



IGOR DE OLIVEIRA PAIVA

**NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO MILHO EM FUNÇÃO DO
SUPRIMENTO DE NITROGÊNIO POR BIOCARVÃO E
NITRATO DE AMÔNIO**

**LAVRAS - MG
2023**

IGOR DE OLIVEIRA PAIVA

**NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO MILHO EM FUNÇÃO DO SUPRIMENTO DE
NITROGÊNIO POR BIOCARVÃO E NITRATO DE AMÔNIO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

Dr. Carlos Alberto Silva
Orientador

Dr. Everton Geraldo de Morais
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

IGOR DE OLIVEIRA PAIVA

**NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO MILHO EM FUNÇÃO DO SUPRIMENTO DE
NITROGÊNIO POR BIOCARVÃO E NITRATO DE AMÔNIO**

**CORN NUTRITION AND GROWTH AS AFFECTED BY THE NITROGEN SUPPLY
BY BIOCHAR AND AMMONIUM NITRATE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em: 16 de março de 2023

Dr. Carlos Alberto Silva DCS/UFLA

Dr. Otacilio José Passos Rangel CCA/IFES

Dr. Everton Geraldo de Moraes DCS/UFLA

Dr. Carlos Alberto Silva
Orientador

Dr. Everton Geraldo de Moraes
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTO

Primeiramente, a Deus pela vida, proteção, oportunidade, por estar sempre ao meu lado me colocando na direção certa e me dando forças em todos os momentos dessa jornada.

A meu pai, Mauricio, por ser minha inspiração acadêmica e minha mãe, Léa, por ser colo e carinho em todos os momentos que precisei. E por juntos serem meu exemplo pessoal de humildade e dedicação, despertando em mim o desejo de ser uma pessoa melhor. Um alicerce durante toda a minha vida, às quais não há como expressar o amor, respeito, carinho e admiração que sinto por eles. **ESSA CONQUISTA É NOSSA!**

A minha namorada, Ana, por ter sempre me apoiado, incentivado, por acreditar e apostar em mim e nas minhas conquistas. Agradeço pela paciência e pelo amor incondicional vivido ao decorrer desses seis longos e difíceis anos para nós, por toda a cumplicidade, companheirismo, amizade, apoio e conversas de incentivo, uma pessoa que sempre me fez crescer profissionalmente e pessoalmente. Espero que esse ciclo que se encerra represente o início de um novo ciclo para nós. **ESSA CONQUISTA É NOSSA!**

Ao meu orientador, Professor Carlos Alberto Silva, pela receptibilidade, dedicação, aprendizado, sugestões e as valiosas lições transmitidas ao decorrer dos dois anos de parceria de pesquisa.

Em especial, agradeço também ao Coorientador, tutor e amigo, Dr. Everton Geraldo de Moraes, pela parceria e ajuda nos experimentos, por todo direcionamento, ensinamentos, sugestões, críticas, companheirismo e conversas de motivação, desde o início de minha participação no laboratório.

Aos meus amigos do Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica do Solo (LE MOS), Bruno, Marina, Loren e Gabrielly, pelo companheirismo e conversas.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (303899/2015-8 e 307447/ 2019-7), e à FAPEMIG pelo apoio financeiro e bolsas concedidas.

À UFLA, e aos professores e funcionários Departamento de Ciência do Solo, em especial, Geila e Mariene, por toda a contribuição e ajuda para realização deste trabalho. Obrigada por tanto! Tenho orgulho de ser UFLA!

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica e sempre torceram pelo meu sucesso profissional.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O milho é um dos principais produtos da agricultura brasileira, sendo o nitrogênio (N) o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura. Grande parte dos fertilizantes nitrogenados utilizados no Brasil é importado e apresentam alto valor, o que onera o custo de produção com a adubação. Anualmente, o Brasil gera grande quantidade de resíduos orgânicos que, normalmente, são descartados em lixões e aterros. Se processados adequadamente, esses resíduos poderiam ser utilizados como fonte de N para as culturas. Para serem utilizados como fertilizantes, os resíduos orgânicos precisam ser processados, estabilizados quimicamente e, biologicamente, sanitizados. A pirólise e a produção de biocarvão podem ser utilizadas para esse fim. O uso de biocarvão interfere no ciclo do N, na magnitude dos processos de imobilização/mineralização de N, que depende do tipo de solo, nas propriedades físico-químicas e no teor e natureza química da matéria orgânica do solo (MO). Objetivou-se avaliar a combinação ou não de biocarvões com N-fertilizante mineral no suprimento de N ao milho, analisando ainda à influência da biomassa que deu origem ao biocarvão sobre as formas de N no biocarvão. O estudo foi conduzido em casa de vegetação, cultivando plantas de milho em Latossolos contrastantes quanto à textura e teores de MO. Plantas de milho foram cultivadas em tratamentos que consistiram de quatro biomassas misturadas ao solo sem a adição de N-fertilizante e seus respectivos biocarvões combinados ou não com 300 mg kg^{-1} de N na forma de nitrato de amônio. Foram utilizadas as seguintes biomassas: bambu, torta de girassol, esterco de galinha e casca de camarão. Na produção de biocarvões as biomassas citadas foram pirolisadas a $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Os teores de N prontamente disponíveis na solução do solo são elevados, superando o nível crítico ($80 - 160 \text{ mg kg}^{-1}$) para o pleno crescimento do milho. O tipo de solo determina a forma de N mineral que irá prevalecer na solução, portanto, controla a taxa de nitrificação, ou a magnitude do processo de imobilização de N-amônio. Os biocarvões exercem, do mesmo modo, efeito sobre a taxa de nitrificação. A disponibilidade de N mineral no solo determina maior acúmulo de N nas plantas de milho, mas isso não influencia o crescimento e a produção de biomassa do milho. A produção de biomassa de milho é influenciada pelo tipo de solo e pela capacidade da MO nativa em liberar N para as plantas. No Latossolo vermelho distroférico, o uso conjugado de N mineral (300 mg kg^{-1}) e de biocarvões de bambu e de torta de girassol assegurou o maior crescimento do milho. Em geral, o N mineral residual é relativamente baixo no solo após o cultivo do milho, insuficiente para suprir a demanda nutricional de outra cultura plantada em sucessão.

Palavras-chave: N mineral, interação solo-biocarvão, imobilização/mobilização de N, matéria orgânica do solo, solução do solo, *Zea mays* L..

ABSTRACT

Corn is one of the main products of Brazilian agriculture, with nitrogen (N) being the nutrient required in the greatest quantity by the crop. A large part of the nitrogen fertilizers used in Brazil is imported and has a high cost, which burdens the production cost with fertilization. Annually, Brazil generates a large amount of organic waste that is typically discarded in landfills. If properly processed, these wastes could be used as a source of N for crops. To be used as fertilizers, organic wastes need to be processed, chemically stabilized, and biologically sanitized. Pyrolysis and biochar production can be used for this purpose. The use of biochar affects the N cycle, the magnitude of N immobilization/mineralization processes, which depends on soil type, physical-chemical properties, and the content and chemical nature of soil organic matter (SOM). The objective of this study was to evaluate the combination or not of biochars with mineral N-fertilizer in supplying N to corn, analyzing the influence of the biomass that gave rise to the biochar on the forms of N in the biochar. The study was conducted in a greenhouse, growing corn plants in contrasting Latosols regarding texture and SOM content. Corn plants were grown in treatments consisting of four biomasses mixed with soil without the addition of N-fertilizer and their respective biochars combined or not with 300 mg kg⁻¹ of N in the form of ammonium nitrate. The following biomasses were used: bamboo, sunflower cake, chicken manure, and shrimp shell. In the biochar production, the mentioned biomasses were pyrolyzed at 300 °C. The readily available N levels in the soil solution are high, surpassing the critical level (80-160 mg kg⁻¹) for full corn growth. The type of soil determines the mineral form of N that will prevail in the solution, thus controlling the rate of nitrification, or the magnitude of the process of immobilization of ammonium N. Biochars also have an effect on the rate of nitrification. The availability of mineral N in the soil determines a greater accumulation of N in corn plants, but this does not influence the growth and biomass production of corn. Corn biomass production is influenced by soil type and the capacity of native SOM to release N to plants. In the dystroferric red Latosol, the combined use of mineral N (300 mg kg⁻¹) and bamboo and sunflower cake biochars ensured the greatest corn growth. In general, the residual mineral N is relatively low in the soil after corn cultivation, insufficient to meet the nutritional demand of another crop planted in succession.

Keywords: Mineral N, Soil-biochar interaction, N immobilization/mineralization, soil organic matter, N in soil solution, *Zea mays* L..

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de pH, condutividade elétrica (CE), teores totais de C e de N, N-amônio e N-nitrato nos biocarvões produzidos a 300 °C e nas biomassas que lhes deram origem.....	29
Tabela 2. Atributos físico-químicos e textura dos Latossolos cultivados com milho, antes da correção da acidez do solo.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral em Latossolo Vermelho distroférico cultivado com milho.....	34
Figura 2. Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral em Latossolo com textura média cultivado com milho.....	35
Figura 3. Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral na solução do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com milho.....	37
Figura 4. Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral na solução do Latossolo com textura média cultivado com milho.....	38
Figura 5. Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre o acúmulo de N na parte aérea (a) e a matéria seca total (parte aérea + raiz) (b) de plantas de milho cultivadas em Latossolos contrastantes.....	40
Figura 6. Matriz de correlação de Pearson dos resultados gerados do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com milho.....	41
Figura 7. Matriz de correlação de Pearson dos resultados gerados do Latossolo com textura média cultivado com milho.....	42

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE.....	9
1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	10
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1.	Cultura do milho (<i>Zea mays</i>).....	13
2.2.	Relação Nitrogênio x Planta x Solo.....	14
2.3.	Biocarvão na agricultura.....	15
	REFERÊNCIAS.....	17
	SEGUNDA PARTE - ARTIGO.....	24
	Artigo I - NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO MILHO EM FUNÇÃO DO SUPRIMENTO DE NITROGÊNIO POR BIOCARVÃO E FERTILIZANTE MINERAL.....	25
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho é uma das principais commodities agrícolas brasileiras. O cultivo do milho é realizado em regiões onde predominam os Latossolos que apresentam alta acidez, teores elevados de Al tóxico, alta capacidade de fixar fósforo e baixos a médios teores de matéria orgânica, que regula, em partes, o estoque de nitrogênio (N) total e a capacidade natural do solo em suprir N mineralizável às plantas (RAIJ, 1991; RAIJ et al., 1996; AMADO et al., 2002). O N é o nutriente exigido em maior quantidade pelo milho, exercendo influência direta sobre a produtividade de grãos (SIMS et al., 1998). Grande parte dos fertilizantes nitrogenados utilizados nos cultivos brasileiros é importado e apresentam alto valor, o que onera o custo de produção com a adubação. (SILVA, 2008).

Em 2019, o Brasil gerou cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo que, aproximadamente, 45% desse valor são representados pelos resíduos orgânicos oriundos de diversas atividades agrícolas, industriais e urbanas, os o restante (55%) é representado pelos metais, vidros, plásticos, papel, papelão, entre outros (ABRELPE, 2020). Em sua maioria, esses resíduos poderiam ser utilizados na indústria de insumos agrícolas ou diretamente nas lavouras, como meio de reduzir a dependência de fertilizantes importados. Porém, no Brasil, grande parte dos resíduos orgânicos que contêm N e que podem ser utilizados para nutrir as culturas é descartado em lixões e aterros, com perda de energia, nutrientes e compostos orgânicos que poderiam melhorar a nutrição e aumentar a produtividade das culturas (MUCELIN & BELLINI, 2008). Desse modo, o reaproveitamento de palhadas e de biomassas remanescentes da agroindústria e de resíduos da pós-colheita, são fundamentais para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados que oneram o custo de produção, promovendo a sustentabilidade da produção agrícola (IPEA, 2012).

Nos esterços, resíduos vegetais e em subprodutos do processamento de peixes e de frutos do mar, assim como no solo, o N predomina na forma orgânica, sendo reduzida a disponibilidade de N mineral – amônio ($N-NH_4^+$) e nitrato ($N-NO_3^-$) (SILVA, 2008). Para ser aproveitado pelas plantas, o N orgânico precisa ser mineralizado, ou seja, convertido a N mineral, a forma de N que é absorvido pelas plantas (STEVENSON, 1994). A taxa de mineralização de N em matrizes orgânicas é regulada por fatores bióticos e abióticos, notadamente pela atividade dos organismos decompositores, pelas formas de N presentes no resíduo e pelos fatores em solo e ambientais que regulam a atividades da biota (STEVENSON, 1994; PANSU & GAUTHEYROU, 2006).

Antes de serem utilizados como fertilizantes, os resíduos orgânicos precisam ser processados, estabilizados quimicamente e sanitizados (KIEHL, 2004). A compostagem é o processo de tratamento de resíduo mais comumente utilizado no Brasil, mas a pirólise pode ser utilizada para o mesmo fim, de modo mais rápido, com sanitização dos materiais e, infelizmente, com perdas de elementos voláteis, como o N (TRUPIANO et al., 2017). Conceitualmente, o biocarvão é obtido por meio da pirólise de resíduos renováveis, com a carbonização ocorrendo na ausência ou com mínimo suprimento de oxigênio, em temperaturas variando de 300 - 750 °C, com predominância na matriz orgânica de frações de N mais estáveis quimicamente, portando, menos suscetíveis à decomposição (LEHMANN & JOSEPH, 2009). Com a pirólise, há mais N recalcitrante na matriz carbonizada e, dependendo da relação C/N, em vez de mineralização, pode haver imobilização de N, com prejuízo à nutrição do milho cultivado em solos com adição de biocarvão.

