

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

DJALMA SILVA PEREIRA

USO DE LEGUMINOSAS NA LIBERAÇÃO DE FÓSFORO FIXADO NO SOLO

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

DJALMA SILVA PEREIRA

EFICIÊNCIA DE LEGUMINOSAS NA CICLAGEM DE FÓSFORO DO SOLO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de Doctor Scientiae.

Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud
Schaefer

Coorientadores: Raphael F. Alves Bragança
Davi Lopes do Carmo

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

P436u
2021

Pereira, Djalma Silva, 1993-
Uso de leguminosas na liberação de fósforo fixado no solo /
Djalma Silva Pereira. - Viçosa, MG, 2021.
87 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Fósforo - Biodisponibilidade. 2. Leguminosa - Efeito do fósforo. 3. Adsorção. 4. Mineralização. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 633.3

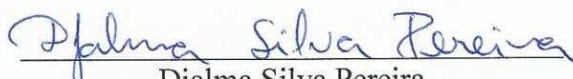
DJALMA SILVA PEREIRA

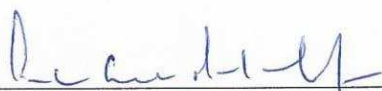
USO DE LEGUMINOSAS NA LIBERAÇÃO DE FÓSFORO FIXADO NO SOLO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 14 de maio de 2021.

Assentimento:


Djalma Silva Pereira
Autor


Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer
Orientador

**À minha mãe Ana Lúcia.
DEDICO**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois sem Ele nada eu teria conquistado. Agradeço a Ele por ter me dado forças e perseverança, além de conhecimento, sabedoria e discernimento. A Deus toda honra e glória pela realização deste sonho.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade de estudo e por toda infraestrutura que tive acesso durante o período de doutoramento.

Agradeço à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro e a concessão das bolsas de estudo, sem as quais não seria possível a realização do meu doutorado.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Liovando da Costa, por toda a contribuição e suporte ao longo desses quatro longos anos. Agradeço pelos ensinamentos, pelas conversas, pela amizade e, principalmente, pelo apoio na condução de toda a minha pesquisa e pela confiança construída. Agradeço também ao meu coorientador, Davi Lopes, por todo apoio e suporte sempre quando eu precisei, além da amizade construída desde a época do meu mestrado. Agradeço ao Carlos Schaefer por ter aceitado me orientar na reta final do doutorado e por ser compreensivo e atencioso. Também agradeço a todos os orientadores que tive desde a graduação até o presente momento (Thais Emanuelle, Francisco Alisson, Rafaela Nóbrega, Rogério Lana), pois cada um deles contribuíram para o meu crescimento profissional e acadêmico.

Agradeço muito à minha família, não só pela força e incentivo, mas também por entenderem e suportarem minha ausência. Agradeço especialmente à minha mãe por todo amor, dedicação e orações. Se não fosse pela presença dela em minha vida, muito provavelmente, eu não teria chegado até aqui. Muito obrigado por tudo, meus familiares (pais, tios e tias, vó, irmã, primos).

Agradeço imensamente pela presença do Wallace Costa, meu namorado, e de toda a sua família em minha vida, especialmente sua mãe, Fátima. Eles me deram carinho, amor e atenção quando sempre precisei e eles são a minha família aqui em Viçosa. Um agradecimento especial ao Wallace pelo companheirismo e apoio durante todo esse tempo. Inclusive, agradeço a ele pela ajuda no meu experimento em casa de vegetação.

Agradeço a Ana Caroline, minha companheira de experimentos, bolsista de iniciação científica. Sem a ajuda dela tudo ficaria tão difícil, mas graças a Deus tive a ajuda, o apoio e a amizade dessa pessoa tão especial e dedicada.

Agradeço aos meus amigos, não só pela amizade e pelo companheirismo, mas principalmente por proporcionarem um escape da rotina corrida e estressante da pós graduação. Quero agradecer principalmente a Leo e Cadu, meus grandes amigos que Viçosa me deu. Mas também não posso deixar de esquecer dos velhos amigos, que mesmo distantes me deram a companhia e o apoio que eu precisei. Meu muito obrigado especialmente para Yanna Karoline, Vivi Santos, Thais Silva e Gilca Veloso.

Agradeço também a todos os amigos e colegas do Departamento de Solos, os quais dividi momentos dentro e fora da Universidade. Agradeço especialmente à Anna Carolyn, Gêssica, Jonatas, Ricardo, Christiane, Valéria, Taís, Patrícia Barros, Patrícia Matias, Esio, Nancy, Anaclaúdia, Gaston, André, Francis.

Agradeço a todos os professores que tive durante toda a minha trajetória (desde a educação infantil até o doutorado), pois cada um deles contribuíram para minha formação profissional, acadêmica e pessoal. Quero agradeço especialmente aos professores do Departamento de Solos, que de alguma forma contribuíram com o meu doutoramento: Liovando Costa, Raphael Fernandes, Irene Cardoso, João Ker, Genelício Rocha, Igor Rodrigues, Emanuelle Barros.

Agradeço aos técnicos de laboratório que me auxiliaram nas minhas análises, especialmente Jorge (Geoquímica), mas não posso deixar de mencionar Mariana (Agroecologia), Claudinho e Evaldo (Física do Solo), João e Umberto (LIE), Carlos e Marcos (Fertilidade), Poliana (Solos Florestais), Genilson e Zélia (Metais traços), Geovane (Rotina). Agradeço também a todos os funcionários do Departamento de Solos e da Secretaria da Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas por todo apoio e suporte.

E por fim, mas não menos importante, quero agradecer a cidade de Viçosa por ser tão amável e acolhedora. Não tem como não amar essa cidade viciosa. Aqui passei momento incríveis e inesquecíveis, que fazem parte da história da minha vida.

Meu muito obrigado a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, pela minha obtenção do título de Doutor em Solos e Nutrição de Plantas. Não tenho como mencionar todo mundo, mas que Deus possa recompensar a todos que me ajudaram na conquista deste sonho incrível.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**"Se eu contar tudo o que eu passei, vocês não acreditariam. Às vezes nem eu acredito.
Eu quero muito agradecer a mim, porque eu não desisti."
(Anitta, Rock in Rio 2019)**

RESUMO

PEREIRA, Djalma Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2021. **Uso de leguminosas na liberação de fósforo fixado no solo.** Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Coorientadores: Raphael Fernandes Alves Bragança e Davi Lopes do Carmo.

As demandas por adubos fosfatados são elevadas na agricultura e as reservas minerais de fosfato são finitas. Nesse sentido, estudos visando obter formas alternativas de disponibilizar o fósforo (P) às plantas têm sido constantes. Assim, é relevante a investigação do potencial de plantas em recuperar P não lábil dos solos, mediante a melhor absorção deste elemento de forma pouco disponível. Objetivou-se avaliar o potencial de leguminosas em absorver o P fixado no solo visando aumentar a disponibilidade deste elemento para a cultura subsequente. A tese foi dividida em três capítulos. No capítulo 1 foi avaliada a disponibilidade de P, utilizando os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3, nos seguintes solos: Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico (CXbd), Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf) e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm). Os solos LVwf e RLM apresentaram altos teores de P total, decorrentes, principalmente, do material de origem rico em apatita. Entretanto, os teores de P disponível, tanto pelo Mehlich-1 como pelo Mehlich-3, foram baixos em quase todos os solos, com exceção do RLM. A partir desses resultados, dois solos com teores contrastantes de P disponível (RLm e LVwf) foram selecionados para a condução dos ensaios do capítulo 2, cujo objetivo foi avaliar o crescimento inicial, a dinâmica de decomposição e as taxas de mineralização de P em quatro espécies de leguminosas (crotalária juncea, guandu anão, feijão-de-porco e mucuna preta). As leguminosas feijão-de-porco e mucuna preta apresentaram maior crescimento e produção de biomassa em solos com baixa disponibilidade de P. O feijão-de-porco apresentou a maior taxa de decomposição e o guandu anão a menor, ao final de 60 dias de incubação; enquanto a crotalária juncea apresentou os maiores conteúdos de P, no início e ao final da incubação, e maior mineralização de P. O capítulo 3 teve por objetivo avaliar o crescimento de mudas de café e a sua eficiência de uso de P em solos com diferentes disponibilidades de P (RLm e LVwf) após o cultivo das leguminosas. As mudas de café apresentaram maior crescimento e maiores teores e conteúdos de nutrientes na parte aérea quando cultivadas no solo com maior disponibilidade de P, e após o pré-cultivo com leguminosas, com destaque para o crotalária juncea e feijão-de-porco. Diante dos resultados obtidos nesta tese pode-se concluir que as

leguminosas crotalária juncea e feijão-de-porco apresentaram maior potencial para o cultivo visando a absorção e mineralização de P no solo.

Palavras-chave: Adsorção de fosfato. Biodisponibilidade de fósforo. Fixação de fósforo. Mineralização de fósforo.

ABSTRACT

PEREIRA, Djalma Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2021. **Use of legumes to release phosphorus fixed in the soil.** Adviser: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Co-advisers: Raphael Fernandes Alves Bragança and Davi Lopes do Carmo.

