição de carvão. Assim, considerando que do ponto de vista físico a matéria orgânica desempenha o papel de agente estruturador do solo, favorecendo a formação de macro e microporos em seu interior, a eficiência de percolação do NPK na estrutura porosa é otimizada, obtendo-se assim uma relação sinérgica entre o carvão e o NPK (Chen *et al.*, 2014). Adicionalmente, considerando que o *R.tropici* é promotor da fixação biológica de nitrogênio, sugere-se que a sua atividade promoveu uma disponibilização adicional de nitrogênio para a planta, aumentando assim, o rendimento obtido para a cultura do feijoeiro.

No que diz respeito a avaliação entre NPK e biocarvão, na literatura são descritos alguns estudos. Albuquerque *et al.*, 2015 testaram simultaneamente a adição de biocarvão com a fertilização sintética em solo calcário (pobre em concentrações de ferro e fósforo) na região do Mediterrâneo. Dentre os resultados obtidos, a adição de biocarvão aumentou o rendimento da biomassa de sorgo produzida em 42% quando comparado a fertilização individual com fósforo. Por outro lado, Mete *et al.*, 2015 testaram a aplicação conjunta de NPK e biocarvão em um solo de caráter alcalino no cultivo de soja. Resultados mostraram que aplicação simultânea de ambos os produtos elevou, em média, o rendimento na produção de biomassa e sementes em 361% e 391%, respectivamente. A obtenção desse rendimento quando comparado à fertilização individual por NPK e biocarvão mostrou um claro efeito sinérgico entre ambos os recursos. Dong *et al.*, 2014 realizaram um experimento por um período de dois anos com a aplicação conjunta de biocarvão e ureia como fonte de nitrogênio em arrozais. Resultados mostraram que a aplicação de biocarvão mostrou-se fortemente promissora para aumentar a retenção de nitrogênio no solo, impactando diretamente na produtividade do cultivar.

Dessa forma, fica claro que o biocarvão apresenta inúmeras aplicabilidades em potencial como tecnologia promissora para conferir suporte ao desenvolvimento sustentável. Contudo, ainda resta muitas lacunas a serem exploradas com relação a essa temática. Dentre as mais importantes e como destacado por Jeffery *et al.*, 2013 está a padronização dos métodos empregados, a adoção de controles adequados e a escolha de delineamentos experimentais robustos. Além disso, partindo de estudos baseados em meta-análises, o sucesso dos experimentos com biocarvão estão diretamente relacionados às condições experimentais (Bierdeman & Harpole, 2013; Liu *et al.*, 2013).

4.3. Nodulação de Raiz

A nodulação de raiz apresentou significância estatística para a suplementação de carvão vegetal e NPK ao solo. Por outro lado, a adição de *R. tropicum* ao solo não apresentou significância estatística para incrementar o número de nódulos por planta. Sugere-se que isso ocorreu pelo fato de que bactérias fixadoras de nitrogênio são encontradas livremente nos solos, embora só desempenhem a atividade de fixação de nitrogênio atmosférico quando em associação com

leguminosas (Pérez-Ramírez, 1998). Desse modo, é provável que o solo coletado para a estruturação do experimento em questão já apresentava bactérias fixadoras de nitrogênio em concentração suficiente para promover a colonização e nodulação de raiz do feijoeiro.

Em se tratando do carvão vegetal, acredita-se que o mesmo apresentou significância estatística em função de sua estrutura altamente porosa e disponibilização de nutrientes no solo. Ambas as características são capazes de estimular a atividade microbiana do solo (Nielsen *et al.*, 2014). Assim, serve como estímulo à colonização, ao considerar a maior disponibilidade de área superficial e diversidade no tamanho de poros para o estabelecimento de diferentes habitats e microbiomas. Adicionalmente, embora em curto prazo, a fração lábil do carvão pode ser revertida em suplementação adicional de nutrientes no solo, favorecendo também o desenvolvimento da população microbiana (Domene *et al.*, 2015).