No biocarvão, há N tanto na forma mineral quanto na forma de compostos orgânicos (N orgânico), mas, invariavelmente, a pirólise reduz os teores de N na matriz pirolisada, pois, além das perdas de N por volatilização, o N remanescente após a carbonização, dependendo da temperatura de pirólise (>450 °C), tem elevado caráter aromático (compostos aromáticos - N heterocíclico), sendo lentamente mineralizado no solo, devido ao alto custo energético para os microrganismos decompositores em aproveitar o N heterocíclico em matrizes carbonizadas (IPPOLITO et al., 2020; JINDO et al., 2020; ALMENDROS et al., 2003). O N que remanesce no biocarvão é mais estabilizado quimicamente, por isso, menos suscetível à decomposição e à mineralização (SCHELLEKENS et al., 2018). Com isso, as formas de N que prevalecem no biocarvões tendem a ser pouco lábeis com o aumento da temperatura de pirolise, e isso pode implicar em imobilização de N no solo, reduzindo a ação do biocarvão na liberação de N para as culturas (WANG et al., 2012, SCHELLEKENS et al., 2018, ALMENDROS et al., 2003).

O biocarvão regula a dinâmica, formas, disponibilidade e a taxa de diversos processos que liberam ou retém N no sistema solo-planta. Segundo Wang et al. (2012), o balanço dos processos de imobilização/mineralização de N no solo é determinado pelo teor e natureza química do N presente no biocarvão, havendo grande chance de o N disponível no solo ser imobilizado pelos decompositores durante a decomposição do biocarvão, havendo limitações no suprimento de N à cultura que cresce simultaneamente em solo tratado com biocarvão com alta relação C/N. Além disso, o biocarvão interfere no grau de acidez do solo, regula a atividade microbiana, altera as taxas de nitrificação, desnitrificação, volatilização e a velocidade de decomposição da matéria orgânica do solo, por isso, o biocarvão pode regular

vários processos associados ao ciclo do N, determinando, assim, a disponibilidade de N para as culturas (JEFFERY et al., 2011, WANG et al., 2012).

Estudos sobre o efeito que a biomassa (matéria-prima) exerce sobre a natureza química dos compostos nitrogenados, nas propriedades do biocarvão e se o teor e formas de N presentes na biomassa regulam a qualidade final do biocarvão pirolisado, vem sendo realizados. Novotny et al. (2015) afirmam que as propriedades físico-químicas dos biocarvões são diretamente influenciadas pela fonte de matéria-prima e pelas condições de processamento. Figueiredo et al. (2018) destacaram a origem de propriedades distintas dos biocarvões de lodo de esgoto conforme a mudança de temperatura de pirólise, onde pode ser observado a redução da disponibilidade de nutrientes e o aumento no teor de matéria orgânica recalcitrante nos biocarvões produzidos a maiores temperaturas (500 °C). Domingues et al. (2017) complementam que o teor de cinzas encontrados em biocarvões produzidos com esterco de galinha é maior do que em biocarvões derivados de resíduos lenhosos. Os mesmos autores relatam que quanto ao pH é possível observar seu aumento quando os biocarvões são oriundos de biomassas carbonizadas em maiores temperaturas de pirolise. Alguns autores ainda afirmam que pode se observar a redução de compostos que contêm grupos orgânicos funcionais ácidos nas matrizes carbonizadas em altas temperaturas (HOUBEN et al. 2013; SINGH et al. 2010; YUAN et al. 2011). Contudo, informações sobre a influência que as formas de N no biocarvão e na biomassa que lhe deu origem exercem sobre a dinâmica de mineralização-imobilização do N no solo e do teor e natureza química de formas de N remanescente nos biocarvões são escassas e pouco estudadas (WANG et al., 2012). Sabe-se que o conteúdo, a natureza química e os compostos orgânicos nitrogenados presentes nos biocarvões dependem do efeito combinado da matéria-prima e, principalmente, da temperatura de pirólise (LANG et al. 2005; SCHELLEKENS et al. 2018). De acordo com Ippolito et al. (2020), a escolha da matéria-prima vai determinar a concentração de N total do biocarvão em temperaturas baixas (<450 °C), podendo ser maior o teor de N encontrado no biocarvão, de acordo com a seguinte ordem: esterco-esgoto, tortas de filtro e madeira. Dessa forma, é necessário avaliar a capacidade de cada biocarvão em suprir N ao milho, uma cultura muito exigente no nutriente. É importante quantificar o N no biocarvão, identificar as formas nitrogenadas nos biocarvões e avaliar a capacidade de elas serem mineralizadas no solo, para atender a demanda nutricional do milho em N.

As hipóteses que fundamentam este trabalho são: i) os biocarvões influenciam as propriedades químicas e físicas do solo afetando a dinâmica do N no sistema solo-planta. ii) a temperatura de pirolise altera a dinâmica de mineralização-imobilização do N no solo; iii) o

biocarvão regula a relação e a disponibilidade de formas minerais de N (N-NH_4^+ e N-NO_3^-), o que pode interferir na taxa de imobilização ou não de N no solo.

O presente trabalho foi dividido em um capítulo com o título: “Nutrição e crescimento do milho em função do suprimento de nitrogênio por biocarvão e fertilizante mineral”. Neste contexto objetivou-se: i) avaliar a combinação ou não dos biocarvões com N-fertilizante mineral quanto à capacidade em suprir N ao milho; ii) avaliar a influência da biomassa e da condição de pirólise sobre os teores contrastantes, formas e natureza química do N nas matrizes carbonizadas, que afetam no crescimento do milho; iii) avaliar o efeito das propriedades do solo sobre a dinâmica do biocarvão, bem como a influência da biomassa e da temperatura de pirólise sobre as formas de N no biocarvão, as quais controlam a dinâmica de mineralização-imobilização do N na interação solo-biocarvão, no teor e natureza química das formas de N remanescente no solo após o cultivo do milho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cultura do milho (*Zea mays*)

Zea mays, popularmente chamada de milho, é um vegetal pertencente à família das gramíneas (*Poaceae*), constituindo-se como uma das culturas com maior representatividade no Brasil, possuindo o segundo lugar como o grão mais produzido no país (CONAB, 2023). Dentre as teorias de sua origem, acredita-se que tenha sido na América do Norte, precisamente no México, através da evolução do teosinte (*Zea mexicana*) por meio de seleção direta do ser humano (CORRÊA et al., 1998). O milho comum (milho dentado “dent” e duro “flint”) e os milhos especiais, doce e milho-pipoca, estão entre as variedades de maior importância econômica (RANUM et al., 2014).

Sendo uma das principais culturas agrícolas do mundo, o milho apresenta diversas finalidades, podendo ser consumida tanto *in natura* por humanos e animais ou na forma industrializada, atuando como matéria prima para produção de óleos, farinhas, margarina, xarope de glicose entre outros (SILVEIRA et al., 2015). O milho nutricionalmente é composto por aproximadamente 72% de amido, 10% de proteína e 4% de gordura, além de fornecer vitaminas do complexo B e minerais (RANUM et al., 2014).

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo e o segundo maior exportador (FIESP, 2022), sendo este cultivado, geralmente, em dois períodos no ano, denominado de safra e safrinha. Estima-se que para safra de 22/23 seja semeada uma área total de 22.032,1 mil hectares com produtividade média de 5.617,0 kg/ha, totalizando a

produção em 123,7 milhões de toneladas, 9,4% superior à safra anterior. Do volume total produzido, cerca de 38% é destinado a exportação, isso corresponde a 47 milhões de toneladas. O Centro-Oeste é a região do país responsável por produzir, aproximadamente, 63,2 milhões de toneladas de milho, o equivalente a 55% da produção total do país. Dentre os estados do país, o Mato Grosso (MT) é o maior produtor, responsável pela produção de 40.025,1 mil toneladas do grão (37% da produção nacional), seguido pelo Paraná (PR) com produção de 16.096,1 mil toneladas (13,3% da produção nacional) (CONAB, 2022; ETENE, 2022).

O Brasil, apesar de ser um dos três maiores produtores de milho do mundo, não se destaca como sendo um dos países que apresentam as maiores produtividades. Com isso, fica perceptível que o milho é produzido em condições pouco favoráveis ao desenvolvimento pleno da cultura, concentrando-se em uma região de cerrado, onde predominam os solos que apresentam alta acidez, aliada à presença de Al, alta fixação de P e baixos teores de matéria orgânica, que refletem na baixa disponibilidade de N no solo (RAIJ, 1991; RAIJ et al., 1996; AMADO et al., 2002).

2.2. Relação Nitrogênio x Planta x Solo

O N é exigido em altas quantidades pelas plantas em decorrência de sua função estrutural, ou seja, o nutriente faz parte da molécula de compostos orgânicos (aminoácidos e proteínas), atuando como ativador de diversas enzimas (MALAVOLTA, 2006). Além disso, esse nutriente atua na realização de um ou mais processos vitais da planta, sendo estes a síntese de proteína, absorção iônica, fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular (MARSCHNER, 1995; MALAVOLTA, 2006), conferindo as plantas uma coloração mais verde, aumento na folhagem e nos teores de proteínas, rápido crescimento e auxílio aos microrganismos do solo para a decomposição da matéria orgânica (MALAVOLTA, 2006).

Devido a essas características, conforme evidenciado por Araújo et al. (2004), Gomes et al. (2007) e Duete et al. (2008), o N é o nutriente que mais limita a produção do milho, causando maiores efeitos no aumento ou diminuição de produção da cultura. Além de sua grande influência sobre a produtividade, o N ainda causa efeitos em diversas outras características da planta relacionadas ao crescimento e desenvolvimento, como por exemplo, no aumento do peso de mil grãos, do número de espigas por planta, da altura de plantas e do peso de espigas, do comprimento da espiga, do diâmetro do colmo, da produção de matéria seca e do crescimento radicular (FERREIRA et al., 2001; AMARAL FILHO et al., 2005; FERNANDES et al., 2005; ARAÚJO et al., 2004; BÜLL, 1993; MAR et al., 2003; DUETE et

al., 2008), as quais, direta ou indiretamente, afetarão a produtividade final da cultura. Nesse sentido, trata-se de um elemento exigido em grandes quantidades pela cultura do milho, sendo um nutriente que mais atua onerando o custo de produção (DUETE et al., 2011).

No solo, aproximadamente 98% do N apresenta-se na forma orgânica, os outros 2% estão sob formas inorgânicas de amônio (NH_4^+) e/ou nitrato (NO_3^-), prontamente disponíveis (MALAVOLTA, 2006). As formas inorgânicas são originadas a partir da mineralização do N presente no solo durante os cultivos por meio da hidrólise enzimática produzida pela atividade microbiota do solo e/ou oriundo de aplicações com fertilizantes nitrogenados (CORDEIRO e HOEK, 2007).

Conforme Sá (1996), o N presente no solo é fortemente influenciado pelo sistema de manejo, podendo ser verificado em sistemas de plantio direto (SPD) que, na fase inicial de adoção, há maior necessidade de utilização de fertilizantes nitrogenados, decorrente do processo de imobilização pela biomassa microbiana do solo gerada pelo aumento da sua atividade e pelos baixos teores de matéria orgânica presente no solo (MO). Contudo, depois de passados alguns anos, o restabelecimento do equilíbrio das transformações que acontecem no solo é evidenciado, pois, com a ausência de revolvimento e incorporação ao solo, os resíduos culturais são depositados e acumulados na superfície do solo, contribuindo para a diminuição das perdas de MO por erosão e mineralização microbiológica (BEUTLER et al., 2001; AMADO et al., 2002; BAYER et al., 2004). Desta maneira, segundo Prando et al. (2013), para que se tenha uso mais eficiente dos fertilizantes, acarretando em uma maior produtividade nas culturas é, sem dúvida, essencial o conhecimento aplicado em relação as formas de N que serão disponibilizadas ao solo e, bem como, buscar formas de preservar esse nutriente no solo reduzindo suas perdas por volatilização e lixiviação, aumentando seu efeito residual no solo.

2.3. Biocarvão na agricultura

Conceitualmente, o biocarvão é o material sólido obtido por meio do processo de pirólise de resíduos renováveis, no qual a matéria prima (biomassa) passa por degradação termoquímica em altas temperaturas na ausência ou com mínimo suprimento de oxigênio (CHENG et al., 2008; LEHMANN e JOSEPH, 2009). Originalmente, as biomassas que dão origem ao biocarvão são mais instáveis e facilmente decompostas, devido à predominância da matriz orgânica sobre a inorgânica. Com a pirólise, a biomassa passa a ser mais estável e recalcitrante e com menor volume e massa, desse modo, esse processo atua fortemente como uma alternativa para a gestão de resíduos orgânicos. Isso se justifica devido ao fato que,

durante a pirólise, as cadeias de carbono (alifáticas) que predominam no material de origem são condensadas em carbono aromático, proporcionando maior resistência a decomposição química e biológica, permanecendo no solo por longos anos estocando carbono, colaborando com a mitigação do efeito estufa (LEHMANN, 2007; SCHULZ e GLASER, 2015).

A utilização do biocarvão na agricultura visa, principalmente, melhorar condições físicas e químicas do solo, atuando como potencializador do condicionamento do meio onde é aplicado a partir do fornecimento de nutrientes oriundos dele próprio ou na liberação controlada de nutrientes adicionados via fertilizantes. Segundo Asai et al (2009), o biocarvão tem o potencial de trazer uma série de benefícios ambientais e agrônômicos ao solo, contribuindo para imobilização de contaminantes orgânicos e inorgânicos, neutralização da acidez, decréscimo na quantidade de alumínio extraível, redução da lixiviação de nitrogênio, redução na densidade do solo, aumento na condutividade hidráulica saturada, melhora na permeabilidade da água no solo e na disponibilidade de fósforo para as plantas. Nóbrega (2011) complementa que o biocarvão, quando presente no solo, contribui significativamente na natureza física do sistema (estrutura, textura, porosidade, profundidade e consistência) devido às mudanças proporcionada na densidade da área superficial, distribuição, densidade e tamanho dos poros e das partículas do solo. Além de seus benefícios ao solo, o biocarvão opera no sequestro de carbono e na diminuição das emissões de CH₄ e N₂O, o que contribui para mitigação das mudanças climáticas globais (BIBAR, 2014; LAGHARI et al., 2016).