Demand for phosphate fertilizers is high in agriculture and mineral phosphate reserves are finite. In this sense, studies aiming at obtaining alternative ways of making phosphorus (P) available to plants have been constant. Thus, it is relevant to investigate the potential of plants to recover non-labile P from the soil, through the better absorption of this element in an unavailable form. The objective was to evaluate the potential of legumes to absorb the P fixed in the soil in order to increase the availability of this element for the subsequent crop. The thesis was divided into three chapters. In chapter 1, the availability of P was evaluated, using the Mehlich-1 and Mehlich-3 extractors, in the following soils: Typical Dystrophic Litholytic Entisol (RLd), Typical Dystrophic Red Oxisol (LVd), Typical Dystrophic Tb Hapludox Inceptisol (CXbd), Typical Acriferic Red Oxisol (LVwf), and Typical Chernossolic Litholytic Entisol (RLm). The LVwf and RLm soils showed high levels of total P, mainly due to the parent material. However, the levels of available P, for both Mehlich-1 and Mehlich-3, were low in almost all soils, with the exception of RLm. From these results, two soils with contrasting levels of available P (RLm and LVwf) were selected to conduct the tests in Chapter 2, whose objective was evaluate initial growth, decomposition dynamics and P mineralization rates in four legume species (*Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, and *Mucuna aterrima*). *Canavalia ensiformis* and *Mucuna aterrima* showed higher growth and biomass production in soils with low P. availability. *Canavalia ensiformis* showed the highest decomposition rate and dwarf *Cajanus cajan* the lowest, at the end of 60 days. incubation; while *Crotalaria juncea* presented the highest P content, at the beginning and end of the incubation, and the highest P mineralization. The purpose of chapter 3 was to assess the growth and efficiency of use of P in coffee seedlings in soils with different availability of P (RLm and LVwf) after the cultivation of legumes were also evaluated. The coffee seedlings showed greater growth and higher contents and content of nutrients in the aerial part when cultivated in the soil with greater availability of P and after pre-cultivation with legumes, with emphasis on *Crotalaria juncea* and *Canavalia ensiformis*. In view of the results obtained in this thesis, it can be concluded that the leguminous *crotalaria juncea* and hog beans showed greater potential for cultivation aiming at the absorption and mineralization of P in the soil.

Keywords: Phosphate adsorption. Phosphorus bioavailability. Phosphorus fixation. Phosphorus mineralization.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERÊNCIAS	15
OBJETIVOS	18
HIPÓTESE	18
REFERENCIAL TEÓRICO	19
REFERÊNCIAS	27
CAPÍTULO 1. DISPONIBILIDADE E FRACIONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS COM CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DISTINTAS	
RESUMO	30
INTRODUÇÃO	31
MATERIAL E MÉTODOS	33
RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	43
CAPÍTULO 2. CRESCIMENTO INICIAL, DECOMPOSIÇÃO E MINERALIZAÇÃO DE FÓSFORO EM LEGUMINOSAS	
RESUMO	46
INTRODUÇÃO	47
MATERIAL E MÉTODOS	49
RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS	63
CAPÍTULO 3. CRESCIMENTO DE MUDAS DE CAFEIEIRO APÓS O CULTIVO DE LEGUMINOSAS EM SOLOS COM TEORES CONTRASTANTES DE FÓSFORO	
RESUMO	67
INTRODUÇÃO	69
MATERIAL E MÉTODOS	70
RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS	83
CONCLUSÕES GERAIS	87

1 Introdução geral

Os solos tropicais muito intemperizados, como a maioria dos solos brasileiros, possuem alta capacidade de adsorção de fósforo (P), reduzindo sua disponibilidade às plantas. A baixa disponibilidade é devido à forte interação dos fosfatos com a fase sólida do solo, o qual pode ser adsorvido ou precipitado, tornando-se pouco solúvel e pouco disponível para as plantas. A retenção do P adicionado ao solo ocorre tanto pela precipitação em solução com formas iônicas de ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca), como pela sua adsorção, principalmente aos oxihidróxidos de Fe e Al, presentes em maiores quantidades nos solos mais intemperizados, de modo particular nos mais argilosos (NOVAIS, SMITH, 1999).

Diante deste cenário, a agricultura brasileira tem um grande desafio de manter os níveis de P no solo adequados para garantir produtividades satisfatórias das culturas de interesse econômico. De acordo com Raij (2011), em solos muito deficientes em P são comuns aplicações elevadas deste nutriente, para que possa atingir um nível de disponibilidade que permita classificar o solo como não deficiente. Estima-se que 75% do P aplicado no solo seja perdido ou retido nas partículas sólidas, o que contribui para o seu acúmulo em solos cultivados (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006).

As áreas agrícolas brasileiras receberam mais fertilizantes fosfatados do que o requerido para as necessidades das culturas desde 1970 e, portanto, acumularam reservas de P no solo (WITHERS et al., 2018). Estima-se que se a quantidade de P acumulado nos solos agrícolas pudesse ser disponibilizada para as plantas, seria suficiente para sustentar a produção agrícola mundial por cerca de cem anos (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006).

Há uma preocupação crescente sobre quanto tempo a sociedade poderá contar com suprimentos de fertilizantes fosfatados, que são limitados aos depósitos de rocha fosfática, não havendo nenhum substituto conhecido (ELSER, BENNETT, 2011). Segundo Gilbert (2009), há uma estimativa de que as reservas mundiais devem durar cerca de 125 anos, que, segundo o autor, é algo otimista em relação a outros que preveem um esgotamento mais rápido das reservas de fosfato, devido ao crescimento na demanda por fertilizantes.

As reservas minerais de fosfato são finitas e as demandas por adubos fosfatados são elevadas na agricultura. Isso põe em dúvida a sustentabilidade do uso atual de fertilizantes fosfatados em países desenvolvidos e emergentes (HINSINGER et al., 2011). Neste sentido, a disponibilidade de P para as culturas tem sido objeto de preocupação social significativa, principalmente pelo fato de as rochas fosfáticas serem um recurso natural não renovável e por

não haver substitutos para as fontes não renováveis de P no contexto da nutrição das plantas (SILVA et al., 2011; BAVEYE, 2015).

O aumento do uso de fertilizantes fosfatados é impulsionado pelo crescimento da população global, que exigirá intensificação agrícola para a crescente demanda mundial de alimentos nas próximas décadas, pelo menos até 2050, de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (GILBERT, 2009; ROY et al., 2016). O crescimento acelerado e contínuo da população global nas próximas décadas deve elevar a demanda de alimentos em geral, frente a isso, o Brasil é um importante produtor mundial de alimentos (SAATH, FACHINELLO, 2018).

O Brasil é responsável por aproximadamente 25% das terras de cultivo global que apresentam elevada capacidade de adsorção de P, ainda assim, produz a maioria das grandes culturas globais, como soja, milho, cana-de-açúcar e arroz (ROY et al., 2016). Em longo prazo, os sistemas agrícolas brasileiros devem ser redesenhados para operar de forma lucrativa, porém mais sustentável, sob menores níveis de fertilidade do solo, adequando-se ao uso sustentável de P e tendo maior resiliência nos sistemas de produção de alimentos para reduzir a demanda deste elemento (WITHERS et al., 2018).

O cenário atual de escassez de fosfato exige que haja medidas alternativas para o aproveitamento de P na agricultura. Como as reservas de fosfato conhecidas são finitas, quaisquer estratégias que prolonguem seu uso terão grande impacto para a existência humana no planeta (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006). Algumas práticas de manejo têm sido propostas com o objetivo de aumentar a disponibilidade de P para as plantas e a recuperação de P fixado pelo solo. Uma prática que resulta em aumento na recuperação de P do solo é a implantação de um sistema de rotação de culturas, incluindo espécies com alta eficiência em extrair e utilizar o P (SILVA et al., 2011).

As espécies vegetais desenvolvem estratégias fisiológicas para conviver com a baixa disponibilidade de P no solo, assim, mesmo em solos com baixa disponibilidade de P, haverá espécies com mais habilidade em absorvê-lo em quantidades que garantam seu desenvolvimento (CASALI et al., 2016). As principais estratégias utilizadas pelas plantas para interceptar e absorver P são: aumento da relação entre a raiz e a parte aérea, exsudação radicular de enzima fosfatase ácida ou compostos orgânicos de baixo peso molecular e associação com outros microrganismos (RHEINHEIMER et al. 2019). Esses mecanismos variam com a espécie vegetal (SOLTANGHEISI et al., 2018), desta forma é fundamental a identificação daquelas com maior potencial de absorver e mineralizar o P do solo em condições de baixa

disponibilidade, principalmente as que podem ser utilizadas como plantas de cobertura (CASALI et al., 2016).

Diante disto, torna-se relevante a identificação de espécies vegetais com maior potencial de absorverem o P de menor labilidade do solo, principalmente as que podem ser utilizadas comercialmente ou como plantas de cobertura e adubos verdes (CASALI et al., 2016). De acordo com Nziguheba e Bünemann (2005), os adubos verdes podem aumentar a disponibilidade de P em duas circunstâncias: durante seu crescimento, pela modificação das propriedades do solo e mobilização de P; e pela decomposição da sua biomassa, quando o P orgânico é mineralizado. Segundo Talgre et al. (2014), a decomposição de resíduos de adubo verde desempenha um papel fundamental na circulação de nutrientes dos ecossistemas, que contribui com a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Portanto, o retorno de resíduos de culturas ao solo é importante no ciclo do P (LUPWAYI et al., 2007).

Entre as várias espécies de famílias botânicas que podem ser cultivadas como adubos verdes, destacam-se aquelas da família Fabaceae (TEODORO et al., 2011), que têm como particularidade o fato de formarem associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio (N) (PERIN et al., 2010). O uso de leguminosas como adubo verde pode ser uma alternativa para sistemas agrícolas, devido à sua capacidade de incorporar quantidades significativas de nutrientes, além do N (PEREIRA et al., 2016).

Entretanto, poucos estudos têm focalizado as interações entre leguminosas e o P do solo (HINSINGER et al., 2011), embora tais espécies têm demonstrado eficiência na aquisição deste elemento (GIACOMINI et al., 2003; COSTA, LOVATO, 2004; PÉREZ, 2007; TALGRE et al., 2014). Portanto, o cultivo de leguminosas pode contribuir para a recuperação do P não lábil dos solos e torná-lo mais acessível para as culturas subsequentes.

Diante do exposto, torna-se necessário investigações científicas para conhecer a eficiência e o potencial de tais espécies em absorver e aumentar a disponibilidade de P no solo mediante a sua mineralização.