Na literatura, alguns estudos semelhantes podem ser comparados com os resultados aqui obtidos. Assim, Vanek & Lehmann (2014) investigaram a interação entre micorrizas arbusculares e o biocarvão na disponibilidade de fósforo no cultivo do feijoeiro. A suplementação de biocarvão foi capaz de estimular as micorrizas arbusculares em 6%. Por consequência, observou-se também um aumento na concentração de fósforo solúvel disponível para a planta. Quilliam *et al.*, 2013 desenvolveram um experimento de longo prazo (36 meses) para verificarem a influência da aplicação de biocarvão na nodulação de raiz de trevo. Resultados mostraram que o número e o tamanho dos nódulos não foram alterados em função da aplicação de biocarvão. Entretanto, o nível da atividade de nitrogenase em cada nódulo foi bem superior quando comparado aos nódulos obtidos em solo não tratado com biocarvão. Güereña *et al.*, 2015 mostrou resultados promissores do uso do biocarvão no cultivo do feijoeiro comum. Assim, quando comparado ao controle, a aplicação de biocarvão alterou em média, 262% a produção de biomassa da parte aérea, 164% a biomassa radicular e 3575% a biomassa de nódulos. Dessa forma, foi possível demonstrar claramente que o biocarvão apresenta promissora aplicação para melhorar a taxa de fixação biológica de nitrogênio. Prendergast-Miller *et al.*, 2014 observaram que o tamanho da rizosfera foi maior em solo tratado com biocarvão, revelando assim, uma significativa



interação entre biocarvão-raiz. Ainda, de acordo com aqueles autores, essa interação foi capaz de favorecer a disponibilidade de nutrientes para a planta.

Em relação à suplementação artificial de nitrogênio ao solo, esperava-se que o mesmo pudesse suprimir a fixação biológica de nitrogênio pelas bactérias nitrificantes. Contudo, a significância estatística de tal fator sugere que a adição de nitrogênio exógeno estimulou a atividade de tais bactérias. Dessa forma, considerando que para cultivos *in vitro* de linhagens de *Rhizobium* o mesmo deve ser continuamente suplementado com fontes de nitrogênio, é provável que nesse experimento, a adição de nitrogênio serviu como fator complementar favorecendo a inicialização da cultura (EMBRAPA, 1994). Deste modo, em um primeiro momento, as bactérias podem ter utilizado o nitrogênio fornecido pelo NPK, porém, após o estabelecimento da comunidade microbiana, a fixação de nitrogênio pôde ser realizada autonomamente. Portanto, a adição de carvão ao solo simultaneamente à adição de NPK foi capaz de favorecer positivamente a nodulação de raiz influenciando na produtividade.

4.4. pH do solo

O pH dos vasos experimentais apresentou significância estatística para carvão vegetal e NPK. Em se tratando do NPK, supõe-se que o mesmo afetou o pH do solo em função da protonação e desprotonação dos grupamentos aminos do fertilizante. Tal comportamento deve estar relacionado às características particulares de cada solo e as cargas predominantes no mesmo.

Por outro lado, o fato do carvão vegetal ter apresentado termo estatisticamente significativo, reforça o fato de que a adição de carvão ao solo é importante para elevar o pH. Dessa forma, adicionar matéria carbonizada ao solo reduz a demanda de calcário para calagem, tornando possível a correção de solos ácidos, possivelmente, com maior viabilidade econômica (Gul *et al.*, 2015). Ainda, considerando que o solo empregado para a condução do experimento é tido como Latossolo vermelho de textura argilosa, a correção do pH desse tipo de solo é de fundamental importância, já que o mesmo geralmente apresenta alta acidez, sendo que essa última característica, o torna potencialmente insalubre para diferentes cultivares devido a maior disponibilidade do alumínio, metal responsável por toxidez em plantas (Kochian, 1995).

Na literatura são descritos inúmeros estudos que relatam a alteração de pH do solo pela suplementação de biocarvão. Smebye *et al.*, 2016 mostraram que a aplicação de uma dose de carvão a 10% m/m. foi capaz de alterar o pH do solo em 15 vezes. Isto é, o valor de pH do referido solo passou de 4,9 para 8,7. Dai *et al.*, 2014 inferiram que a aplicação de biocarvão ao solo além de alterar o valor de pH, é capaz de aumentar a faixa de tamponamento do solo. Contudo, como destacado pelos referidos autores, a obtenção desses benefícios é dependente do tipo de solo e do biocarvão, bem como taxa de aplicação (Castellini *et al.*, 2015).