Nesse sentido, o biocarvão torna-se um material versátil, havendo uma ampla variedade de biomassas que podem ser utilizadas para sua produção (restos culturais, torta de filtro, esterco de galinha, casca de camarão, lodo de esgoto, entre outros), combinadas a diversas metodologias de pirólise (duração do processo, temperatura, teor de oxigênio) originando o produto final com propriedades diferentes, influenciando no pH, teor de cinzas área superficial, microporosidade, sólidos voláteis, entre outros (DOWNIE et al., 2009; LEHMANN e JOSEPH, 2009.).

Com isso, devido ao grande potencial apresentado pelo biocarvão em equilibrar o aumento da fertilidade do solo e o sequestro de carbono com a produção de energia e de alimentos, faz com que essa tecnologia se torne essencial para responder as questões ligadas à degradação dos solos, escassez de alimentos e fertilizantes, competição por biomassa e emissões de gases do efeito estufa, resultando, nas últimas décadas, no aumento crescente de pesquisas por todo o mundo (MANGRICH et al., 2011).

REFERÊNCIAS

- ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. São Paulo: [s.n.], 2020. Disponível em:<<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 15 Fev. 2023.
- ALMENDROS, G., KNICKER, H., GONZÁLEZ-VILA, F.J. Rearrangement of carbon and nitrogen forms in peat after progressive thermal oxidation as determined by solid-state ¹³C- and ¹⁵N-nmr spectroscopy. *Organic Geochemistry*, v. 34, p. 1559–1568, 2003.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:241-248, 2002.
- AMARAL FILHO, J. P. R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; BARBOSA, J. C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.3, p.467-473, 2005
- ARAÚJO, L. A. N.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.8, p.771-777, 2004.
- ASAI H.; SAMSON, B.K.; STEPHAN, H.M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil Physical properties, leaf SPAD and grain yield, 2009.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 677-683, 2004.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.129-136, 2001
- BIBAR, M.P.S. Potencial agrícola de biocarvão proveniente de biomassas alternativas. Dissertação, Campinas, Instituto Agrônomo. p. 115, 2014.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L.T.; CANTARELLA, H. (eds) Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POFAFOS, 1993. p. 63-145.

CHENG, C.H.; LEHMANN, J.; ENGELHARD, M. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochim Cosmochim Acta* 72:1598–1610, 2008.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Brasília, DF, v.10 - Safra 2022/23. n.5 - Quinto levantamento, fevereiro 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Brasília, DF, v. 9 - Safra 2021/2022. n. 6 - Sexto Levantamento, março 2022.

CORDEIRO, L.A.M.; HOEK, J.B.V.D. Nitrogênio na cultura do milho sob sistema plantio direto. *Revista Factuciência*, v.13, p.27-54, 2007.

CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; CHRIST, D.; MANTOVANI, B. H. M. Curvas de dessorção e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca (*Zea mays*). *Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, 1998. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 75-79, 1998.

DOMINGUES, R. R.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, C. A.; DE MELO, I. C. N. A.; MELO, L. C. A.; MAGRIOTIS, Z. M.; SÁNCHEZ-MONEDERO M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS One* 12:. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884>

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical Properties of Biochar. In: Lehmann, J.; Joseph, S (ed.). *Biochar for enviromental management: Science and Technology*. 1. Londres: Earthscan, 416p. 2009

DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; TRIVELIN, P. C. O.; AMBROSANO, E. J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N) pelo milho em Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.161-171, 2008.

DUETE, R. R. C. MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de nitrogênio (^{15}N) pelos grãos de milho em função da fonte nitrogenada em Latossolo Vermelho. *Bragantia*, Campinas, V. 68, N. 2, P. 463-472, 2011

ETENE - ESCRITÓRIO TÉCNICO DE ESTUDOS ECONÔMICOS DO NORDESTE. Milho: Produção e Mercados. Caderno Setorial, ano 7, n. 233, ago. 2022. Fortaleza, 2022

FERNANDES, F. C. S.; BUZETTI, S.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.4, n.2, p.195-204, 2005.

FERREIRA, A. C. B.; ARAÚJO, G. A. A.; PEREIRA, P. R. G. P.; CARDOSO, A. A. Características agrônômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. *Scientia Agricola*, v.58, n.1, p.131-138, 2001.

FIESP - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Safra Mundial de Milho 2022/23. Informativo DEAGRO, mai. 2022. São Paulo: FIESP, 2022.

FIGUEIREDO, C. C.; LOPES, H.; COSER, T.; VALE, A.; BUSATO, J.; AGUIAR, N.; NOVOTNY, E.; CANELLAS, L. Influence of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of biochar from sewage sludge. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 64, n. 6, p. 881–889, 2018.

HOUBEN, D.; EVRARD, L.; SONNET, P. (2013). Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere* 92:1450–1457. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.055>

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS APLICADAS. Diagnostico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas: Relatório de Pesquisa. Governo Federal. Brasília. 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf>. Acesso em: 03 set. 2022.

GOMES, R. F.; SILVA, A. G.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R. Efeito de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agrônômicos da cultura do milho sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.931-938, 2007.

IPPOLITO, J. A.; CUI, L.; KAMMANN, C.; WRAGE MÖNNIG, N.; ESTAVILLO, J. M.; FUERTES MENDIZABAL, T.; MARIA LUZ CAYUELA, M. L.; SIGUA, G.; NOVAK, J.; SPOKAS, K.; BORCHARD, N. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta data analysis review. *Biochar*, 2:421–438, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>

JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F.G.A.; VAN DER VELDE, M.; BASTOS, A.C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* V. 144, p. 175–187, 2011.

JINDO, K., AUDETTE, Y., HIGASHIKAWA, F.S. et al. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 7, 15 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>.

KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto, 4ª ed., DeGaspari: Piracicaba, 2004.

LAGHARI, M., NAIDU, R., XIAO, B., HU, Z., MIRJAT, M. S., HU, M. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. *J. Sci. Food Agric.* 96, 4840–4849, 2016. doi: 10.1002/jsfa.7753

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 129: 381-387, 2007.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann J, Joseph S (eds) *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, 1st ed.. Routledge, New York, p 1–12, 2009.

LANG, T.; JENSEN, A. D.; JENSEN, P. A. (2005). Retention of Organic Elements during Solid Fuel Pyrolysis with Emphasis on the Peculiar Behavior of Nitrogen. *Energy & Fuels* 19:1631–1643. <https://doi.org/10.1021/ef049739a>

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. Piracicaba: Editora Ceres, 2006. 631p.

MANGRICH, A.S.; MAIA, C.M.B.F.; NOVOTNY, E.H. Biocarvão - As terras pretas de índios e o sequestro de carbono. Revista Ciência Hoje, p.47-48, 2011.

MAR, G. D.; MARCHETTI, M. E.; SOUZA, L. C. F.; GONÇALVES, M. C.; NOVELINO, J. O. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. Bragantia, v.62, n.2, p.267-274, 2003.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 1995. 889p.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M., 2008. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. Sociedade & Natureza, vol. 20, no. 1, pp. 111-124

NÓBREGA, S. P. C. Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B.E. (2015) Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use – a critical. review. Rev Bras Cienc Solo. 39:321–344

PANSU, M.; GAUTHEYROU, J.; CHAPTER 14. Organic forms of nitrogen, mineralizable nitrogen (and carbon). In: Pansu, M., Gautheyrou, J. (Eds.), Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, p. 497–547, 2006.

PRANDO, A. M; ZUCARELI, C; FRONZA, V; OLIVEIRA, F. A; JÚNIOR, A. O. Características produtivas do trigo em função de fontes e doses de nitrogênio. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, V. 43, N. 1, P. 34-41, 2013.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, POTAFOS, 1991. 343p.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1996. 285p. (Boletim técnico, 100)

RANUM, P.; PEÑA-ROSAS, J. P.; GARCIA-CASAL, M. N.. Produção, utilização e consumo global de milho. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Nova York, v. 1312, n. 1, pág. 105-112, abr. 2014.

SÁ, J. C. M. Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1996. 23p

SHELLEKENS, J.; SILVA, C. A.; BUURMAN, P.; RITTL, T. F.; DOMINGUES, R. R.; JUSTI, M.; VIDAL-TORRADO, P.; TRUGILHO, P. F. Molecular characterization of biochar from five Brazilian agricultural residues obtained at different charring temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 130, p. 106-117, 2018.

SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 410-422, 2015. [dx.doi.org/10.1002/jpln.201100143](https://doi.org/10.1002/jpln.201100143)

SILVA, C. A. Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: Santos, G. A. et al. *Fundamentos da matéria orgânica do solo; ecossistemas tropicais & subtropicais*. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 597-624.

SILVEIRA, D. C.; BONETTI, L. P.; TRAGNAGO, J. L.; NETO, N.; MONTEIRO, V. Caracterização agromorfológica de variedades de milho crioulo (*Zea mays* L.) na região noroeste do Rio Grande do Sul. *Ciências Agrárias*, Cruz Alta, v. 98005, p. 096, 2015.

SIMS, A. L.; SCHEPERS, J. S.; OLSON, R. A. & POWER, J. F. Irrigated corn yield and nitrogen accumulation response in a comparison of no-till and conventional till: tillage and surface-residue variables. *Agron. J.*, 90:630-637, 1998.

SINGH, B.; SINGH, B. P.; COWIE, A. L. (2010) Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Soil Res* 48:516. <https://doi.org/10.1071/SR10058>

STEVENSON, F. J. *Humus chemistry: genesis, composition and reactions*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496p.

TRUPIANO, D.; COCOZZA, C.; BARONTI, S.; AMENDOLA, C.; VACCARI, F. P.; LUSTRATO, G.; DI LONARDO, S.; FANTASMA, F.; TOGNETTI, R.; SCIPPA, G. S. The

effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. *Int. J. Agron.* 2017, 2017, 3158207.

WANG, T.; ARBESTAIN, M.C.; HEDLEY, M.; BISHOP, P. Chemical and bioassay characterisation of nitrogen availability in biochar produced from dairy manure and biosolids. *Organic Geochemistry*, v. 51, p. 45–54, 2012.

YUAN J-H, XU R-K, ZHANG H (2011) The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresour Technol* 102:3488–3497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018>

SEGUNDA PARTE

Artigo I: Versão preliminar a ser submetida à Revista Journal of Soil Science and Plant
Nutrition

Artigo I: Versão preliminar a ser submetida à Revista Journal of Soil Science and Plant Nutrition

NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DO MILHO EM FUNÇÃO DO SUPRIMENTO DE NITROGÊNIO POR BIOCARVÃO E FERTILIZANTE MINERAL

CORN NUTRITION AND GROWTH AS RELATED TO NITROGEN SUPPLY BY BIOCHAR AND MINERAL FERTILIZER

RESUMO

O milho é uma das principais commodities cultivadas do Brasil, sendo o nitrogênio (N) o principal nutriente a determinar o teto de produtividade de grãos. O uso de biocarvão interfere no ciclo do N no solo e nos processos de imobilização/mineralização de N, cuja magnitude depende do tipo de solo, das propriedades do biocarvão e do teor e natureza química da matéria orgânica do solo (MO). Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a combinação ou não de biocarvões contrastantes com N-fertilizante mineral quanto à capacidade de suprir N ao milho. Foi avaliada também a influência da biomassa e da condição de pirólise sobre os teores contrastantes, formas e natureza química do N nas matrizes carbonizadas, que afetam no crescimento do milho. O estudo foi conduzido em casa de vegetação, cultivando-se o milho em dois Latossolos contrastantes quanto à textura e teores de MO. O milho foi cultivado sem a adição de N (controle negativo), com o uso de biomassas e biocarvões, bem como cultivadas aplicando-se 300 mg kg⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio combinado com o uso de biocarvões. Foram utilizadas as seguintes biomassas: bambu, torta de girassol, esterco de galinha e casca de camarão. Na produção de biocarvões as biomassas foram pirolisadas a 300 °C. Os teores de N mineral (nitrato+amônio) disponível na solução do solo são elevados (75-1560 mg kg⁻¹), superando o nível crítico (80 - 160 mg kg⁻¹) recomendado para o pleno crescimento do milho. O tipo de solo determina a forma de N mineral que irá prevalecer na solução, portanto, controla a taxa de nitrificação, ou a magnitude do processo de imobilização de N-amônio. Os biocarvões, de forma específica, exercem, do mesmo modo, efeito sobre a taxa de nitrificação. A disponibilidade de N mineral no solo determina maior acúmulo de N nas plantas de milho, mas isso não influencia o crescimento e a produção de biomassa do milho. A produção de biomassa de milho é influenciada pelo tipo de solo e pela capacidade da MO nativa do solo em liberar N para as plantas. No Latossolo com textura média, o N disponibilizado pela MO nativa é suficiente para suprir toda demanda de N do milho, de modo que, na ausência de adubação nitrogenada, o crescimento (biomassa) de milho equivale à obtida pelo suprimento de N pelas biomassas e biocarvões, ou pelo uso conjugado de biocarvão+N mineral. No Latossolo de textura muito argilosa, o uso conjugado dos biocarvões (300 °C) de torta de girassol e de casca de camarão resultou em biomassa de milho 33-40% maior do que a obtida com o uso de nitrato de amônio, ao passo que no Latossolo com textura média o uso conjugado de biocarvão de torta de girassol+300 mg kg⁻¹ de N mineral asseguram matéria seca total do milho 20% mais alta do que as das plantas nutridas com adubo mineral.