Referências

- BAVEYE, P. C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 637-642, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140819
- CASALI, C. A.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. D.; CALEGARI, A.; PICCIN, R. Benefícios do uso de plantas de cobertura de solo na ciclagem de fósforo. In: TIECHER, T. (Ed.) **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2016. p. 23–33.
- COSTA, M. D.; LOVATO, P. E. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 603-605, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004000600013
- ELSER, J.; BENNETT, E. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 29, 2011. DOI: 10.1038/478029a
- GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HÜBNER, A. P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E. B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1097-1104, 2003. DOI: 10.1590/S0100-204X2003000900011
- GILBERT, N. Environment: the disappearing nutrient. **Nature News**, v. 461, n. 7265, p. 716-718, 2009. DOI: 10.1038/461716a
- HINSINGER, P.; BETENCOURT, E.; BERNARD, L.; BRAUMAN, A.; PLASSARD, C.; SHEN, J.; XIAOYAN, T.; FUSUO, Z. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 1078-1086, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175331
- LUPWAYI, N. Z.; CLAYTON, G. W.; O'DONOVAN, J. T.; HARKER, K. N.; TURKINGTON, T. K.; SOON, Y. K. Phosphorus release during decomposition of crop residues under conventional and zero tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 95, n. 1-2, p. 231-239, 2007. DOI: 0.1016/j.still.2007.01.007
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA, Lavras, 2006.
- NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J. **Fósforo em solo e planta sob condições tropicais**. Raleigh: Universidade Federal de Viçosa – North Carolina State University, 1999. 399p.
- NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E. K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Ed.) **Organic phosphorus in the environment**. cap. 11, 2005. p. 243-268.
- PEREIRA, N. S.; SOARES, I.; MIRANDA, F. R. D. Decomposition and nutrient release of leguminous green manure species in the Jaguaribe-Apodi region, Ceará, Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, n. 6, p. 970-975, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20140468

PÉREZ, M. J. Eficiencia de algunas leguminosas en la utilización de fósforo proveniente de rocas fosfóricas. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 24, n. 1, p. 113-132, 2007.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; CABALLERO, S. S. U.; GUERRA, J. G. M.; GUSMÃO, L. A. Acúmulo e liberação de P, K, Ca e Mg em crotalaria e milho solteiros e consorciados. **Ceres**, v. 57, n. 2, 2015. DOI: 10.1590/S0034-737X2010000200020

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RHEINHEIMER, D. S.; FORNARI, M. R.; BASTOS, M. C.; FERNANDES, G.; SANTANNA, M. A.; CALEGARI, A.; CANALLI, L. B. S.; CANER, L.; LABANOWSKI, J.; TIECHER, T. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil & Tillage Research**, v. 192, p. 33-41, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.04.018

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; DELLA COLETTA, L.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature plants**, v. 2, n. 5, p. 16043, 2016. DOI: 10.1038/nplants.2016.43

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195-212, 2018. DOI: 10.1590/1234-56781806-94790560201

SILVA, T. O.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; PALUDO, V. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 4, 2011. DOI: 10.5433/1679-0359.2011v32n4p1315

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2018.01.006

TALGRE, L.; LAURINGSON, E.; ROOSTALU, H.; MAKKE, A. Phosphorus and potassium release during decomposition of roots and shoots of green manure crops. **Biological agriculture & horticulture**, v. 30, n. 4, p. 264-271, 2014. DOI: 10.1080/01448765.2014.953582

TEODORO, R. B.; OLIVEIRA, F. L. D.; SILVA, D. M. N. D.; FÁVERO, C.; QUARESMA, M. A. L. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Alto Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 35, v. 1, p. 635-643, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200032

WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of

phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 25-37, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-20887-z

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de leguminosas em absorver o P fixado no solo visando aumentar a disponibilidade deste elemento para a cultura subsequente.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a disponibilidade de P, utilizando os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3, e diferentes formas de P inorgânico em cinco classes de solos (Capítulo I);
- Avaliar o crescimento inicial, a dinâmica de decomposição e as taxas de mineralização de P em quatro espécies de leguminosas (Capítulo II);
- Avaliar o crescimento e a eficiência de uso de P em mudas de cafeeiro cultivadas em solos com diferentes disponibilidades de P após o cultivo de leguminosas (Capítulo III).

3 Hipótese

As leguminosas apresentam mecanismos que favorecem o aumento de absorção do P fixado no solo de forma diferenciada entre espécies distintas, contribuindo para o aumento da disponibilidade deste elemento para as culturas subsequentes.

4 Referencial teórico

4.1 Fósforo no solo

De acordo com Gatiboni et al. (2013) o fósforo (P) do solo é encontrado em forma inorgânica (íon fosfato na solução do solo, P estrutural dos minerais primários, P precipitado com compostos inorgânicos e P adsorvido aos colóides do solo) e orgânica (P da biomassa microbiana e P da matéria orgânica do solo). Em solos jovens e nos moderadamente intemperizados ainda ocorre P em minerais primários, mas a maior parte deste elemento se encontra na forma orgânica (Po), ou na forma mineral (Pi), adsorvida fracamente aos minerais secundários; nos solos altamente intemperizados predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente (RHEINHEIMER et al., 2008).

Os minerais primários fosfatados comuns em rochas são as apatitas, de onde são liberados durante a intemperização (RHEINHEIMER et al., 2008). O P da solução do solo está na forma de íons ortofosfato, formas derivadas do ácido ortofosfórico (H_3PO_4), o qual dissocia-se em solução em função do pH do solo, formando o íon ortofosfato biácido monovalente ($H_2PO_4^-$), em pH ácido, e o ortofosfato monoácido bivalente (HPO_4^{2-}), a partir de pH 6 (RAIJ, 2011).

O Pi pode ser encontrado adsorvido aos oxihidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), aos grupos funcionais silanol e aluminol das arestas das argilas silicatadas e à matéria orgânica do solo através de pontes de cátions (RHEINHEIMER et al., 2008). O Pi precipitado com Fe e Al predominam em solos ácidos, enquanto que em solos alcalinos e, ou com altos teores de cálcio (Ca), predominam os fosfatos de Ca (RAIJ, 2011).

O Po pode constituir de 5 a 80% do P total do solo, a grande variedade de compostos orgânicos no solo faz com que mais da metade das formas de Po ainda não tenham sido identificadas; as principais formas já identificadas são os fosfatos de inositol, que compõem de 10 a 80% do Po total, os fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteresfosfato (>5%) (RHEINHEIMER et al., 2008).

4.2 Adsorção e precipitação de fósforo

A adsorção compreende as reações de natureza química ou física que ocorre em interfaces, em que o adsorvente fixa o adsorvato (NOVAIS, SMYTH, 1999). No solo, a adsorção de fosfato ocorre principalmente aos oxihidróxidos de Fe e Al, mas pode ocorrer também, em

menor proporção, aos minerais argilossilicatados e à matéria orgânica. A adsorção aos oxihidróxidos de Fe e Al ocorre, inicialmente por uma atração eletrostática, seguida pela ligação covalente, por meio de trocas de ligante; as bordas das argilas silicatadas apresentam grupamentos OH e, ou, OH_2^+ , que, dependendo do pH do meio, proporcionam mecanismos de adsorção semelhante aos oxihidróxidos de Fe e Al; a matéria orgânica do solo pode apresentar pontes de cátions, como Al, Fe e Ca, conferindo o seu caráter aniônico, adsorvendo fosfato (NOVAIS, SMYTH, 1999).

De acordo com maior ou menor grau de estabilidade, os compostos fosfatados são enquadrados como fosfatos lábeis e não-lábeis (RHEINHEIMER et al., 2008). Nos compartimentos de maior labilidade predominam ligações com menor energia entre o P e o adsorvente, como as monodentadas, enquanto que as ligações de maior energia prevalecem nos compartimentos de menor labilidade, como as ligações bidentadas e binucleadas (GATIBONI et al., 2013). Nas ligações monodentadas um oxigênio do fosfato é ligado ao metal do colóide, nas ligações bidentadas dois oxigênios do fosfato ligam-se ao metal e nas binucleadas ocorre a ligação de dois oxigênios do fosfato com dois átomos do metal do colóide do solo (RHEINHEIMER et al., 2008).

A matéria orgânica pode reduzir a adsorção de P, de maneira mais significativa do que contribui para maior adsorção, devido a presença de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como malato, oxalato e citrato, que bloqueiam os sítios de adsorção de fosfato (NOVAIS, SMYTH, 1999).

A precipitação é uma reação entre íons com a formação de uma nova fase ou composto de baixa solubilidade (NOVAIS, SMYTH, 1999). Em solos ácidos, predominam os fosfatos de Fe e Al, enquanto que em solos alcalinos predominam os fosfatos de Ca (RAIJ, 2011). Considerando a labilidade desses compostos fosfatados, a ordem de maior labilidade é P-Al>P-Fe>P-Ca (NOVAIS, SMYTH, 1999).

4.3 Avaliação da disponibilidade de fósforo

As plantas absorvem o P da solução do solo, no entanto, devido à dificuldade de extrair a solução do solo, não é realizada a determinação do P em solução. Além disso, os teores de P em solução são muito baixos, muitas vezes inferior a $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ de P, decorrente da baixa solubilidade dos compostos fosfatados e da alta capacidade de adsorção do elemento pelas partículas do solo (RAIJ, 2011). Por isso, os métodos de avaliação da fertilidade do solo

procuram estimar a porção de P lábil passível de repor o P da solução, para prever a necessidade de suplementação do nutriente (RHEINHEIMER et al., 2008).