5. CONCLUSÃO

A avaliação entre carvão vegetal, fertilização mineral (NPK 4:30:16) e inoculante biológico (*R.tropici*) mostraram que a interação entre esses fatores foi capaz de estimular a nodulação de raiz, contribuindo para a fixação biológica de nutrientes, além de elevar o pH do solo. Dessa forma, observou-se um incremento na produtividade do feijoeiro comum, sinalizando a importância de estudos que tornem possível a avaliação sistêmica da suplementação de carvão ao solo aliadas a técnicas tradicionais de fertilização convencional para otimizar os ganhos agrícolas.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Fundo Nacional de Desenvolvimento (FNDE) pelas bolsas concedidas aos alunos vinculados ao Programa de Educação Tutorial Tecnologias para a Sustentabilidade (PET BioSus), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio financeiro e à M.^a Katialaine Corrêa de Araújo pelas sugestões dadas para a estruturação do texto.

7. LITERATURA CITADA

- ALBURQUERQUE, J.A., CABELLO, M., AVELINO, R., BARRÓN, V., CAMPILLO, M.C., TORRENT, J. Plant growth responses to biochar amendment of Mediterranean soils deficient in iron and phosphorus. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, v. 178, p. 567–575, 2015.
- BIEDERMAN, L. A., STANLEY HARPOLE, W., 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. **GCB Bioenergy.**, v. 5, p. 202–214, 2013. doi:10.1111/gcbb.12037

- CASTELLINI, M., GIGLIO, L., NIEDDA, M., PALUMBO, A.D., VENTRELLA, D. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. **Soil Tillage Res.**, v. 154, p. 1–13, 2015. doi:10.1016/j.still.2015.06.016
- CHEN, C.-P., CHENG, C.-H., HUANG, Y.-H., CHEN, C.-T., LAI, C.-M., MENYAILO, O. V., FAN, L.-J., YANG, Y.-W. Converting leguminous green manure into biochar: changes in chemical composition and C and N mineralization. **Geoderma**, v. 232-234, p. 581–588, 2014. doi:10.1016/j.geoderma.2014.06.021
- CROMBIE, K., MAŠEK, O., CROSS, A., SOHI, S. Biochar - synergies and trade-offs between soil enhancing properties and C sequestration potential. **GCB Bioenergy**, v. 7, p. 1161–1175, 2015. doi:10.1111/gcbb.12213
- DAI, Z., WANG, Y., MUHAMMAD, N., YU, X., XIAO, K., MENG, J., LIU, X., XU, J., BROOKES, P.C. The effects and mechanisms of soil acidity changes, following incorporation of biochars in three soils differing in initial pH. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 78, p. 1606–1614, 2014. doi:10.2136/sssaj2013.08.0340
- DOMENE, X., HANLEY, K., ENDERS, A., LEHMANN, J. Short-term mesofauna responses to soil additions of corn stover biochar and the role of microbial biomass. **Appl. Soil Ecol.**, v. 89, p. 10–17, 2015. doi:10.1016/j.apsoil.2014.12.005
- DONG, D., FENG, Q., MCGROUTHER, K., YANG, M., WANG, H., WU, W. Effects of biochar amendment on rice growth and nitrogen retention in a waterlogged paddy field. **J. Soils Sediments**, v. 15, p. 153–162, 2014. doi:10.1007/s11368-014-0984-3
- EMBRAPA - Arroz e Feijão. **Manual de Métodos Empregados em Estudos de Microbiologia Agrícola**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1994. 542p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 46). In: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00060840.pdf> (acessado em 11 de agosto de 2016).
- EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1). In: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wt.rpdf (acessado em 11 de agosto de 2016).
- EMBRAPA - Arroz e Feijão. **Cultivo do Feijoeiro Comum**. Sistemas de Produção, 2. Versão Eletrônica. 2003. In: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro/fbnitrogenio.htm> (acessado em 11 de agosto de 2016).
- EMBRAPA Rondônia. **Cultivo do Feijão Comum em Rondônia**. Sistemas de Produção, 2. Versão Eletrônica. 2005. In: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijaoComumRO/clima.htm> (acessado em 11 de agosto de 2016).
- GÜEREÑA, D.T., LEHMANN, J., THIES, J.E., ENDERS, A., KARANJA, N., NEUFELDT, H. Partitioning the contributions of biochar properties to enhanced biological nitrogen fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris*). **Biol. Fertil. Soils**, v. 51, p. 479–491, 2015. doi:10.1007/s00374-014-0990-z
- GUL, S., WHALEN, J.K., THOMAS, B.W., SACHDEVA, V., DENG, H. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. **Agric. Ecosyst. Environ.**, v. 206, p. 46–59, 2015. doi:10.1016/j.agee.2015.03.015
- INMET. **Faixa Normal da Precipitação Trimestral**. 2015. In: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/faixaNormalPrecipitacaoTrimestral> (acessado em 11 de agosto de 2016).
- JEFFERY, S., BEZEMER, T.M., CORNELISSEN, G., KUYPER, T.W., LEHMANN, J., MOMMER, L., SOHI, S.P., VAN DE VOORDE, T.F.J., WARDLE, D. A., VAN GROENIGEN, J.W. The way forward in biochar research: Targeting trade-offs between the potential wins. **GCB Bioenergy**, v.7, p. 1–13, 2013. doi:10.1111/gcbb.12132