Palavras-chave: interação solo-biocarvão, imobilização de N, matéria orgânica do solo, solução do solo, *Zea mays* L..

ABSTRACT

Corn is one of the main commodities grown in Brazil, with nitrogen (N) being the primary nutrient that determines the ceiling of grain productivity. The use of biochar interferes with the N cycle in the soil and N immobilization/mineralization processes, whose magnitude depends on the soil type, biochar properties, and content and chemical nature of soil organic matter (SOM). Therefore, this study aims to evaluate the combination or not of contrasting biochars with mineral N-fertilizer regarding the ability to supply N to corn. The influence of biomass and pyrolysis conditions on contrasting levels, forms, and chemical nature of N in carbonized matrices that affect corn growth was also evaluated. The study was conducted in a greenhouse, growing corn in two contrasting Oxisols regarding texture and SOM content. Corn was grown without N addition (negative control) with the use of biomass and biochar, as well as by applying 300 mg kg⁻¹ of N as ammonium nitrate combined with the use of biochar. The following biomass were used: bamboo, sunflower cake, chicken manure, and shrimp shell. In biochar production, the biomass was pyrolyzed at 300 °C. Available mineral N (nitrate+ammonium) content in soil solution is high (75-1560 mg kg⁻¹), surpassing the critical level (80-160 mg kg⁻¹) recommended for full corn growth. The soil type determines the form of mineral N that will prevail in the solution, thus controlling the rate of nitrification, or the magnitude of the ammonium N immobilization process. Specifically, biochar also affects the rate of nitrification. The availability of mineral N in the soil determines greater N accumulation in corn plants, but this does not influence corn growth and biomass production. Corn biomass production is influenced by the soil type and the ability of native SOM to release N to plants. In the medium-textured Oxisol, the N available from native SOM is sufficient to meet all the N demand of corn, so in the absence of nitrogen fertilization, corn growth (biomass) is equivalent to that obtained by supplying N through biomass and biochar, or by the combined use of biochar+N mineral. In the more clayey Oxisol, the combined use of sunflower cake and shrimp shell biochars (300 °C) resulted in corn biomass 33-40% higher than that obtained with ammonium nitrate, whereas in the medium-textured Oxisol, the combined use of sunflower cake biochar+300 mg kg⁻¹ of N mineral ensures total dry matter of corn 20% higher than that of plants nourished with mineral fertilizer.

Keywords: Mineral N, Soil-biochar interaction, N immobilization/mineralization, soil organic matter, N in soil solution, *Zea mays* L..

1. Introdução

O milho é uma das principais commodities agrícolas brasileiras. O cultivo do milho é realizado em regiões onde predominam os Latossolos que apresentam alta acidez, teores elevados de Al tóxico, alta capacidade de fixar fosfato e baixos a médios teores de matéria orgânica, que regula, em partes, o estoque de nitrogênio (N) total e a capacidade natural do solo em suprir N mineralizável às plantas (RAIJ, 1991; RAIJ et al., 1996; AMADO et al., 2002) O N é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura do milho e, junto com a densidade de plantas, exerce maior influência sobre a produtividade de grãos de milho, favorecendo a dependência da cultura em N aplicado no plantio e em cobertura (SIMS et al., 1998). Segundo Alva et al. (2006) as fontes de nitrogênio mais comuns utilizadas na adubação de milho é a ureia (44 a 46% N) e o sulfato de amônio (20 a 21% N), sendo ambas, no solo, sujeitas a grandes perdas por lixiviação, escoamento superficial, volatilização de amônia e imobilização pela biomassa microbiana. A ureia, por sua vez, quando aplicada em solos com pH inferior a 7 é rapidamente hidrolisada, gerando amônio (NH_4^+), sendo retida nos colóides do solo, tornando-se, prontamente, disponível para as plantas (NOVAIS et al., 2007). O N na forma de NH_4^+ oriundo da ureia, contudo, tende a ser nitrificado mais rapidamente do que o NH_4^+ proveniente do sulfato de amônio, em função do maior aumento de pH nas proximidades do grânulo de ureia, tornando a ureia mais suscetível a perdas por volatilização (McINNIS & FILLERY, 1989; SILVA & VALLE, 2000).

Em 2019, o Brasil gerou cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos, sendo que, aproximadamente, 45% desse valor são representados pelos resíduos orgânicos oriundos de diversas atividades agrícolas, industriais e urbanas, os o restante (55%) é representado pelos metais, vidros, plásticos, papel, papelão, entre outros (ABRELPE, 2020). Grande parte desses resíduos contém N e podem ser utilizado para nutrir as culturas. Desse modo, o reaproveitamento de palhadas e de resíduos oriundos da agroindústria, ou da pós-colheita, são fundamentais para reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados importados que oneram o custo de produção, promovendo a maior sustentabilidade da produção agrícola (IPEA, 2012). Antes de serem utilizados como fertilizantes, os resíduos orgânicos precisam ser processados, estabilizados quimicamente e sanitizados, sendo a pirólise um dos métodos utilizados para esse fim (KIEHL, 2004; TRUPIANO et al., 2017). Conceitualmente, o biocarvão é obtido por meio da pirólise de resíduos renováveis, com a carbonização ocorrendo na ausência ou com mínimo suprimento de oxigênio, em temperaturas variando de 300 - 750 °C, com predomínio da matriz orgânica mais aromática sobre a matriz inorgânica (cinzas), o que estabiliza o N e propicia maior persistência do C no sistema solo-planta (LEHMANN & JOSEPH, 2009). No biocarvão, há N tanto na forma mineral, quanto na forma de compostos orgânicos (N orgânico), mas, invariavelmente, a pirólise reduz os teores de N na matriz pirolisada, pois o N prevalente após a carbonização, dependendo da temperatura de pirólise (>450 °C), está mais estabilizado quimicamente apresentando elevado caráter aromático, sendo menos susceptível à mineralização no solo, devido à dificuldade de aproveitamento por parte dos microrganismos decompositores, decorrente do alto custo energético para processamento do N pirolisado (IPPOLITO et al., 2020; JINDO et al., 2020; ALMENDROS et al., 2003; SCHELLEKENS et al., 2018). Nesse sentido, as formas de N que prevalecem no biocarvões tendem a ser pouco lábeis com o aumento da temperatura de pirolise, e isso pode implicar em imobilização de N no solo, em vez de o biocarvão liberar N para as culturas (WANG et al., 2012, SCHELLEKENS et al., 2018, ALMENDROS et al., 2003). Além disso, o biocarvão interfere, na relação C/N do solo, no grau de acidez, regula a atividade microbiana, altera as taxas de nitrificação, desnitrificação, volatilização e a velocidade de decomposição da matéria orgânica do solo, por isso, dependendo da dose

adicionada ao solo, o biocarvão pode regular vários processos associados ao ciclo do N, regulando, assim, a disponibilidade do nutriente para as culturas (JEFFERY et al., 2011, WANG et al., 2012). De acordo com SEDIYAMA et al. (2011), a relação C/N interfere diretamente na velocidade de decomposição dos resíduos e, quando muito elevada, há menos N disponível na palhada para os decompositores o que pode implicar em imobilização de N no solo. Isso ocorre devido ao crescimento populacional de microrganismos promovido pela abundância de carbono orgânico lábil fazendo com que os decompositores recorram ao N inorgânico no solo para se sustentar, causando limitação na disponibilidade de N mineral, que pode prejudicar o crescimento da planta, simultaneamente cultivada com a adição de biocarvão ao solo. Além da relação C/N, a relação N/lignina, o teor de N, o teor de C total e de C solúvel e o teor de N do material adicionado ao solo são fatores que controlam o processo de imobilização de N no solo.

Informações sobre as formas e a natureza química do N no biocarvão e na biomassa que lhe deu origem exercem sobre a dinâmica e magnitude dos processos de mineralização-imobilização do N no solo e no teor e natureza química de formas de N remanescente nos biocarvões são escassas, sendo ainda pouco estudadas (WANG et al., 2012). Sabe-se que o conteúdo, a natureza química e os compostos orgânicos de N presentes nos biocarvões dependem do efeito combinado da matéria-prima e, principalmente, da temperatura de pirólise (LANG et al. 2005; SCHELLEKENS et al. 2018). De acordo com Ippolito et al. (2020), a escolha da matéria-prima vai determinar o teor de N total do biocarvão em temperaturas baixas (<450 °C). Os autores encontraram teores crescentes de N nos biocarvões na seguinte ordem de origem da matéria-prima: esterco-esgoto>tortas de filtro>resíduo agrícola>resíduos de madeira.

A aplicação de biocarvão contribui para melhoria de diversas características do solo, incluindo retenção de água, agregação, difusão de O₂, elasticidade, friabilidade, permeabilidade e a sua capacidade de retenção de cátions, ou seja, apresenta contribuições significativas na natureza físico-química do sistema, auxiliando na estruturação, porosidade e consistência do solo, alterando positivamente a densidade da área superficial, distribuição, densidade e tamanho das partículas e poros (LEHMANN, 2003; NOVOTNY et al., 2015; AGEGNEHU et al.2016; OLIVEIRA et al.2017). Além disso, em estudos realizados por Taghizadeh-Toosi et al. (2012a), foi verificado que o biocarvão cria um ambiente no solo no qual, independentemente das diversas reações que ocorre na presença de N, inibe fatores e/ou processos que possam aumentar as perdas N do sistema solo-planta.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivos: i) avaliar a combinação ou não dos biocarvões com N-fertilizante mineral quanto à capacidade em suprir N ao milho; ii) avaliar a influência da biomassa e da condição de pirólise sobre os teores contrastantes, formas e natureza química do N nas matrizes carbonizadas, que afetam no crescimento do milho; iii) avaliar o efeito das propriedades do solo sobre a dinâmica do biocarvão, bem como a influência da biomassa e da temperatura de pirólise sobre as formas de N no biocarvão, as quais controlam a dinâmica de mineralização-imobilização do N na interação solo-biocarvão, no teor e natureza química das formas de N remanescente no solo após o cultivo do milho.

2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e a produção de biocarvões e as análises laboratoriais foram realizadas nas instalações do Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica do Solo (LEMOS), no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram selecionados quatro resíduos orgânicos com teores e natureza química de N contrastantes, que englobam uma biomassa lenhosa, lignificada e pobre em N (bambu), até biomassas mais ricas no nutriente, como o esterco de galinha, casca de camarão e torta de girassol.

2.1. Pirólise e produção de Biocarvão

As biomassas selecionadas foram submetidas à pirólise em câmara de aço inox em temperatura de 300 °C, gerando-se quatro biocarvões com características químicas e físico-químicas distintas e teores de N-mineral e total contrastantes (Tabela 1). Antes da pirólise, as biomassas foram secadas em estufa com circulação de ar a 60 °C, maceradas e peneiradas em malha de 2 mm. Os biocarvões foram produzidos por meio da pirólise em forno tipo mufla, em câmara com condensador de gases, o que possibilitou que as biomassas fossem carbonizadas em atmosfera livre, ou com mínima disponibilidade de O₂. Foi adotada uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹, até se atingir a temperatura-alvo de 300 °C. A temperatura-alvo de pirólise foi mantida por 60 min e as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente. Após a pirólise, a matéria-prima e os biocarvões foram macerados em almofariz, com uso de pistilo de mármore, e peneiradas (malha de 0,5 mm de diâmetro), antes de serem analisadas e aplicadas no solo.

Tabela 1. Valores de pH, condutividade elétrica (CE), teores totais de C e de N, N-amônio e N-nitrato nos biocarvões produzidos a 300 °C e nas biomassas que lhes deram origem.

Resíduo	pH _{H2O}	CE	C-total	N-total	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
		mS cm ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
Bam	6,62	1,12	47,85	0,45	79	65
Bam-300	7,25	0,54	77,15	0,50	79	34
SC	5,26	25,57	33,55	4,10	161	44
SC-300	8,31	31,33	43,00	4,96	2.890	137
CM	7,54	7,53	24,95	3,31	1.607	2.384
CM-300	9,63	6,57	30,90	3,72	253	147
SCa	7,87	7,75	43,45	8,90	746	547
SCa-300	9,38	8,30	47,15	7,51	243	219

O pH foi determinado em água deionizada na proporção de 1:10 (p/v); N-total foi determinado pelo método *kjeldahl*; C-total determinado por combustão seca em um analisador automático do tipo TOC; N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ foram extraídos em solução KCl 1M, na proporção 1:10 (p/v) de acordo com protocolo estabelecido por Bremner & Keeney (1966). Bam, bambu; bam-300, biocarvão de bambu pirolisado a 300 °C; SC, torta de girassol; SC-300, torta de girassol pirolisada a 300 °C; CM, esterco de galinha; CM-300, esterco de galinha pirolisado a 300 °C; SCa, casca de camarão; SCa-300, casca de camarão pirolisada a 300 °C.

2.2. Condução do experimento em casa de vegetação

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação, sendo o milho cultivado em dois solos coletados da camada de 0-20 cm com textura e propriedades químicas e físico-químicas diferentes. Os teores de matéria orgânica (MO) e textura dos solos são apresentadas na Tabela 2, caracterizando os substratos como Latossolo Vermelho distroférico (LVd) e Latossolo com Textura média (LTm). Misturaram-se a estes solos resíduos de bambu, torta de girassol, esterco de galinha e casca de camarão, e aos quatro biocarvões derivados dessas biomassas pirolisados a 300 °C. Ao serem adicionados ao solo, os biocarvões foram ou não combinados com N mineral (300 mg kg⁻¹), que foi suprido com sal p.a. de nitrato de amônio.