O P lábil está em equilíbrio rápido com o P da solução, enquanto o P não lábil, responsável pela maior parte do P_i do solo, é representado por compostos insolúveis e que só lentamente podem transformar-se em fosfatos lábeis (NOVAIS, SMYTH, 1999; RAIJ, 2011). A fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando ele é absorvido por plantas ou por microrganismos; desta forma a avaliação do P disponível é feita, geralmente, com o uso de soluções extratoras ou agentes de troca iônica, que visam quantificar as formas capazes de repô-lo à solução do solo após absorção pelas plantas (RHEINHEIMER et al., 2008).

O P lábil, ao longo do tempo, passa gradativamente para a fração de P não-lábil, o que é definido por Novais e Smyth (1999) como “envelhecimento de fosfato”, o qual, segundo os autores, ocorre devido à ocorrência de duas ligações coordenadas com a superfície adsorvente. A formação de compostos binucleados ou ainda a penetração do fosfato nas imperfeições do mineral cristalizado resulta em maior estabilidade e menor possibilidade de desorção do fosfato (RHEINHEIMER et al., 2008).

Devido a tendência de converter-se em formas estáveis no solo, é preciso conhecer as formas de P e o seu comportamento no solo, para um aproveitamento mais racional deste elemento (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006). Para o entendimento mais amplo das transformações de P no solo, foram desenvolvidos métodos para quantificar não apenas o P lábil, mas também as formas de menor labilidade (GATIBONI et al., 2013). Neste sentido, os fracionamentos de P constituem uma importante ferramenta para avaliar as diferentes formas de P no solo, que apresentam diferentes graus de labilidade.

Os métodos de fracionamento de P do solo têm como pressuposto a extração sequencial em uma amostra de solo com uma série de reagentes ou soluções extratoras com seletividade para dissolver suas diferentes formas, com base na natureza do composto fosfatado e da energia de ligação com o solo (GATIBONI et al., 2013). No Brasil, destacam-se os métodos de Chang e Jackson (1957), para o fracionamento de P_i , e de Hedley et al. (1982), para o fracionamento de P_o e P_i .

4.4 Extratores químicos

Dentre os extratores existentes para a determinação do P disponível, os laboratórios de análises de solo no Brasil utilizam com mais frequência o Mehlich-1 (M1) e a resina trocadora

de ânions (RTA) (RHEINHEIMER et al., 2008). Em Minas Gerais, utiliza-se o extrator M1 como o método oficial (ROGERI et al., 2017).

A solução de M1, proposta na década de 50 para extração de P em solos ácidos (MEHLICH, 1953), é composta de uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações (H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ e HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$), com pH entre 2 e 3. A extração de P ocorre pela dissolução ácida dos compostos fosfatados de fraca energia pelo íons de H^+ , sendo maior a extração de P-Ca, seguida de P-Al e, por último, P-Fe; o princípio do método é a dissolução ácida, porém um efeito secundário de troca iônica nos sítios de adsorção também ocorre, no caso, do íon sulfato (SO_4^{2-}) pelo fosfato (RHEINHEIMER et al., 2008). Em solos ácidos e ricos em oxihidróxidos de Fe e Al e em caulinita, como a maioria dos solos brasileiros, há predomínio das formas de P ligado a Fe e Al, dessa forma, extratores ácidos, como o M1, não deveriam ser a melhor opção para extrair P de tais solos (RAIJ, 2011).

Esse extrator sofre diversas críticas em razão de subestimar as quantidades de P extraídas em solos argilosos e de superestimar em solos adubados com fosfato natural. A maioria dos solos brasileiros é altamente intemperizado, com altos teores de oxihidróxidos de Fe e Al predominante na fração argila, e com alto conteúdo destes, ocorre diminuição da capacidade extrativa do método (BORTOLON et al., 2009).

Para eliminar os problemas e algumas desvantagens da solução de M1 foi proposto por Mehlich (1984) o extrator Mehlich-3 (NH_4F $0,015 \text{ mol L}^{-1}$ + CH_3COOH $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ + NH_4NO_3 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ + HNO_3 $0,013 \text{ mol L}^{-1}$ + EDTA $0,001 \text{ mol L}^{-1}$) para uso em solos ácidos e solos que receberam fosfatos naturais (GONÇALVES et al., 2012). O princípio do método se baseia na dissolução ácida e na presença de agentes complexantes (BORTOLON et al., 2009). A adoção de uma nova metodologia para estimar a disponibilidade de um elemento para as plantas deve estar respaldada numa ampla calibração de campo, onde os teores extraídos são correlacionados com o desempenho das plantas. O extrator Mehlich-3 apresenta grande potencial para substituir, futuramente, o M1, mas para isso é preciso a realização de experimentos de calibração de campo usando o método (MUMBACH et al., 2018).

A utilização de resina como extrator foi inicialmente proposto por Amer et al. (1955). O método da RTA tem sido utilizado para extração de vários elementos químicos do solo. As resinas são materiais sintéticos de alta massa molecular constituídas de uma matriz polimérica com grupos funcionais responsáveis pela troca de íons; o princípio da extração do fósforo pela RTA é a sua remoção contínua da solução pela troca com o bicarbonato ou cloreto da resina, criando um gradiente de concentração que força a saída da superfície dos colóides, até que seja alcançado um equilíbrio eletroquímico entre o solo e a RTA (RHEINHEIMER et al., 2008).

Este método é o que mais se assemelha com a absorção de P pelas plantas, pois à medida que o P vai sendo absorvido da solução do solo, há dissolução do P lábil para manter o equilíbrio (RAIJ, 2011).

4.5 Fósforo na planta

Um elemento pode ser interceptado pela raiz de uma planta em sua trajetória de crescimento (interceptação radicular). Contudo, para o P essa contribuição é pequena em relação à que se obtém por via de transporte por difusão na solução do solo em direção à superfície da raiz (NOVAIS, SMYTH, 1999). A difusão é o principal mecanismo de absorção de P pelas plantas, principalmente devido à sua baixa mobilidade no solo.

O P é absorvido do solo pelas plantas preferencialmente como H_2PO_4^- , após a absorção é quase imediatamente incorporado em compostos orgânicos como PO_4^{3-} , diferentemente do que acontece no solo, o P apresenta alta mobilidade na planta (RAIJ, 2011). O fosfato é incorporado em uma variedade de compostos orgânicos (açúcares-fosfatos, fosfolipídios, nucleotídeos, entre outros), e participa de processos importantes na planta, tais como fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia (componente da adenosina trifosfato - ATP), divisão celular etc. (TELES, 2014).

Em quantidades adequadas estimula o desenvolvimento radicular, é essencial para a boa formação dos frutos e sementes e incrementa a precocidade da produção; a deficiência do elemento tem efeitos drásticos em retardar o crescimento da planta e em algumas plantas ocorre a coloração avermelhada dos talos, devido ao aumento de antocianina; o excesso de P não é um problema para as plantas, já que o “consumo de luxo” é transferido para polifosfatos e outros fosfatos, sem afetar o crescimento das plantas (RAIJ, 2011).

Embora o P seja classificado como um macronutriente primário, os teores deste elemento nas plantas são bem mais baixos em relação aos outros macronutrientes primários (nitrogênio e potássio), não ultrapassando 5 g kg^{-1} (RAIJ, 2011). Entretanto, é o nutriente que mais limita a produtividade das culturas.

4.6 Mecanismos das plantas para acessar o fósforo

Plantas de crescimento muito rápido e sistema radicular pouco desenvolvido aproveitam mal o P do solo e necessitam de teores disponíveis elevados para o seu bom desenvolvimento (RAIJ, 2011). De modo geral, as plantas desenvolvem diferentes estratégias e mecanismos

fisiológicos para absorver o P do solo, evidenciando que existem espécies que são capazes de adquirir esse elemento de frações que não estão disponíveis (TELES, 2014). Entre os principais mecanismos, destacam-se aumento da relação raiz/parte aérea, mecanismos enzimáticos especializados, exsudação radicular de compostos orgânicos ou fosfatases e associações micorrízicas ou com outros microrganismos que solubilizam fosfato (CASALI et al., 2016). A presença de microrganismos na rizosfera, geralmente, facilita a absorção de P, pois, além de aumentar sua disponibilidade, podem aumentar sua absorção e acessibilidade por meio de vários mecanismos (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006).

Mudanças morfológicas que promovem o aumento da quantidade e tamanho das raízes são estratégias que ajudam, de maneira significativa, na absorção de P. Como o P é um nutriente pouco móvel no solo, quanto maior o volume explorado pelas raízes, maior também será o acesso à fração disponível (TELES, 2014). O volume e a morfologia da raiz determinam, em grande parte, o conjunto de P prontamente acessível às plantas (HINSINGER et al., 2011).

A exsudação de ácidos orgânicos, como citrato, malato e fumarato, pelas raízes de plantas de cobertura tem sido foco de muitos estudos nos últimos anos. Esses ácidos tem a capacidade de interagir com a fase sólida do solo, ocupando sítios de adsorção do fosfato, possibilitando, assim, que o P fique mais disponível em solução (TELES, 2014). Os ácidos orgânicos também formam complexos organometálicos estáveis com Fe e Al em uma ampla faixa de pH do solo (pH 4,0-7,0), o que pode diminuir a precipitação de P ligada a esses elementos na solução do solo (TELES et al., 2017).

Os microrganismos são a principal fonte de enzimas mineralizadoras de fosfato, como as fosfatases. A síntese e a atividade das fosfatases microbianas são reprimidas em condições de alto P e estimuladas em condições limitantes (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006). Os autores completam que isso permite aos microrganismos absorver o P mesmo em condições de baixa disponibilidade, acumulando em sua massa e, ao final do seu ciclo, mineralizando e disponibilizando. Esse processo é de grande importância para plantas cultivadas em condições de deficiência de P. As plantas também produzem enzimas fosfatases ácidas, as quais são liberadas pelas raízes e hidrolisam o Po do solo (LI et al., 2014).