- KOCHIAN, L. V. Cellular Mechanisms of Aluminum Toxicity and Resistance in Plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, v. 46, p. 237–260, 1995.
- LEHMANN, J., JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. New York: Routledge. 2ª edição. 976p. 2015.
- LIU, X., ZHANG, A., JI, C., JOSEPH, S., BIAN, R., LI, L., PAN, G., PAZ-FERREIRO, J., 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant Soil*, v. 373, p. 583–594, 2013. doi:10.1007/s11104-013-1806-x
- LONE, A.H., NAJAR, G.R., GANIE, M.A., SOFI, J.A., ALI, T. Biochar for Sustainable Soil Health: A Review of Prospects and Concerns. *Pedosphere*, v. 25, p. 639–653, 2015. doi:10.1016/S1002-0160(15)30045-X
- LUO, L., XU, C., CHEN, Z., ZHANG, S., 2015. Properties of biomass-derived biochars: Combined effects of operating conditions and biomass types. *Bioresour. Technol.*, v. 192, p. 83–9, 2015. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.054
- METE, F.Z., MIA, S., DIJKSTRA, F.A., ABUYUSUF, M., HOSSAIN, A.S.M.I. Synergistic Effects of Biochar and NPK Fertilizer on Soybean Yield in an Alkaline Soil. *Pedosphere*, v. 25, p. 713–719, 2015. doi:10.1016/S1002-0160(15)30052-7
- NIELSEN, S., MINCHIN, T., KIMBER, S., VAN ZWIETEN, L., GILBERT, J., MUNROE, P., JOSEPH, S., THOMAS, T. Comparative analysis of the microbial communities in agricultural soil amended with enhanced biochars or traditional fertilisers. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v. 191, p. 73–82, 2014. doi:10.1016/j.agee.2014.04.006
- NOVAK, J., RO, K., OK, Y.S., SIGUA, G., SPOKAS, K., UCHIMIYA, S., BOLAN, N. Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors. *Chemosphere*, v. 142, p. 1–3, 2015.
- PÉREZ-RAMÍREZ, N. Seeds of *Phaseolus vulgaris* bean carry *Rhizobium etli*. *FEMS Microbiol. Ecol.*, v. 26, p. 289–296, 1998. doi:10.1016/S0168-6496(98)00043-9
- PRENDERGAST-MILLER, M.T., DUVALL, M., SOHI, S.P. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *Eur. J. Soil Sci.*, v. 65, p. 173–185, 2014. doi:10.1111/ejss.12079
- QUILLIAM, R.S., DELUCA, T.H., JONES, D.L. Biochar application reduces nodulation but increases nitrogenase activity in clover. *Plant Soil*, v. 366, p. 83–92, 2013.
- SHARMA, A.; PAREEKA, V.; ZHANG, D. Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, v. 50, p. 1081–1096, 2015.
- SMEBYE, A., ALLING, V., VOGT, R.D., GADMAR, T.C., MULDER, J., CORNELISSEN, G., HALE, S.E. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition. *Chemosphere*, v. 142, p. 100–5, 2016.
- VANEK, S.J., LEHMANN, J. Phosphorus availability to beans via interactions between mycorrhizas and biochar. *Plant Soil*, v. 395, p. 105–123, 2014.
- ZHANG, J., LIU, J., LIU, R. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate. *Bioresour. Technol.*, 176, p. 288–91, 2015. doi:10.1016/j.biortech.2014.11.011

Recebido para publicação em 27/9/2016 e aprovado em 20/12/2016.