No LVd, a calagem foi realizada com o propósito de se elevar o pH a 6,0. Com isso, o solo foi incubado por 30 dias com CaCO₃ e MgCO₃ (p.a.), mantendo-se a umidade do solo próxima a 70% da capacidade máxima de retenção de água do solo (CMRAS). No LTm, o pH do solo e o teor de Ca e Mg já se encontravam em níveis considerados ótimos para o pleno crescimento do milho, por isso, a calagem não foi realizada. Depois de realizada a correção da acidez, as amostras de solo foram secadas e passadas em peneira de 2 mm e utilizadas em laboratório para determinar as principais propriedades químicas e físico-químicas dos dois Latossolos.

Tabela 2. Atributos físico-químicos e textura dos Latossolos cultivados com milho, antes da correção da acidez do solo.

Latossolo	pH	CE	Argila	Silte	Areia	C total	N total
		mS cm ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	dag kg ⁻¹	
LVd	4,3	0,116	750	110	140	4,6	0,45
LTm	5,8	0,252	230	25	745	1,1	0.13

O pH foi determinado em água deionizada na proporção de 1:2,5 (p/v); Silte e areia foram determinados pelo método Boyoucos; O teor de C do solo foi determinado por combustão seca em analisador automático do tipo TOC, marca Elementar.

As unidades experimentais foram constituídas por vasos de plástico com sistema fechado, preenchidos com, aproximadamente, 0,8 kg de solo. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com três repetições e 14 tratamentos, que foram constituídos de quatro biomassas (Bam, SC, CM, SCa), misturado aos solos em dose única de 30,77; 5,86; 7,26 e 2,70 g vaso⁻¹, respectivamente, a fim de fornecer 300 mg kg⁻¹ de N de acordo com a porcentagem de N-total presente em cada biomassa, quatro biocarvões (Bam-300, SC-300, CM-300, SCa-300) dela derivados, que foram adicionados aos solos em dose única (2,70 g vaso⁻¹), combinados ou não com 300 mg kg⁻¹ de N (Bam-300 + N, SC-300 + N, CM-300 + N, SCa-300 + N), além dos controles positivo (uso exclusivo de N mineral, 300 mg kg⁻¹ de N nitrato de amônio) e negativo (sem adição de N mineral no solo, biomassa ou biocarvão). Os tratamentos foram misturados homoganeamente com toda a massa de solo, numa fase anterior à semeadura do milho.

Na semeadura do milho os nutrientes foram fornecidos às plantas nas seguintes concentrações: 15; 150; 100; 40; 0,81; 1,33; 3,66; 0,15; 4 e 1,55 mg kg⁻¹, respectivamente, de N (para os tratamentos específicos), P, K, S, B, Cu, Mn, Mo, Zn e Fe, usando, respectivamente, as seguintes fontes: NH₄NO₃, K₂SO₄, H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, MnCl₂.4H₂O, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O, ZnSO₄.7H₂O e FeCl₃.6H₂O p.a (NOVAIS et al., 1991). Na sequência, a umidade do solo foi mantida em ~70% CMRAS, então, cinco sementes de milho foram semeadas

por vaso. Dez dias após o plantio do milho, foi realizado o desbaste, de modo a se cultivar duas plantas em cada vaso. A adubação de cobertura foi realizada aos 15 dias após o plantio do milho, adicionando-se ao solo 150 mg kg^{-1} N e de K, que foram supridos via sais p.a. de NH_4NO_3 e K_2SO_4 . As plantas de milho foram cultivadas em condições de casa de vegetação por 30 dias.

2.3. Coleta e análise de solo e da solução

No início do cultivo e na adubação de cobertura com N e K, após 12 h de imersão dos sais contendo os dois nutrientes, e com manutenção de umidade do solo a ~70% CMRAS, uma alíquota da solução do solo (20 mL) foi coletada utilizando-se amostrador de solução do solo Suolo Acqua® (CARMO et. al., 2016). O amostrador de solução de solo foi inserido no meio do vaso, durante o seu enchimento com o substrato e a solução foi extraída por um tubo sob efeito de vácuo. Amostras de solução de solo foram filtradas com o uso de membrana de celulose de $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro de poro e o pH da solução do solo foi determinado por meio de medidor de bancada da Hanna Instruments (HI2221).

Além disso, foram quantificados os teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- prontamente disponíveis na solução do solo, com o uso de metodologia proposta por Bremner & Keeney (1966), que consiste na extração, destilação do N por arraste de vapores e titulação do N mineral na forma de borato de amônio. Para isso, pipetou-se uma alíquota de 5 mL da solução do solo extraída de cada unidade experimental, que foi transferida para o tubo de destilação; acrescentou-se 10 mL de água deionizada e, com a adição de 0,2 g de óxido de magnésio (MgO) ao tubo, criou-se meio alcalino capaz de converter NH_4^+ em amônia (NH_3). Já o N-NO_3^- , após a quantificação do N-NH_4^+ , adicionou-se ao mesmo tubo de destilação 0,2 g da Liga de Devarna, criando-se um ambiente redutor capaz de transformando o NO_3^- em NH_3 . Em ambos os casos, a amônia (NH_3), oriunda do extrato destilado, foi coletada na saída do condensador em um erlenmeyers com 10 mL da solução indicadora contendo verde de bromocresol, vermelho de metila, álcool etílico, ácido bórico e água deionizada, sendo convertida a borato de amônia que, posteriormente, foi restituído a ácido bórico, com o uso de solução de HCl $0,07143 \text{ mol L}^{-1}$ devidamente padronizada, para, indiretamente, quantificar o N nas formas de amônio e nitrato na solução do solo. Detalhes do protocolo analítico estão disponíveis em Embrapa (2017).

Decorridas 18 horas do plantio, e ao final do cultivo do milho, foi coletada uma amostra de 30 g de solo de cada unidade experimental. Em seguida, as amostras de solo foram secadas, maceradas e peneiradas (0,5 mm). Em sequência, quantificou-se o teor de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo, seguindo com adaptações a metodologia proposta por Bremner & Keeney (1966). Em um tubo falcon de 50 mL, pesou-se 2,5 g do material que foram tratadas com 25 mL de KCl 1 M, utilizada como solução extratora, onde foram agitadas por uma hora em mesa agitadora pendular a 100 rpm, permanecendo em repouso, em seguida, por, no mínimo, 12 h, para decantação da parte sólida. Uma alíquota de 15 mL foi transferida para o tubo de destilação, para determinação do teor de N mineral, seguindo o procedimento analítico já mencionado. O pH das amostras de solo foram determinadas em água deionizada na proporção de 1:2,5, seguindo o os protocolos analíticos propostos pela EMBRAPA (Embrapa,2017).

2.4. Índice SPAD, produção de biomassa e acúmulo de N pelo milho

Ao final do cultivo do milho, com o auxílio do medidor de clorofila SPAD-502 Plus, foi determinado o índice SPAD. Posteriormente, as plantas foram colhidas e separadas em parte aéreas e raízes, sendo secadas em estufa com circulação de ar a 60 °C, até peso constante. A biomassa seca foi pesada e a produção de matéria seca da parte aérea (MSA) e da raiz (MSR) foi aferida. A matéria seca total foi obtida somando-se MSA mais MSR.

Na quantificação do N acumulado na parte aérea, primeiramente, foi necessário a determinação do N-total em uma amostra da parte aérea pelo método de kjeldahl. A biomassa seca da parte aérea foi peneirada (2 mm), pesada (0,1 g) e digerido em uma mistura de sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) p.a. e sulfato de potássio (K_2SO_4) p.a. na proporção de 10:1, com a adição de 3 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado dentro de um tubo digestor. Os tubos foram levados para o bloco digestor, onde foi iniciada a digestão elevando-se, gradativamente, a temperatura, até atingir 350 °C, onde permaneceu por 60 min. Em seguida, com os tubos resfriados, foram acrescentadas 20 mL de água deionizada em cada extrato digerido.

Com isso, os tubos com extratos foram conectados aos destiladores e acrescenta-se 10 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH 13 M). O extrato possui uma coloração esverdeada, que se torna amarronzada ao entrar em contato com o NaOH, indicando que a neutralização do ácido foi completa ($\text{pH} > 8$). No erlenmeyer, presente na saída do condensador com ácido bórico, ocorreu à reação do destilado formado borato de amônio. Essa solução foi encaminhada para titulação com ácido clorídrico (HCl 0,07143 mol L^{-1}) e o volume gasto foi utilizado na transformação para obtenção da porcentagem de N-total. Esses resultados foram multiplicados pelo teor de MSA e pelo fator 1000, para, assim, quantificar o acúmulo de N na parte aérea do milho.

2.5. Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software R (R Core Team 2021), utilizando-se, para isso, os pacotes tidyverse, corrplot e ExpDes (Wickham et al., 2019; Wei and Simko 2017; Ferreira et al., 2021). Inicialmente, os dados foram submetidos a análise de variância, com a finalidade de que os pressupostos básicos da análise variância fossem atendidos. Em função da diferença significativa dos efeitos de tratamentos na fase de ANAVA ($p < 0.05$), as médias dos tratamentos testados foram comparadas entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0.05$). Para avaliar a relação entre as variáveis determinadas para plantas, solo e solução do solo, foi realizada análise de correlação linear de Pearson ($p < 0.05$).

3. Resultados e Discussão

3.1. Disponibilidade de N mineral no solo

As figuras 1 e 2 trazem os efeitos dos tratamentos sobre a dinâmica e teores de N-mineral em dois Latossolos. A disponibilidade de N mineral no solo varia conforme a fonte de N, e há mais N disponível nos solos tratados com o biocarvão (300 °C) do que naqueles sob influência da biomassa que deu origem ao biocarvão. O N disponível no solo é maior com a adição de 300 mg kg^{-1} de N na forma de nitrato de amônio (NA), de modo que poucos são os tratamentos que se assemelham ao NA em termos de disponibilidade de N mineral. Predomina no solo o N na forma de amônio, em relação ao N-nitrato. Achados semelhantes foram relatados por Oladele et al. (2019), em seu estudo com a finalidade de investigar os efeitos do biocarvão de casca de arroz e aplicação de fertilizantes nitrogenados em diferentes taxas no rendimento de arroz de sequeiro. A maior disponibilidade de N na forma de amônio pode ser explicada pelo fato das partículas do biocarvão

adsorverem NH_4^+ , diminuindo suas perdas no solo, aumentando sua concentração (Agegnehu et al., 2016) A adição de N mineral misturado ao biocarvão disponibiliza somente parte do N adicionado pelo nitrato de amônio, sinalizando que parte do N mineral pode ter sido imobilizada na matriz carbonizada ou na matéria orgânica do solo. Assim, ao ser adicionado no solo, o biocarvão aumenta a disponibilidade de carbono (C), estimulando a atividade microbiota que pode liberar N ou imobilizar o nutriente. Na eventualidade de o microbiota imobilizar N do solo com a adição do biocarvão, o uso de fertilizante mineral combinado com matrizes carbonizadas pode suprir o N demandado pelo milho. É possível antecipar também que os biocarvões possuem formas e teores de N variáveis, por isso, a magnitude de imobilização de N no solo varia de uma matriz carbonizada para outra. O uso conjugado de alguns biocarvões com NA propicia maior disponibilidade de N-nitrato no solo, cujos teores nos solos tratados com biocarvões são maiores do que os verificados no solo tratado exclusivamente com 300 mg kg^{-1} de N-nitrato de amônio, sinalizando para o aumento do processo de nitrificação favorecido pela aplicação do biocarvão.

Há uma contribuição da MO nativa do solo para o N disponível no solo, dado que no tratamento sem adubação nitrogenada, o N mineral iguala ou supera as quantidades de N mineral liberadas no solo pelas biomassas e por seus respectivos biocarvões. No geral, os teores de N disponível estão dentro da faixa considerada ótima para o pleno crescimento de plantas, $80\text{-}160 \text{ mg kg}^{-1}$ de N mineral em soluções hidropônicas ou solos arenosos (Barry, 1996). De fato, para um conjunto constante de solos brasileiros, a absorção de N pelo milho está fortemente correlacionada com N potencialmente mineralizável (130 mg kg^{-1} de N para absorção abundante de N) para plantas cultivadas em condições de casa de vegetação (Braos et al., 2022). Entretanto, foi notado que a relação N-amônio:N-nitrato varia de acordo com o tratamento testado, o que pode afetar o crescimento do milho, que é favorecido quando a relação N-amônio:N-nitrato se situa próximo de 50:50. Uma proporção de N- NH_4^+ :N- NO_3^- de 1:1 em 2 semanas após o plantio resultou em maiores rendimentos de grãos de milho (6.097 kg ha^{-1}) do que 0:1 (5.415 kg ha^{-1}) ou 1:0 (5.328 kg ha^{-1}) (Adriaanse & Human, 1993). Ao término do cultivo do milho, os teores remanescentes de N mineral no solo são relativamente baixos (efeito residual do N), sinalizando que é preciso refazer a adubação no caso de outras culturas serem plantadas em sequência ao cultivo do milho.

O tipo de solo condiciona os efeitos das fontes de N sobre a disponibilidade do nutriente no solo. No LTm o uso dos biocarvões de esterco de galinha e de casca de camarão associado ao NA, aumenta a disponibilidade de N-nitrato no solo, para níveis superiores até mesmo do tratamento onde o N foi suprido na forma de NA, por outro lado no LVd, isso só é observado no tratamento com biocarvão de casca de camarão associado ao NA. Os dois solos possuem capacidade diferenciadas de disponibilizar N para o milho, considerando-se que LVd é capaz de suprir N em quantidades superiores às disponibilizadas pela maioria das biomassas e de seus respectivos biocarvões no LTm.