A solubilização de P também pode resultar da produção de gás carbônico (CO_2) e de ácidos orgânicos da mineralização do carbono orgânico e da produção de enzimas e de compostos quelantes e complexantes pela microbiota do solo (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006). O CO_2 transforma-se em ácido carbônico (H_2CO_3), que solubiliza fosfatos de Ca e Mg. Outros mecanismos, como a produção de ácidos inorgânicos (H_2SO_4 e HNO_3), são também importantes na solubilização de fosfatos inorgânicos (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006).

Os microrganismos solubilizadores de fosfato são aqueles capazes de transformar o P insolúvel em formas solúveis, de fácil acesso às plantas (ZHU et al., 2018). Os organismos com potencial de solubilização de fosfato aumentam a disponibilidade de fosfato solúvel e podem melhorar o crescimento da planta indiretamente, aumentando a eficiência ou melhoria da disponibilidade de outros elementos (KHAN et al., 2007). Embora exista maior número de bactérias solubilizadoras em relação aos fungos, estes apresentam maior capacidade de solubilização (MOREIRA, SIQUEIRA, 2006). Diversas bactérias são reconhecidas como solubilizadoras de fosfato, como espécies de *Bacillus* e *Pseudomonas*, entre os fungos as espécies *Aspergillus* e *Penicillium*.

Outra simbiose muito importante é a associação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) com plantas. Nesta simbiose a planta se beneficia pelo aumento da absorção de água e nutrientes, proporcionado pelas hifas fúngicas, que funcionam como extensão do sistema radicular, enquanto o fungo se beneficia pelos fotoassimilados das plantas, que permitem o completo ciclo de vida dos FMAs, que só ocorre em associação com a planta hospedeira (SMITH, READ, 2008). De acordo com Moreira e Siqueira (2006) os FMAs aumentam a absorção de P pelas plantas através de mecanismos físicos (maior exploração do solo pelas raízes), fisiológicos (alterações nos parâmetros cinéticos de absorção) e químicos (alterações na rizosfera).

4.7 Uso de leguminosas para aumentar a disponibilidade de P no solo

As espécies vegetais desenvolvem estratégias fisiológicas para conviver com a baixa disponibilidade de P no solo, assim, mesmo em solos com baixa disponibilidade de P, haverá espécies hábeis em absorvê-lo em quantidades que garantam seu desenvolvimento e que resulte em biomassas vegetais com maior concentração do nutriente, tornando-o fonte de P para os microrganismos do solo e a cultura subsequente (CASALI et al., 2016). Quantidades de P agronomicamente significativas podem estar presentes nos resíduos das culturas e na biomassa microbiana associada à sua decomposição, e a sua contribuição para a nutrição de P dos sistemas de cultivo é significativa (DAMON et al., 2014).

O cultivo de plantas com maior capacidade de absorver e acumular P em rotação de culturas pode ser uma estratégia interessante para aumentar a disponibilidade de P, desta forma, avaliar o acúmulo de P no tecido vegetal é importante para auxiliar na identificação de plantas que apresentem maior capacidade de absorção e maior eficiência de uso dos nutrientes (CASALI et al., 2016). A rotação de culturas pode aumentar a eficiência desse nutriente no

sistema de produção agrícola, pois a cultura seguinte pode usar o P mineralizado após a decomposição dos resíduos da cultura de cobertura (SOLTANGHEISI et al., 2018).

Neste contexto, destacam-se as leguminosas, que são culturas já comumente utilizadas como adubos verdes, cuja importância para a agricultura está associada à ciclagem mais rápida de nutrientes, favorecendo seu uso pela cultura em sequência, principalmente daqueles elementos com potencial de lixiviação, como o nitrogênio e os cátions trocáveis, ou dos que podem ser retidos com relativa facilidade, como o P em solos intemperizados (RODRIGUES et al., 2012). Por meio da adubação verde, o P que é acumulado no tecido vegetal das plantas é liberado para a cultura sucessora, através da decomposição dos resíduos orgânicos (TELES, 2014).

Dentre elas as leguminosas, crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), guandu anão (*Cajanus cajan*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna preta (*Mucuna aterrima*) se destacam pelo potencial de utilização para adubação verde e ciclagem de nutrientes (PEREIRA et al., 2017). De acordo com Padovan et al. (2011) o feijão-de-porco possui grande rusticidade e adapta-se bem a solos ácidos e de baixa fertilidade, porém apresenta maiores biomassa e acúmulo de nutrientes em solos de maior fertilidade. Em solos com reduzidos teores de P também se recomenda o plantio desta cultura (ESPÍNDOLA, GUERRA, ALMEIDA, 1997). A mucuna preta é uma espécie de bom crescimento em solos de baixa fertilidade devido à sua rusticidade (CAVALCANTE et al., 2015). Segundo Teodoro et al. (2011) o guandu anão é pouco exigente em relação à fertilidade do solo. Silva et al. (2017) afirmam que a crotalária juncea é uma espécie de elevado desempenho agrônômico com viabilidade de cultivo em áreas de fertilidade limitante.

Referências

- AMER, F.; BOULDIN D. R.; BLACK, C. A.; DUKE, F. R. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P32-equilibration. **Plant Soil**, n. 6, p. 391-408, 1955.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 305-312, 2009. DOI: 10.5380/rsa.v10i4.14728
- CASALI, C. A.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. D.; CALEGARI, A.; PICCIN, R. **Benefícios do uso de plantas de cobertura de solo na ciclagem de fósforo**. In: TIECHER, T. (Ed.) Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2016. p. 23–33.
- CAVALCANTE, V. S.; BARBOZA, J. T. V.; COSTA, L. C.; SANTOS, V. R.; SANTOS, M. J. N. Produção de adubos verdes e a utilização dos resíduos no cultivo da cebolinha. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 10, n. 1, 2015.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v.84, p.133-144, 1957.
- COSTA, M.; CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E. A.; WILDNER, L. P.; ALCÂNTARA, P. B.; MIYASAKA, S.; AMADO, T. J. C. **Adubação verde no sul do Brasil**. Rio de Janeiro, ASPTA, 1992.
- DAMON, P. M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, p. 127-137, 2014. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.03.003
- ESPÍNDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. **Adubação verde: estratégia para uma agricultura sustentável**. Seropédica: EMBRAPA-CNPAB, 1997. 20 p. (EMBRAPA-CNPAB. Documentos, 42).
- GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: Usos e limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v. 8. p. 141-187.
- GONÇALVES, G. K.; BORTOLON, L.; MEURER, E. J.; GONÇALVES, D. R. N.; SOUSA, R. O.; FAGUNDES, S. M. Extratores de fósforo para o arroz irrigado em solos adubados com fosfato natural reativo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, n. 3, p. 196-204, 2012.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. J. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. 5, p. 970-976, 1982.
- HINSINGER, P.; BETENCOURT, E.; BERNARD, L.; BRAUMAN, A.; PLASSARD, C.; SHEN, J.; XIAOYAN, T.; FUSUO, Z. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus

acquisition in the rhizosphere of intercropped species. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 1078-1086, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175331

KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; WANI, P. A. Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: a review. **Agronomy for sustainable development**, v. 27, n. 1, p. 29-43, 2007. DOI: 10.1051/agro:200601

LI, L.; TILMAN, D.; LAMBERS, H.; ZHANG, F. S. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. **New phytologist**, v. 203, p. 63-69, 2014. DOI: 10.1111/nph.12778

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: North Carolina State University, 1953.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of the Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, p.1409-1416, 1984.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA, Lavras, 2006.

MUMBACH, G. L.; OLIVEIRA, D. A.; WARMLING, M. I.; GATIBONI, L. C. Quantificação de fósforo por Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina Trocadora de Ânions em solos com diferentes teores de argila. **Revista Ceres**, v. 65, n. 6, p. 546-554, 2018. DOI: 10.1590/0034-737X201865060010

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta sob condições tropicais**. Raleigh: Universidade Federal de Viçosa – North Carolina State University, 1999. 399p.

PADOVAN, M. P.; MOTTA, I. D. S.; CARNEIRO, L. F.; MOITINHO, M. R.; FERNANDES, S. S. L. Acúmulo de fitomassa e nutrientes e estágio mais adequado de manejo do feijão-de-porco para fins de adubação verde. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 6, n. 3, p. 182-190, 2011.

PEREIRA, A. P.; SCHOFFEL, A.; KOEFENDER, J.; CAMERA, J. N.; GOLLE, D. P.; HORN, R. C. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 4, p. 120-129, 2017. DOI: 10.19084/RCA17065

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049

RODRIGUES, G. B.; SÁ, M. E.; VALÉRIO FILHO, W. V.; BUZETTI, S.; BERTOLIN, D. C.; PINA, T. P. Matéria e nutrientes da parte aérea de adubos verdes em cultivos exclusivo e consorciado. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 380-385, 2012. DOI: 10.1590/S0034-737X2012000300013

ROGERI, D. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; AMORIM, M. B. Remaining phosphorus content to determine phosphorus availability of the soils in Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 12, p. 1203-1214, 2017. DOI: 10.1590/S0100-204X2017001200009

SILVA, M. S.; OLIVEIRA, G. R. F.; MERLOTI, L. F.; SÁ, M. E. Acúmulo de nutrientes e massa seca produzida por *Crotalaria juncea* cultivada no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 11, n. 1, p. 26-36, 2017. DOI: 10.18011/bioeng2017v11n1p26-36

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. 3.ed. London, Academic Press, 2008. 785p.

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2018.01.006

TELES, A. P. B.; RODRIGUES, M.; BEJARANO HERRERA, W. F.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Phosphorus and potassium release during decomposition of roots and shoots of green manure crops. **Soil use and management**, v. 33, p. 34-44, 2017. DOI: 10.1111/sum.12327

TELES, A. P. B. **Influência de plantas de cobertura e fertilizantes fosfatados nas frações de fósforo e nos atributos químicos do solo**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2014. 76p.