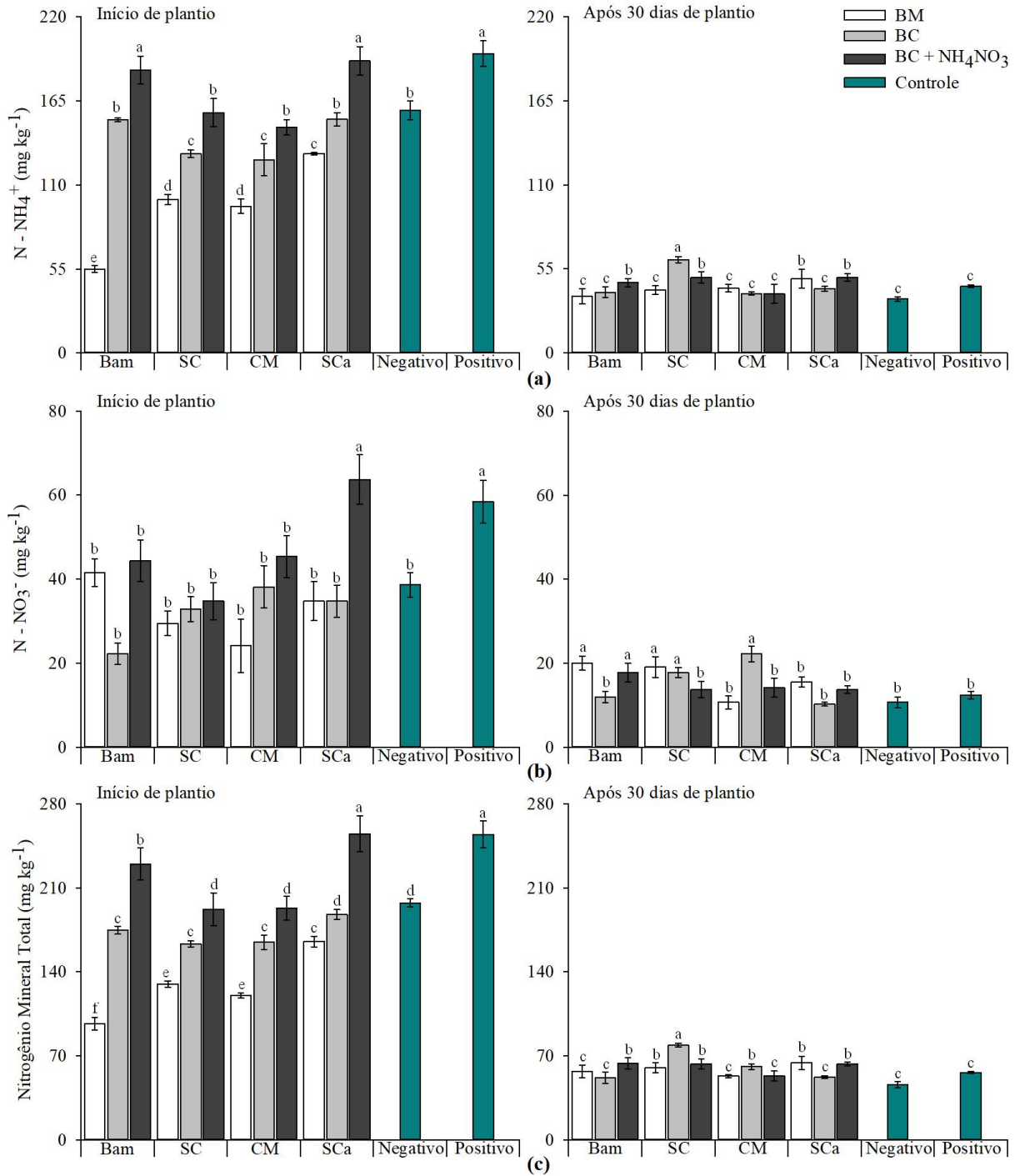


Fig. 1 Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral em Latossolo Vermelho distroférrico cultivado com milho. Teor de N-NH₄⁺ (a), teor de N-NO₃⁻ (b) e Nitrogênio Mineral Total (N-amônio+N-nitrato) (c). Barras com erro padrão da média seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).). Biomassa (BM), Biocarvão (BC), Biocarvão + Nitrato de Amônio (BC + NH₄NO₃), Bambu (Bam), Torta de Girassol (SC), Esterco de Galinha (CM), Casca de Camarão (SCa).

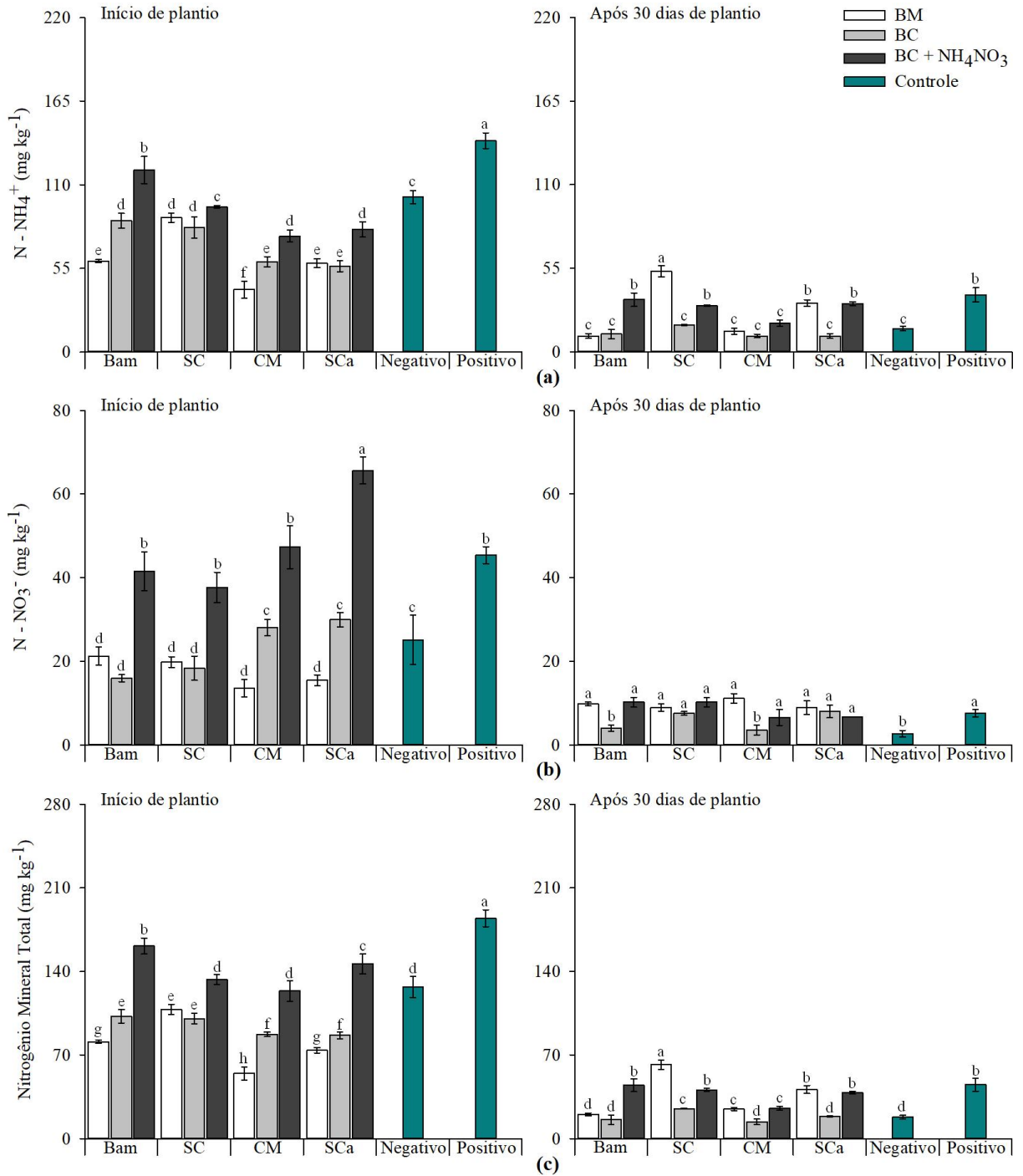


Fig. 2 Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral em Latossolo com textura média cultivado com milho. Teor de N-NH₄⁺ (a), teor de N-NO₃⁻ (b) e Nitrogênio Mineral Total (N-amônio+N-nitrato) (c). Barras com erro padrão da média seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Biomassa (BM), Biocarvão (BC), Biocarvão + Nitrato de Amônio (BC + NH₄NO₃), Bambu (Bam), Torta de Girassol (SC), Esterco de Galinha (CM), Casca de Camarão (SCa).

3.2. N disponível na solução do solo

A disponibilidade de N-nitrato ou de N-amônio na solução é regulada pela interação solo-fontes de N. A interação solo-biocarvão exerce forte influência sobre a prevalência ou não do N-nítrico sobre o N-amoniaco na solução. No LVd, o nitrato prevalece sobre o N-amônio, notadamente nos tratamentos onde o biocarvão + nitrato de amônio foram utilizados como fontes de N para o milho. No LTm, predomina o N-amoniaco, em teores muito elevados em relação ao N-nitrato.

Em relação ao solo, há mais N disponível na solução, com níveis que superem a faixa ótima de N mineral (80-160 mg kg⁻¹) para o pleno crescimento de plantas em soluções nutritivas (Barry, 1996). Essa prevalência do N-amônio sobre o N-nitrato nos tratamentos onde houve o uso conjugado de biocarvão-N mineral pode prejudicar o crescimento do milho em função de dois fatores: excesso de N disponível e desbalanço na relação amônio:nitrato, dado que o milho se beneficia quando há equilíbrio no suprimento de formas (amônio:nitrato) de N mineral (Adriaanse & Human, 1993).

Há fortes indícios de que os biocarvões favorecem o processo de nitrificação, mas esse efeito se restringe ao solo com textura média (LTm). De fato, o processo de nitrificação é favorecido pela presença de biocarvão no solo, mas ele requer tempo para ocorrer. Torna-se possível fazer essa afirmação dado que, no LTm, somente há maior disponibilidade de N-nitrato após 15 dias de cultivo do milho. Esse atraso na solubilização e liberação do nutriente pela fonte de N pode estar associada à estrutura de sorção e de troca iônica com a superfície do biocarvão (Dempster et al., 2012a), em que favorece a adsorção das formas nitrogenadas nos poros da matriz, proporcionando uma liberação gradual (Jassal et al., 2015). Além disso, o fluxo de água pelos poros do biocarvão é influenciado pela rede porosa de suas microestruturas, regulando o contato entre a água e o fertilizante mineral, consequentemente, controlando sua solubilização e liberação de N (Baki & Koupai, 2018; Gwenzi et al., 2018; Khan et al., 2008).

O efeito da interação solo-fonte de N sobre as formas prevalentes de N no solo requer estudo mais aprofundado. Além disso, é preciso verificar os efeitos que o biocarvão exerce sobre a taxa de conversão do N-amônio a N-nitrato. É preciso investigar o efeito que os altos teores de N mineral na solução do solo têm sobre o crescimento do milho. Além do teor elevado, há desequilíbrio na solução do solo de formas de N supridas ao milho. Este é o primeiro estudo que avalia o efeito de teores e relação de amônio:nitrato na solução do solo em função do uso de biocarvão e de resíduos orgânicos para suprir N às plantas. É a primeira vez que os teores de N mineral são avaliados na solução de solos brasileiros, e é original o fato de que a matéria orgânica nativa do solo possa contribuir para aumentar o N prontamente disponível na solução para o milho. De fato, causa surpresa o fato de os teores de N mineral na solução do solo ser tão elevados, superiores, portanto, aos níveis críticos indicados para crescimento das plantas em soluções nutritivas.

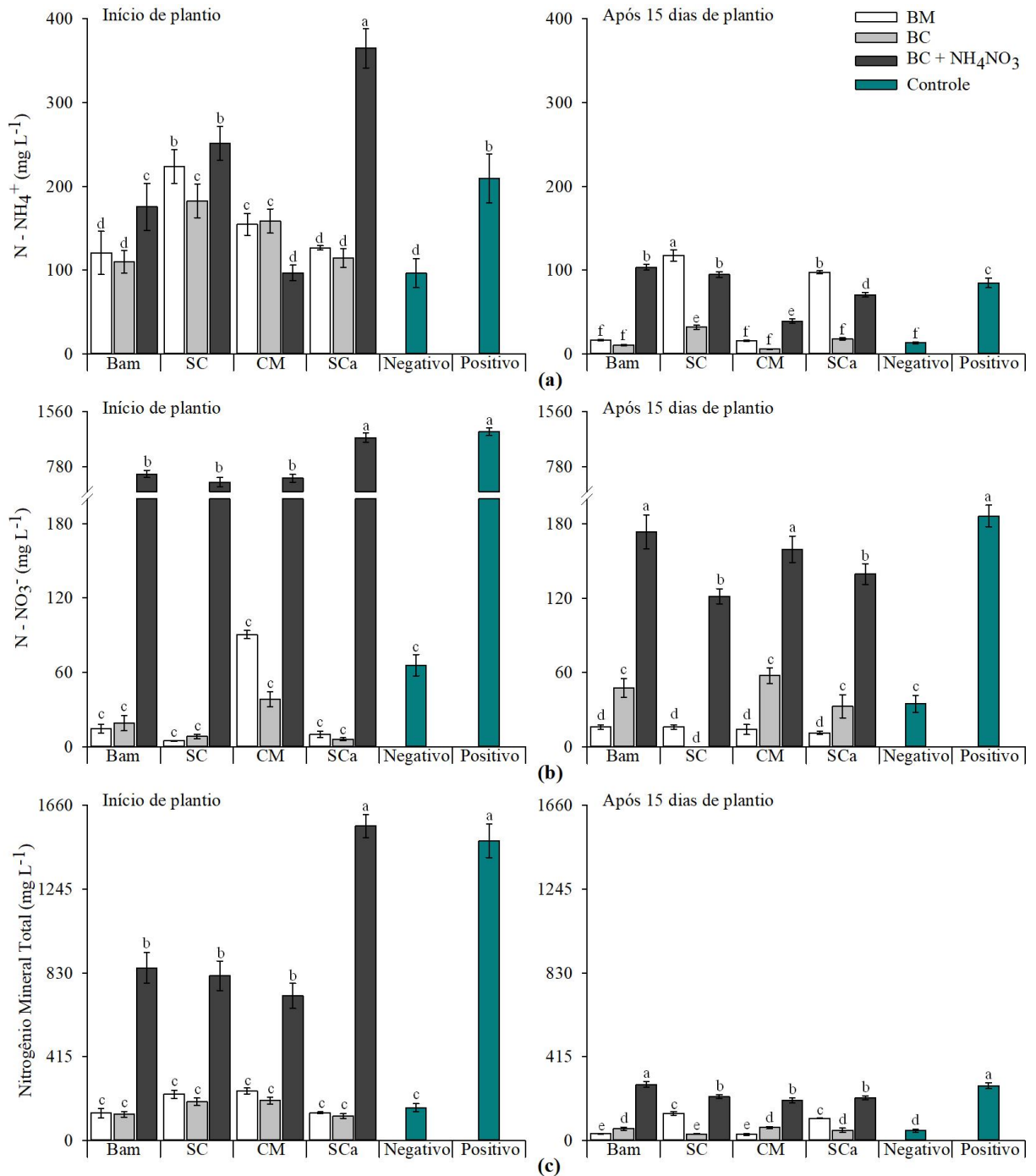


Fig. 3 Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarbões delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral na solução do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com milho. Teor de N-NH₄⁺ (a), teor de N-NO₃⁻ (b) e Nitrogênio Mineral Total (N-amônio+N-nitrato) (c). Barras com erro padrão da média seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Biomassa (BM), Biocarbvão (BC), Biocarbvão + Nitrato de Amônio (BC + NH₄NO₃), Bambu (Bam), Torta de Girassol (SC), Esterco de Galinha (CM), Casca de Camarão (SCa).

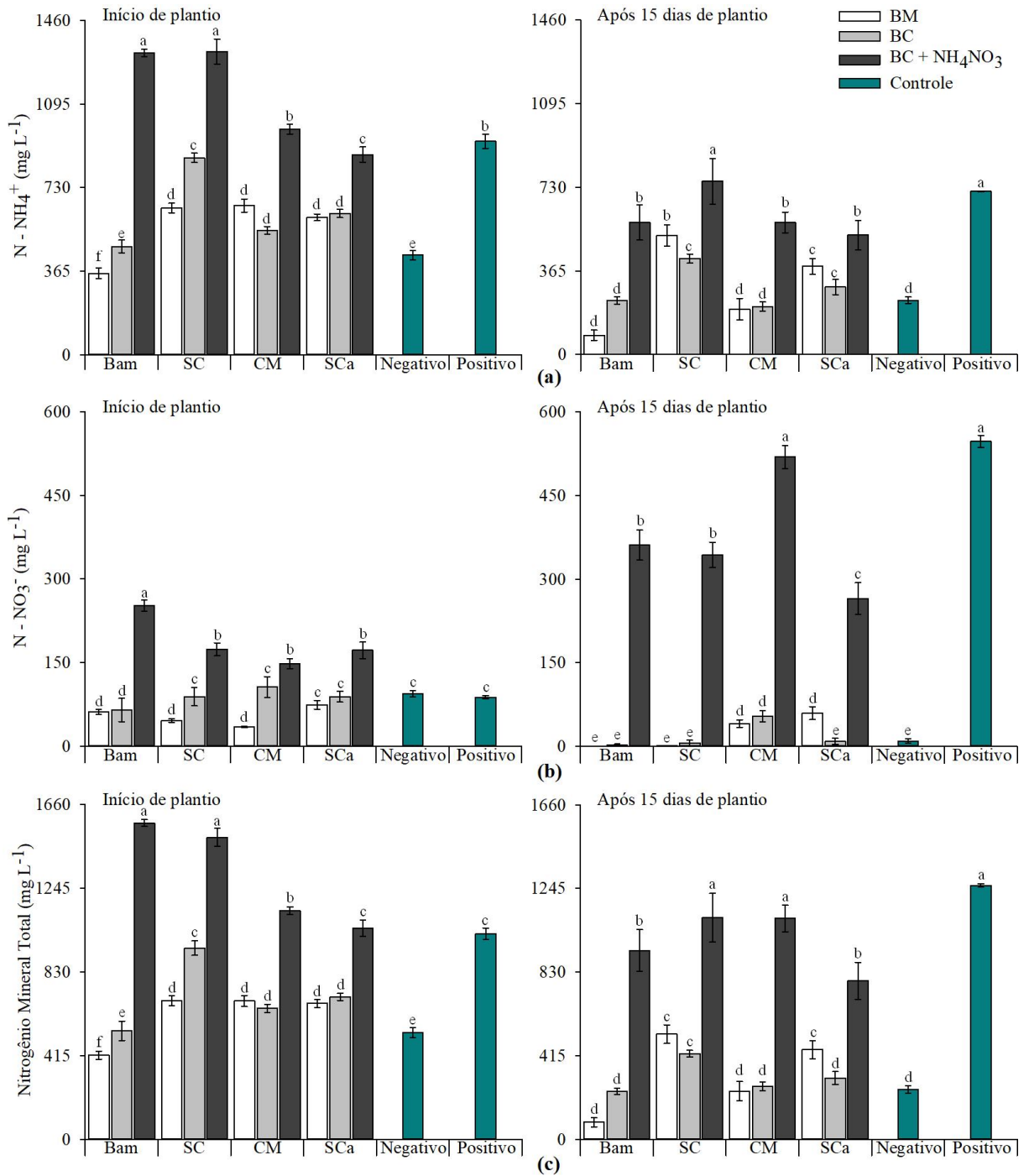


Fig. 4 Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvãos delas originados sobre a dinâmica e teores de N-mineral na solução do Latossolo com textura média cultivado com milho. Teor de N-NH₄⁺ (a), teor de N-NO₃⁻ (b) e Nitrogênio Mineral Total (N-amônio+N-nitrato) (c). Barras com erro padrão da média seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Biomassa (BM), Biocarvão (BC), Biocarvão + Nitrato de Amônio (BC + NH₄NO₃), Bambu (Bam), Torta de Girassol (SC), Esterco de Galinha (CM), Casca de Camarão (SCa).

3.3. Nutrição e crescimento do milho

No geral, o acúmulo de N em plantas de milho é maior no solo de textura média (LTm), sem que isso implique em maior produção de biomassa, sinalizando para um consumo de luxo de N pelas plantas cultivadas. O acúmulo de N é magnificado pelo uso conjugado de N mineral-biocarvão, notadamente quando se combina o nitrato de amônio com os biocarvões de esterco de galinha e de casca de camarão. Liu et al., (2017), em seu estudo, verificaram que os teores de nitrogênio nas plantas cultivadas em solos com a adição de biocarvão não apresentou resultados superiores, contudo o biocarvão contribuiu para melhoria da disponibilidade desse nutriente no solo. Por outro lado, Chan e Xu (2009) afirmam que, em longo prazo, decorrente as taxas lentas de liberação do nitrogênio, o biocarvão apresenta benefícios para o crescimento das plantas, sendo a sua disponibilidade regradada diretamente pelas diversas variáveis relacionadas ao seu processo de formação (condições da pirólise, matéria prima), interferindo em diferentes tipos de respostas das culturas a assimilação destes condicionadores do solo.

O uso dos biocarvões de bambu e de torta de girassol + N mineral garantiu as maiores produções de matéria seca no Latossolo com textura média (LTm), enquanto no Latossolo de textura muito argilosa (LVd) é representado pelo uso dos biocarvões de torta de girassol e casca de camarão, sendo, de modo geral o maior crescimento do milho observado no tratamento com biocarvão de torta de girassol no LVd, em comparação com o LTm, independentemente do tratamento avaliado. O rendimento na produção de biomassa está relacionado com a eficiência fisiológica da planta no processamento e assimilação do nitrogênio (Bingham et al., 2012; Agegnehu et al., 2016; Todeschini et al., 2016). De acordo com Mandal et al. (2016) as diferenças estão correlacionadas com o metabolismo da planta em assimilar o NH_4^+ e NO_3^- , ou seja, o NO_3^- antes de ser assimilado é preciso ser reduzido a NH_4^+ pela enzima nitrato redutase, por outro lado o NH_4^+ pode ser aproveitado diretamente. Portanto, a eficiência do uso do nitrogênio vai depender, não apenas em função do seu fornecimento, mas diretamente da capacidade das plantas em absorvê-lo, transforma-lo e assimila-lo em detrimento de toda a interação com o ambiente (Baligar et al., 2001; Xu et al., 2012).

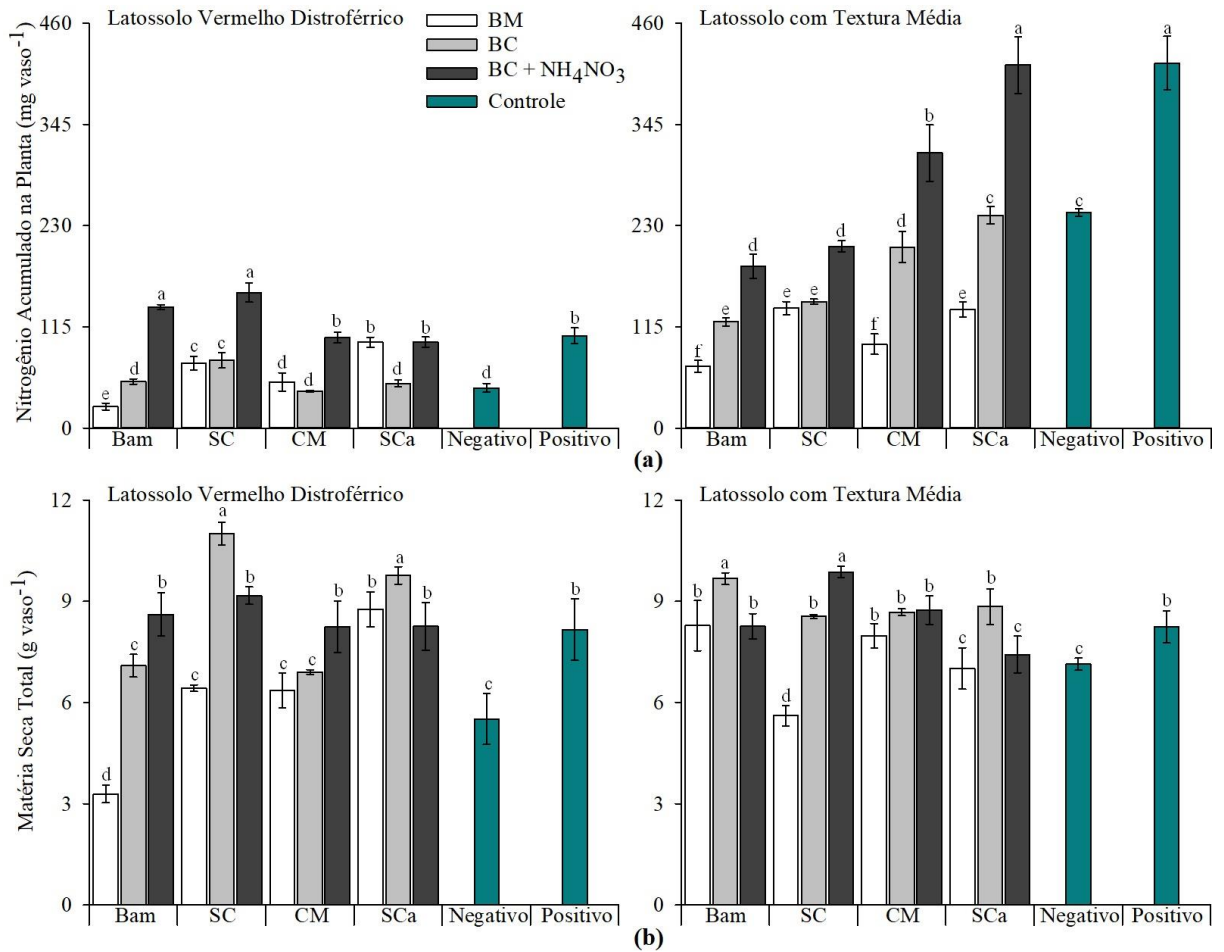


Fig. 5 Efeito da aplicação de biomassas e dos biocarvões delas originados sobre o acúmulo de N na parte aérea **(a)** e a matéria seca total (parte aérea + raiz) **(b)** de plantas de milho cultivadas em Latossolos contrastantes. Barras com erro padrão da média seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Biomassa (BM), Biocarvão (BC), Biocarvão + Nitrato de Amônio (BC + NH₄NO₃), Bambu (Bam), Torta de Girassol (SC), Esterco de Galinha (CM), Casca de Camarão (SCa).

3.4. Correlação entre atributos de solo, solução e de planta

Foram correlacionados dados de planta, da solução do solo e os atributos do solo como um todo. Em geral, poucos são atributos que se correlacionam, ou seja, os dados de solos e da solução do solo que são capazes de prever a produção de biomassa de milho.