TEODORO, R. B.; OLIVEIRA, F. L. D.; SILVA, D. M. N. D.; FÁVERO, C.; QUARESMA, M. A. L. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Ho Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 35, v. 1, p. 635-643, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200032

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 522-537, 2018.

DISPONIBILIDADE E FRACIONAMENTO DE FÓSFORO EM SOLOS COM CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DISTINTAS

Resumo: O conteúdo total de fósforo (P) no solo não reflete sua disponibilidade para as plantas, a quantidade efetivamente disponível depende das características físico-químicas do solo. Neste capítulo objetivou-se avaliar a disponibilidade de P, utilizando os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3, e diferentes formas de P inorgânico em cinco classes de solos. Utilizaram-se amostras do horizonte A de cinco classes de solos do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais: Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico (CXbd), Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf) e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm). Foram determinados os teores de P disponível, P remanescente e P total. A partir do fracionamento de P inorgânico, determinaram-se: P facilmente solúvel (“P-H₂O”), P ligado a alumínio (P-Al), P ligado a ferro (P-Fe) e P ligado a cálcio (P-Ca). Os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 tiveram alto coeficiente de correlação, indicando que ambos os métodos podem ser utilizados na extração de P no solo; o extrator Mehlich-1 superestimou os teores de P disponível no solo com alto teor de cálcio (RLm); os altos teores de P total observados no LVwf e no RLm são decorrentes, principalmente, do material de origem; P ligado a Fe e Al são as frações de P inorgânico predominantes nos solos mais intemperizados (RLd, LVd e LVwf) e ácidos (CXbd); no RLm o P inorgânico predomina na forma de fósforo ligado a Ca.

Palavras-chave: Extratores químicos. Fósforo disponível. Fósforo remanescente. Fracionamento de fósforo inorgânico. Mehlich.

AVAILABILITY AND FRACTIONATION OF PHOSPHORUS IN SOILS WITH DIFFERENT PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS

Abstract: The total content of phosphorus (P) within soil does not reflect its availability for plants. The availability depends upon the physical and chemical characteristics of the soil. The objective was to evaluate the availability of P, using extractors in Mehlich-1 and Mehlich-3, and to determine the different forms of inorganic P different classes of soils. Samples from horizon A of five soil classes from the municipality of Lagoa Formosa, Minas Gerais, were used: Typical Dystrophic Litholytic Entisol (RLd), Typical Dystrophic Red Oxisol (LVd), Typical Dystrophic Tb Hapludox Cambisol (CXbd), Typical Acriferic Red Oxisol (LVwf), and

Typical Chernossolic Litholytic Entisol (RLm). The levels of available P, remaining P, and total P were determined. From the fractionation of inorganic P, they determined: soluble P (“P-H₂O”), P linked to aluminium (P-Al), P linked to iron (P-Fe), and P linked to calcium (P-Ca). The Mehlich-1 extractor overestimated the levels of P available in the soil with a high calcium content (RLm); high levels of total P observed in LVwf and RLm were mainly due to the parent material of the soils; P-Fe and P-Al are the predominant inorganic P fractions in the most weathered (RLd, LVd e LVwf) and acidic soils (Cxbd); and in RLm the inorganic P is predominantly P-Ca.

Keywords: Chemical extractors. Available phosphorus. Remaining phosphorus. Inorganic phosphorus fractionation. Mehlich.

Introdução

Os solos tropicais muito intemperizados, como a maioria dos solos brasileiros, têm alta capacidade de fixação de fósforo (P), reduzindo sua disponibilidade às plantas. Em condições naturais, esses solos são, geralmente, ácidos, com baixo teor de matéria orgânica, cátions básicos e P disponível, bem como baixa capacidade de troca catiônica (CTC) (MANGALASSERY et al., 2019). A alta capacidade de retenção e fixação de P nesses solos reduz a sua disponibilidade para as plantas (WITHERS et al., 2018).

A retenção de P adicionado ao solo ocorre tanto pela precipitação em solução com formas iônicas de ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca), como pela sua adsorção aos óxidos de Fe e Al, presentes em maiores quantidades nos solos mais intemperizados (NOVAIS, SMYTH, 1999). Deste modo, a adubação fosfatada, aliada a outras práticas de manejo, como a calagem, é essencial para a obtenção de altas produtividades nestes solos. Em solos com baixo teor de P é comum aplicações elevadas deste nutriente para atingir um nível de disponibilidade que permita classificar o solo como não deficiente (RAIJ, 2011).

Os solos de grandes áreas produtivas do Brasil receberam mais fertilizantes fosfatados do que o necessário para as necessidades das culturas desde 1970, resultando na acumulação de reservas de P ao longo do tempo em formas de diferentes labilidades, que podem ou não atender à demanda das plantas (WITHERS et al., 2018). A frequente aplicação de fosfatos no solo resulta em acúmulo de formas lábeis e menos lábeis de P ao longo do tempo. A fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo tornando-se disponível para as plantas (RHEINHEIMER et al., 2008). A formação do P

não lábil ocorre devido à formação de duas ligações coordenadas com a superfície dos colóides que dificulta a dessorção do P para solução do solo (NOVAIS, SMYTH, 1999). Dada essa dinâmica do P no solo, é difícil e complexo prever a disponibilidade deste nutriente para plantas (ROGERI et al., 2017).

Diversos métodos são utilizados para a determinação do P disponível. Em Minas Gerais, utiliza-se o extrator Mehlich-1 (M1) como o método oficial (ROGERI et al., 2017). A solução de M1 foi proposta na década de 1950 para extração de P em solos ácidos e tem como princípio a solubilização, pelos íons H^+ , de fosfatos de Ca e pequenas porções de fosfatos de Al e Fe (MEHLICH, 1953). Ao extrair, preferencialmente, as formas de P ligadas a Ca, o M1 pode superestimar a disponibilidade de P em solos recentemente adubados com fosfatos naturais ou solos ricos em Ca. Para eliminar os problemas e algumas desvantagens da solução de M1, estudos de Rocha et al. (2005), Bortolon et al. (2009), Bortolon et al. (2011), Gonçalves et al. (2012) e Mumbach et al. (2018) foram feitos utilizando o extrator Mehlich-3 (M3) (MEHLICH, 1984).

Entretanto, a adoção de uma nova metodologia para estimar a disponibilidade de um elemento para as plantas cultivadas deve estar respaldada numa ampla calibração de campo, onde os teores extraídos são correlacionados com o desempenho das plantas (MUMBACH et al., 2018). Para o M3 as informações ainda são incipientes para suportar uma calibração, enquanto para o M1 a calibração tem sido ajustada através de experimentos realizados por mais de 50 anos (MUMBACH et al., 2018). Sendo assim, o M1 continua sendo o método oficial para determinar o P disponível em diversos estados do Brasil.

Além da avaliação do P disponível nos solos, é importante avaliar as formas de P do total que possam repor a solução do solo. Assim, para estudos das formas de P, de acordo com sua labilidade, foram desenvolvidos métodos para quantificar o P lábil e outras formas de menor labilidade, mediante a técnica de fracionamento sequencial (GATIBONI et al., 2013). A extração sequencial do P inorgânico do solo é uma abordagem útil para obter informações detalhadas sobre o potencial de disponibilidade de P no solo (SHAO et al., 2019).

Para o fracionamento de P inorgânico do solo, os procedimentos propostos por Chang e Jackson (1957) permitem determinar o fosfato facilmente solúvel e os ligados a Al, Fe e Ca (GATIBONI et al., 2013). A disponibilidade P nos solos é controlada, em grande parte, pela distribuição de suas frações, sendo as frações de P facilmente solúvel e P ligado ao Al as consideradas lábeis, de acordo com a acessibilidade da planta, enquanto que o P ligado a Fe e Ca são as frações não lábeis (ZHAO et al., 2019). Entretanto, qualquer uma dessas frações pode

existir em estado mais ou menos lábil, dependendo, principalmente, do tempo de reação dos fosfatos e das condições existentes no solo (RAIJ, 2011).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar a disponibilidade de P, utilizando os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3, e diferentes formas de P inorgânico em cinco classes de solos.

Material e Métodos

Cinco classes de solos do município de Lagoa Formosa, Minas Gerais (mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba) foram selecionadas para o presente estudo, que tiveram amostras do horizonte A coletadas: Neossolo Litólico Distrófico típico (RLd), Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico (CXbd), Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf) e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm) (SOUZA, 2017). As áreas amostradas não apresentavam uso agrícola, para as coletas dos solos foram abertas mini trincheiras ao longo de estradas de baixo trânsito. Na Tabela 1 encontram-se informações das áreas amostradas.

Tabela 1. Informações das classes de solos nas áreas amostradas no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Solo	Profundidade do Horizonte A (cm)	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)	Unidade geológica
RLd	20	X: 354153,37 Y: 7927405,63	853	Formação Lagoa Formosa
LVd	20	X: 383986,38 Y: 7926294,12	886	Coberturas Elúvio Coluvionares
Cxbd	5	X: 354153,37 Y: 7923179,44	847	Formação Lagoa Formosa
LVwf	52	X: 353390,67 Y: 7926050,50	928	Grupo Mata da Corda
RLm	46	X: 362621,72 Y: 7919872,49	924	Grupo Mata da Corda

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, CXbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico e RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico. Fonte: Souza (2017).

As amostras dos solos foram submetidas à caracterização físico-química (Tabela 2). A composição granulométrica foi determinada de acordo com os procedimentos descritos em Teixeira et al. (2017), com a dispersão das amostras com hidróxido de sódio (NaOH 0,01 mol L⁻¹) e agitação mecânica por 16 horas a 50 rpm. As frações areia grossa, areia fina, silte e argila foram determinadas por meio de separação em peneiras e sedimentação. A densidade do solo foi determinada pelo método do balão volumétrico e a densidade das partículas pelo balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017). A caracterização química foi realizada com a

determinação dos valores de pH em água e em KCl, dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} trocáveis, acidez potencial (H+Al), CTC efetiva (t), CTC potencial (T), soma de bases (SB), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e carbono orgânico total (COT), seguindo as metodologias descritas por Teixeira et al. (2017).