Para ambos os solos, o N acumulado na parte aérea do milho correlaciona-se positivamente com o índice SPAD, o que indica que folhas com coloração verde mais intensa refletem maiores teores de N absorvido pelo milho e incorporado na estrutura da clorofila. Com isso, é possível inferir por meio de leitura rápida em clorofilômetro (índice SPAD) o status nutricional das plantas de milho em N. Ainda, é possível observar que, de modo geral, os indicadores de crescimento do milho (SDM, NAc, SPAD) correlacionam-se positivamente com os teores de N mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-), tanto no solo quanto na solução do solo, sendo a variabilidade da biomassa de milho melhor explicada pela disponibilidade de N na solução do solo. Assim, a absorção e acúmulo de N pelas plantas de milho são regulados pela disponibilidade de N no solo, notadamente pelos teores de N na solução do solo. Além disso, o teor de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no início do cultivo de milho correlaciona-se positivamente com o N-NH_4^+ e N-NO_3^- na solução após 15 dias de cultivo, respectivamente, o que se explica devido à aplicação do N-fertilizante em cobertura. (Fig. 6 e 7)

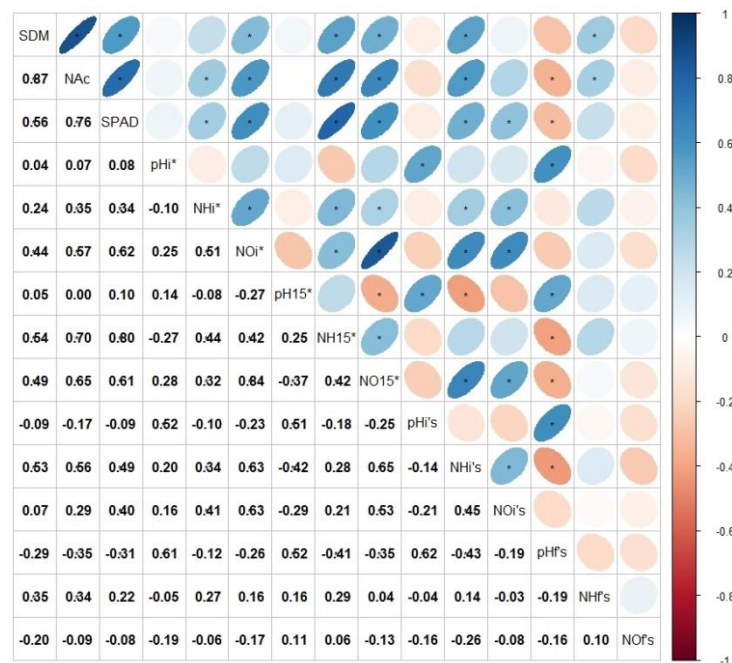


Fig. 6 Matriz de correlação de Pearson dos resultados gerados do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com milho. Referências seguidas por * são oriundas da solução do solo. Referências seguidas por i resultado da primeira coleta, 15 resultado da coleta de quinze dias após a semeadura, f resultado da última coleta para solo, * são oriundas da solução do solo e 's são oriundos do solo. Matéria seca total (SDM), N acumulado na parte aérea (NAc), índice SPAD (SPAD).

5. Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES-PROEX/AUXPE 593/2018), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (303899/2015-8 e 307447/ 2019-7), e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e bolsas de pesquisa concedidas. Foi concedida bolsa de pesquisa de iniciação científica ao primeiro autor deste estudo. Os agentes financiadores não tiveram papel na concepção do estudo, tampouco interferiram na coleta e análise de dados, na decisão de publicação ou na edição do manuscrito.

6. Referências

Adriaanse, F. G., & Human, J. J. (1993). Effect of time of application and nitrate: ammonium ratio on maize grain yield, grain N concentration and soil mineral N concentration in a semi-arid region. *Field Crops Research*, 34(1), 57-70.

Agegehu, G.; Bass, A.M.; Nelson, P.N.; Bird, M.I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Sci. Total Environ.* 543, 295–306, 2016.

Agegehu, G.; Nelson, P. N.; Bird, M. I. The effects of biochar, compost and their mixture and nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the highlands of Ethiopia. *Science of the Total Environment*, v. 569-570, p. 869–879, 2016.

Almendros, G., Knicker, H., González-Vila, F.J. Rearrangement of carbon and nitrogen forms in peat after progressive thermal oxidation as determined by solid-state ¹³C- and ¹⁵N-nmr spectroscopy. *Organic Geochemistry*, v. 34, p. 1559–1568, 2003.

Alva, A. K.; Paramasivam, D.; Fares, A.; Delgado, J. A.; Mattos Júnior, D.; Sajwan, K. Nitrogen and irrigation management practices to improve nitrogen uptake efficiency and minimize leaching losses. *Journal of Crop Improvement*, Binghamton, v. 15, n.2, p. 369-420, 2006.

Baki, J. M.; Abedi-Koupai. Preparation and characterization of a superabsorbent slowrelease fertilizer with sodium alginate and biochar. *Journal of Applied Polymer Science*. v. 135, 2018.

Baligar, V.; Fageria, N.; He, Z. Nutrient use efficiency in plants. *Community of Soil Science Plant Analysis*. v. 32, p. 921-950, 2001.

Barry, C. *Nutrients: The handbook to hydroponic nutrient solutions*. Narrabeen, NSW, Australia, Casper Publications Ltda., 1996, 55p.

Braos, L. B., Carlos, R. S., Kuhnen, F., Ferreira, M. E., Mulvaney, R. L., Khan, S. A., & Cruz, M. C. P. D. (2022). Predicting Soil Nitrogen Availability for Maize Production in Brazil. *Nitrogen*, 3(4), 555-568.

- Bremner, J. M. & Keeney, D. R. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soil: 3. Exchangeable ammonium, nitrate and nitrite by extraction-distillation methods. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 30:577-582, 1966
- Bingham, I. J.; Karley, A. J.; White, P. J.; Thomas, W. T. B.; Russell, J. R. Analysis of improvements in nitrogen use efficiency associated with 75 years of spring barley breeding. *European Journal of Agronomy*, v. 42, p. 49-58, 2012.
- Carmo, D.L.; Silva, C.A.; De Lima, J.M.; Pinheiro, G.L. Electrical Conductivity and Chemical Composition of Soil Solution: Comparison of Solution Samplers in Tropical Soils. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 2016, 40, 0140795.
- Chan, K. Y.; Xu, Z. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. In Lehmann, J., & Joseph, S. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Earthscan. 449p, 2009.
- Dempster, D. N.; Jones, D. L.; Murphy, D. M. Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. *Soil Research*. v. 50, p. 216–221, 2012a.
- Eric Batista Ferreira, Portya Piscitelli Cavalcanti and Denismar Alves Nogueira (2021). *ExpDes: Experimental Designs Package*. R package version 1.2.1. <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes>
- Gwenzi, W; Nyambishi, T. J.; Chaukura, N.; Mapope, N. Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–K slow-release fertilizer. *International Journal of Environment Science Technology*, v. 15: p. 405–414, 2018.
- IPEA—Instituto de Pesquisas Aplicadas Diagnostico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas: Relatório de Pesquisa. Governo Federal. Brasília. 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf>. Acesso em: 03 set. 2022.
- Ippolito, J. A.; Cui, L.; Kammann, C.; Wrage Mönnig, N.; Estavillo, J. M. • Fuertes Mendizabal, T.; Maria Luz Cayuela, M. L.; Sigua, G.; Novak, J.; Spokas, K.; Borchard, N.. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta data analysis review. *Biochar*, 2:421–438, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Jassal, R. S.; Johnson, M. S.; Molodovskaya, M.; Black, T. A.; Ashlee Jollymore, A.; Sveinson, K. Nitrogen enrichment potential of biochar in relation to pyrolysis temperature and feedstock quality. *Journal of Environmental Management*. v. 152, p.140-144, 2015.
- Jeffery, S.; Verheijen, F.G.A.; van der Velde, M.; Bastos, A.C. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* V. 144, p. 175–187, 2011.

Jindo, K., Audette, Y., Higashikawa, F.S. et al. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 7, 15 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00182-8>

Khan, M. A.; Kim, K.; Mingzhi, W.; Lim, B.; Lee, W.; Lee, J. Nutrient-impregnated charcoal: an environmentally friendly slow-release fertilizer. *Environmentalist*, v. 28, p. 231–235, 2008.

Kiehl, E. J. *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto*, 4ª ed., DeGaspari: Piracicaba, 2004.

Lehmann, J.; Da Silva Jr., J.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343-357.

Lehmann, J.; Joseph, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann J, Joseph S (eds) *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*, 1st ed.. Routledge, New York, p 1–12, 2009.

Liu, Z.; Cheng, X.; Sun, D.; Meng, J.; Chen, W. Maize stover biochar increases urea (15 N isotope) retention in soils but does not promote its acquisition by plants during a 4-year pot experiment. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 77(4), 382–389, 2017.

Mandal, S.; Thangarajan, R.; Bolan, N. S.; Sarkar, B.; Khan, N.; Ok, Y. S.; Naidu, R. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat. *Chemosphere*, v.142, p.120-127, 2016.

Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

McInnes, K. J & Fillery, I. R. P. Modeling and field measurements of the effect of nitrogen source on nitrification. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1264-1260, 1989.

Novais, R. F.; Alvares, V. H. V.; Barros, N. F. de.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1ª edição, 1017p, Viçosa, Minas Gerais, 2007.

Novais, R.F., Neves, J.C.L., Barros, N.F.: Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A.J., Garrido, W.E., Araújo, J.D., Lourenço, S. (eds.) *Métodos de pesquisa em fertilidade do solo*, pp. 189–253. Brasília, Embrapa-SEA (1991)

Novotny, E. H.; Maia, C. M. B. F.; Carvalho, M. T.M.; Madari, B.E. 2015. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo (Online)*, 39(2): 321-344.

Oladele, S. O.; Adeyemo, A. J.; Awodun, M. A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils, *Geoderma*, v. 336, p. 1-11, 2019.

- Oliveira, F. R.; Patel, A. K.; Jaisi, D. P.; Adhikari, S.; Lu, H.; Khanal, S. K. 2017. Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, 246, 110.
- Pansu, M., Gautheyrou, J., Chapter 14. Organic forms of nitrogen, mineralizable nitrogen (and carbon). In: Pansu, M., Gautheyrou, J. (Eds.), *Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, p. 497–547, 2006.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Schellekens, J.; Silva, C.A.; Buurman, P.; Rittl, T.F.; Domingues, R.R.; Justi, M.; Vidal-Torrado, P.; Trugilho, P.F. Molecular characterization of biochar from five Brazilian agricultural residues obtained at different charring temperatures. *JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS*, v. 130, p. 106-117, 2018.
- Sedyama, M. A. N; Santos, M. R.; Vidigal, S. M.; Salgado, L. T. Produtividade e exportação de nutrientes em beterraba cultivada com cobertura morta e adubação orgânica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 883–889, 2011.
- Silva, C. A. Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: Santos, G. A. et al. *Fundamentos da matéria orgânica do solo; ecossistemas tropicais & subtropicais*. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 597-624.
- Silva, C. A.; Vale, F. R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35, p. 2461-2471, 2000.
- Stevenson, F.J. *Humus chemistry: genesis, composition and reactions*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496p.
- Taghizadeh-Toosi, A.; Clough, T. J.; Sherlock, R. R.; Condon, L. M. 2012a. A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability. *Plant and Soil*, 353(1-2), 73-84.
- Taiyun Wei and Viliam Simko (2017). R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Todeschini, M. H.; Milioli, A. S.; Trevizan, D. M.; Bornhofen, E.; Finatto, T.; Storck, L.; Benin, G. Eficiência de uso do Nitrogênio em cultivares modernas de trigo. *Bragantia*, 2016.
- Trupiano, D.; Cocozza, C.; Baronti, S.; Amendola, C.; Vaccari, F. P.; Lustrato, G.; Di Lonardo, S.; Fantasma, F.; Tognetti, R.; Scippa, G. S. The effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. *Int. J. Agron.* 2017, 2017, 3158207.
- Wang, T., Arbestain, M.C., Hedley, M., Bishop, P. Chemical and bioassay characterisation of nitrogen availability in biochar produced from dairy manure and biosolids. *Organic Geochemistry*, v. 51, p. 45–54, 2012.

Wickham et al., (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>

Xu, G.; Fan, X.; Miller, A. J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review Plant Biology*, v. 63, p. 153–182, 2012.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade de N mineral foi afetada pelo tipo de biomassa e características dos biocarvões delas originados, sendo o tipo de solo determinante sobre os teores de N disponível no solo. Ocorreu à liberação de N pela matéria orgânica do solo, por isso, o teor de N disponível, independentemente do tratamento avaliado, é regulado pelo teor de MOS. O maior crescimento e produção de biomassa do milho ocorrem no Latossolo com textura muito argilosa, quando o N mineral é suprido de modo conjugado com os biocarvões de torta de girassol e de casca de camarão.

Para a solução do solo, os níveis de N estão muito acima dos recomendados para o pleno crescimento do milho, a ponto de prejudicar a absorção de outros nutrientes que competem às formas de N mineral. No LVd, predomina na solução o N na forma nítrica, em detrimento do N amoniacal. Já a solução do LTm é rica em N amoniacal, que prevalece sobre o N-nitrato. Após o cultivo do milho, o N mineral residual é relativamente baixo no solo, sendo insuficiente para suprir a demanda nutricional de outra cultura em sucessão, o baixo N residual pode refletir a imobilização de N pelas matrizes carbonizadas,

Os resultados deste estudo lançam luz sobre um tema muito pouco estudado, o efeito da mineralização da matéria orgânica do solo sobre a disponibilidade de N no solo, sinalizando que, em um dos solos, o N disponibilizado, naturalmente, é suficiente para atender a demanda nutricional do milho pelo nutriente, o que pode ter consequências sobre o efeito dos tratamentos testados.