Tabela 2. Características físicas e químicas do horizonte A de cinco solos coletados em Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Caracterização Física							
Solo	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	⁽¹⁾ Textura da TFSA	Ds	Dp
	g kg ⁻¹					g cm ⁻³	
RLd	92,20	89,98	342,37	475,45	Argila	1,04	2,61
LVd	213,09	270,15	77,04	439,72	Argila Arenosa	1,23	2,56
Cxbd	58,00	19,00	359,00	564,00	Argila	1,03	2,71
LVwf	91,00	68,00	272,00	569,00	Argila	1,17	3,08
RLm	100,00	58,00	358,00	484,00	Argila	1,22	2,89

Caracterização Química							
	pH		Δ pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	K^+
	H ₂ O	KCl		cmol _c kg ⁻¹			mg dm ⁻³
RLd	4,86	3,62	-1,24	1,17	0,81	4,40	101,66
LVd	5,46	4,07	-1,39	2,29	1,01	1,30	140,76
Cxbd	5,04	3,84	-1,20	0,17	0,01	3,40	89,93
LVwf	5,27	4,60	-0,67	0,99	0,70	0,40	58,65
RLm	5,84	4,42	-1,42	20,49	5,63	0,30	320,62

	H+Al	SB	T	t	V	m	COT
	cmol _c kg ⁻¹			%			g kg ⁻¹
RLd	7,14	2,24	9,38	6,64	23,88	66,27	3,04
LVd	6,22	3,66	9,88	4,96	37,04	26,21	22,73
Cxbd	6,44	0,41	6,85	3,81	5,99	89,24	6,28
LVwf	6,59	1,84	8,43	2,24	21,83	17,86	14,18
RLm	10,67	26,94	37,61	27,24	71,63	1,10	34,26

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, CXbd: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico típico e RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico, TFSA: terra fina seca ao ar, Ds: densidade do solo, Dp: densidade de partícula; ⁽¹⁾Classificação textural de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS).

Fonte: Souza (2017).

Para cada solo, determinaram-se, em triplicata, os teores de P disponível, P remanescente e P total. Os teores de P disponível foram determinados pelos extratores Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹) (MEHLICH, 1953) e Mehlich-3 (NH_4F 0,015 mol L⁻¹ + CH_3COOH 0,2 mol L⁻¹ + NH_4NO_3 0,25 mol L⁻¹ + HNO_3 0,013 mol L⁻¹ + EDTA 0,001 mol L⁻¹) (MEHLICH, 1984), numa relação solo:extrator de 1:10 (5 cm³ de TFSA e 50 mL da solução extratora). Os teores de P remanescente foram determinados em solução de 75 mL de CaCl_2 0,01 mol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de P, com adição de 7,5 cm³ de solo (relação solo:extrator de

1:10), conforme Alvarez V. et al. (2000). A avaliação de P nos extratos foram realizadas por colorimetria, de acordo com Murphy e Riley (1962) com adaptações de Braga e Defélipo (1974). Os teores de P total foram determinados pelo ICP-OES – inductively coupled plasma (espectrometria de emissão óptica por plasma induzido) – após digestão ácida, utilizando-se H_2SO_4 1:1, conforme procedimentos descritos em Teixeira et al. (2017).

Para o fracionamento de P inorgânico utilizou-se o procedimento proposto por Chang e Jackson (1957), determinando-se, assim: P facilmente solúvel (“P- H_2O ”), P ligado a alumínio (P-Al), P ligado a ferro (P-Fe) e P ligado a cálcio (P-Ca). Amostras de 0,5 g de TFSA foram submetidas à extração, sequencialmente, com 25 mL de NH_4Cl 1 mol L^{-1} (determinação de “P- H_2O ”), 25 mL de NH_4F 0,5 mol L^{-1} (determinação de P-Al), 25 mL de NaOH 0,1 mol L^{-1} (determinação de P-Fe) e 25 mL de H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} (determinação de P-Ca). O teor de P inorgânico nos extratos foi determinado pelo ICP-OES.

Os dados obtidos foram submetidos a análises de correlação linear de Pearson ao nível de 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

P disponível extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3

O teor de P disponível extraído pelo M1 variou de 0,72 a 503,22 mg dm^{-3} (Tabela 3). De acordo com a classificação proposta por Ribeiro et al (1999), os teores de P disponível para os solos RLd, LVd, Cxbd e LVwf foram classificados como “muito baixos”, enquanto que para o solo RLM a classificação foi “muito bom”. O expressivo valor de P disponível do RLM está relacionado ao baixo grau de intemperismo e aos materiais de origem desse solo, que é derivado de rochas vulcânicas carbonatíticas do Grupo Mata da Corda (rochas eruptivas alcalinas e ultrabásicas), com forte presença de apatita na sua composição (UHLEIN et al., 2011).

Por outro lado, os teores de P disponível extraído pelo M3 apresentaram uma variação menor entre os solos (0,60 a 212,42 mg dm^{-3}). Da mesma forma, o solo RLM apresentou teor de P disponível, pelo extrator M3, muito maior em relação aos demais solos. Entretanto, essa variação foi menor em relação aos teores de P disponível obtidos pelo M1. O extrator M1 pode superestimar o teor de P disponível em solos com elevados teores de Ca, seja naturalmente, como o RLM (Tabela 2), ou em solos de fertilidade melhorada/construída.

Tabela 3. Teores fósforo disponível, extraído por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3), total (P total) e remanescente (P-rem) em amostras do horizonte A de solos coletados no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Solos	M1	M3	P total	Relação P disp/total ⁽¹⁾	P-rem
	----- mg dm ⁻³ -----			%	mg L ⁻¹
RLd	4,92	6,12	192,27	2,56	24,17
LVd	1,46	3,96	122,98	1,19	21,21
Cxbd	0,72	0,60	87,01	0,83	18,55
LVwf	3,36	5,45	2969,25	0,11	14,01
RLm	503,22	212,42	7419,85	6,78	20,93
Limite superior	503,22	212,42	7419,85	6,78	24,17
Limite inferior	0,72	0,60	87,01	0,11	14,01
Varição	502,50	211,82	7332,84	6,68	10,16

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, CXbd: Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico típico e RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico.
⁽¹⁾Porcentagem de P disponível extraído pelo M1 (método oficial do Estado de Minas Gerais) em relação ao P total.

O teor de P disponível extraído pelo M3 foi maior nos solos LVd, LVwf e RLd, com aumento de 63,1%, 38,3% e 19,6%, respectivamente, em relação ao extraído pelo M1. Bortolon et al. (2009), Bortolon et al. (2011), Rogeri et al. (2017) e Mumbach et al. (2018) também observaram em suas pesquisas que o teor de P disponível extraído pelo M3 foi maior em relação ao extraído por M1. A maior extração de P pela solução de M3 se deve às características químicas do extrator, que extrai preferencialmente o P ligado a Fe e Al e em menor proporção, ao P ligado a Ca (BEEGLE, 2005). Em contraste, solos com altos teores de Ca, como o RLm, o M1 extrai mais P disponível quando comparado ao M3, devido a maior extração de P ligado a Ca. O teor de P disponível extraído pelo M1 no RLm foi 57,8% maior em relação ao extraído pelo M3. Ou seja, M3 é mais eficiente em solos oxidicos mais intemperizados, como LVd e LVwf.

A solução de M1 (MEHLICH, 1953) tem como princípio a solubilização, pelos íons H⁺, de fosfatos de Ca e pequenas porções de fosfatos de Al e Fe (BORTOLON et al., 2009). O M1 é eficiente na extração de P ligado a Ca, enquanto para a maioria das culturas, essa forma de P é absorvida de forma parcial ou não é absorvida. Aliado a isto, os solos brasileiros são altamente intemperizados, em sua maioria, com altos teores de óxidos de Fe e Al predominante na fração argila, assim, ocorre diminuição da capacidade extrativa do método (BORTOLON et al., 2009). Mesmo com tais limitações, o M1 tem sido usado como método oficial em alguns estados brasileiros, tendo boa capacidade de predição da disponibilidade de P, exceto em solos com aplicação recente de fosfatos naturais (MUMBACH et al., 2018).

Para eliminar os problemas e algumas desvantagens da solução de M1 foi proposto, a partir da década de 1980, o extrator M3 para uso em solos ácidos e solos que receberam fosfatos naturais (GONÇALVES et al., 2012). O M3 apresenta diversas vantagens, incluindo maior alcance de extração, redução de erros analíticos e extração simultânea de múltiplos elementos (SCHLINDWEIN, GIANELLO, 2008). Ainda assim, os laboratórios de análise de solo na maior parte do Brasil utilizam o extrator M1 para determinar a disponibilidade de P para as culturas (GONÇALVES et al., 2012), pela tradição e menor custo.

De acordo com Mumbach et al. (2018), a adoção de uma nova metodologia para estimar a disponibilidade de um elemento para as plantas deve estar respaldada numa ampla calibração de campo, onde os teores extraídos são correlacionados com o desempenho das plantas. O extrator M3 apresenta grande potencial para substituir, futuramente, o M1, mas para isso é preciso a realização de experimentos de calibração de campo usando o método (MUMBACH et al., 2018).

P total e remanescente

O teor de P total foi bastante variável entre os solos, com valores entre 87,01 a 7419,85 mg dm⁻³ (Tabela 3). Tal variação é devido, principalmente aos materiais de origem de cada solo. De acordo com Shao et al. (2019) o P nativo do solo é proveniente, principalmente, de materiais de origem do solo e é afetado pelas condições climáticas, como por exemplo o intemperismo das rochas e do solo. Os valores mais elevados foram encontrados nos solos RLm e o LVwf, que são solos do Grupo Mata da Corda, derivados de rochas vulcânicas (UHLEIN et al., 2011), cujos teores de P dos solos derivados de tais rochas podem apresentar altos teores de P total devido a presença de minerais apatitas nas rochas de origem.

Os solos RLd, LVd e CXbd apresentaram baixos teores de P total, devido ao material de origem com baixa presença de apatita, como as rochas da Formação Lagoa Formosa (siltitos, arenitos, argilitos etc.) dos solos RLd e CXbd (UHLEIN et al., 2011) e as Coberturas Elúvio-Coluvionares, derivado de produtos do intemperismo no Terciário (UHLEIN et al., 2011) do solo LVd.

Considerando o teor de P total e o teor de P disponível pelo extrator M1, observou-se que a porcentagem de P disponível é muito pequena para todos os solos. De acordo com Moreira e Siqueira (2006) a maior parte das reservas de P no solo está na forma não lábil, estando quimicamente muito estável e difícil de tornar-se disponível às plantas, sendo a fração lábil (disponível) menor que 5% de P do solo. Mesmo o RLm, solo que apresentou maior teor de P

total e P disponível, possui apenas 6,78% do P total na forma disponível extraído pelo M1. Outro solo que merece destaque é o LVwf, que, juntamente com o RLM, possuiu expressivo valor de P total, devido aos seus materiais de origem. Entretanto, o LVwf apresentou a menor porcentagem de P disponível em relação ao P total, apenas 0,11%. Tal fato pode ser atribuído às características físicas, químicas e mineralógicas deste solo, que apresenta grau bastante avançado de intemperismo, alto teor de argila, minerais caulinita, gibbsita, maghemita e hematita na fração argila e elevada quantidade de Fe_2O_3 (30,03%) na TFSA obtido pelo ataque sulfúrico (SOUZA, 2017). Nos solos mais intemperizados a fixação de P é mais elevada devido a maior precipitação do P em solução com formas iônicas de Fe e Al e, além disso, os solos tornam-se mais eletropositivos e com grande capacidade de adsorver e reter ânions, tais como os fosfatos, pela sua adsorção aos óxidos de Fe e Al (NOVAIS, SMITH, 1999).

Embora os teores de P total e P disponível entre os solos tiveram uma variação ampla, os teores de P-rem apresentaram uma pequena variação entre os solos (14,01 a 24,17 mg L⁻¹), conforme apresentado na Tabela 3. O P-rem corresponde a quantidade de P adicionada que fica na solução de equilíbrio após um definido tempo de contato entre solo e solução (ALVAREZ V. et al., 2000). Assim, quanto menor o teor de P-rem, maior é a capacidade do solo em reter o P adicionado em solução. O P-rem depende da capacidade de adsorção de fosfatos do solo, que, por sua vez, é dependente da textura, da mineralogia da fração argila e da quantidade de matéria orgânica (NOVAIS, SMYTH, 1999).

Os solos analisados apresentaram teores de argila muito elevados (Tabela 2). Considerando-se, apenas, a influência da textura, espera-se que, em razão da diferença de superfície específica entre as frações texturais, a fração argila tenha maior capacidade de adsorção de fosfatos (DONAGEMMA et al., 2008), deste modo ambos os solos analisados apresentam grande capacidade de adsorção de fosfatos devido ao elevado teor de argila. Em relação à mineralogia da fração argila, os óxidos de Fe e Al apresentam maior adsorção de fosfatos que a caulinita (NOVAIS, SMYTH, 1999). Souza (2017) realizou a caracterização mineralógica dos solos analisados neste estudo, foram encontrados na fração argila dos solos: illita e caulinita em CXbd, RLd e RLM; caulinita, gibbsita, maghemita e hematita em LVwf; e caulinita, gibbsita e hematita em LVd.

Os dados obtidos no presente estudo revelaram que o LVwf é o solo que possuiu o menor valor de P-rem, indicando grande capacidade de adsorção de fosfato, o que está de acordo com as características físicas, químicas e mineralógicas deste solo. O LVd, apesar de ser um solo muito intemperizados com presença de oxihidróxidos de Fe e Al na fração argila, apresentou elevado valor de P-rem, provavelmente devido ao alto teor de COT (Tabela 2). Quanto maior a

quantidade de matéria orgânica, em geral, menor é a adsorção de fosfatos pela ação dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que podem bloquear sítios de adsorção do fosfato (DONAGEMMA et al., 2008). O RLM apresentou um valor de P-rem próximo aos demais solos, ainda assim apresentou grande quantidade de P na forma disponível.

Fracionamento químico de P inorgânico

Os teores de “P-H₂O”, que corresponde a fração de P inorgânico que é solúvel em água, foram baixos em todos os solos (Tabela 4). Considerando o total de P inorgânico extraído pelo fracionamento, os teores de “P-H₂O” corresponderam a 0,53% para RLd, 6,82% para LVd, 8,14% para Cxbd, 1,87% para LVwf e 0,11% para RLM. Souza Júnior et al. (2012) também verificaram baixos teores de “P-H₂O” nos solos analisados, o que revela a forte interação do P com a fase sólida do solo. Os baixos teores de P facilmente solúvel são decorrentes da baixa solubilidade dos compostos de P existentes no solo e da alta capacidade de adsorção do elemento pelas partículas do solo (RAIJ, 2011).

Tabela 4. Fracionamento de fósforo inorgânico (Pi) em amostras do horizonte A e percentual de cada fração extraída em relação ao Pi, entre parênteses, de cinco classes de solos.

Solos	"P-H ₂ O"		P-Al		P-Fe		P-Ca		Pi
	----- mg dm ⁻³ -----								
RLd	0,28	(0,53)*	13,90	(26,29)	37,15	(70,25)	1,55	(2,93)	52,88
LVd	4,20	(6,82)	22,69	(36,80)	33,41	(54,19)	1,35	(2,20)	61,65
Cxbd	3,14	(8,14)	11,68	(30,29)	23,08	(59,85)	0,66	(0,66)	38,56
LVwf	7,32	(1,87)	55,73	(14,14)	315,64	(80,64)	12,71	(12,71)	391,40
RLm	7,03	(0,11)	305,06	(4,84)	1935,06	(30,70)	4055,06	(64,34)	6302,21

RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico, LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico, CXbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico típico e RLM: Neossolo Litólico Chernossólico típico, “P-H₂O” fósforo facilmente solúvel, P-Al: fósforo ligado a alumínio, P-Fe: fósforo ligado a ferro: P-Fe, P-Ca: fósforo ligado a cálcio. *valores em % de cada fração extraída de P em relação ao somatório de todas as formas de P inorgânico (Pi).

O teor de P-Al foi variável entre os solos. O RLM possuiu maior valor em relação aos demais, mas isso é devido ao elevado teor de P total neste solo, resultando em maior contribuição para todas as frações de P inorgânico determinadas, exceto para P facilmente solúvel (“P-H₂O”). Em termos percentuais, o RLM possuiu o menor percentual de P-Al, apenas 4,84% em relação ao total extraído. Os demais solos apresentaram as porcentagens de 26,29%, 36,80%, 30,29% e 14,14%, respectivamente para RLd, LVd, Cxbd e LVwf.

O teor de P-Fe foi superior no LVwf, correspondendo a 80,64% do P inorgânico extraído. Tal resultado é devido às características químicas e mineralógicas deste solo. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) os Latossolos Vermelhos acriférricos possuem caráter ácido e teores de Fe_2O_3 (pelo H_2SO_4) de 180 g kg^{-1} a $< 360 \text{ g kg}^{-1}$ na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (EMBRAPA, 2014).

Os teores de P-Fe para os solos RLd, LVd e Cxbd representaram mais de 50% do P inorgânico, enquanto que para o RLM representou apenas 30,7%. Nos solos ácidos e pobres em Ca, a maior parte do P inorgânico forma precipitados com Al e Fe e, ou, é adsorvida especificamente à superfície dos coloides minerais, de modo que as frações P-Al e P-Fe são as que predominam (SOUZA JÚNIOR et al., 2012). Isso explica porque os solos RLd, LVd e Cxbd, juntamente com LVwf apresentaram maiores proporções do P inorgânico ligados a Fe e Al.

Os teores de P ligado a Ca (P-Ca) foram superiores no RLM, 64,34% do P inorgânico extraído. Esse resultado também é devido às características deste solo. De acordo com o SiBCS os Neossolos Litólicos Chernossólicos são solos sem caráter carbonático e com horizonte A chernozêmico, que é um horizonte mineral superficial, relativamente espesso, de cor escura, com alta saturação por bases, com predomínio de Ca e, ou Mg (EMBRAPA, 2014). Nos solos menos intemperizados e com teores elevados de Ca^{2+} , predomina o P-Ca (SOUZA JÚNIOR et al., 2012).

Para os demais solos, a porcentagem de P-Ca em relação ao P inorgânico extraído foi inferior à 3%. Sendo que para LVd e Cxbd o teor de P-Ca foi inferior até mesmo ao “P- H_2O ”. De acordo com Souza Júnior et al. (2012), os solos mais intemperizados, e aqueles menos intemperizados com valores baixos de pH e de Ca^{2+} , a maior parte do P inorgânico ocorre nas formas de P-Al e de P-Fe. Isso explica porque o RLd, solo de baixo grau de intemperismo, apresentou frações de P inorgânico semelhantes aos solos mais intemperizados.

O somatório das frações inorgânicas de P determinadas no presente estudo revelou-se inferior ao valor de P total. Em seus estudos, Shao et al. (2019) também observaram que o conteúdo de P inorgânico na área estudada foi inferior ao P total, representando de 60 a 85% do P total. Fato que pode ser explicado pela ausência das frações P residual e ocluso, previstas no procedimento original de Chang e Jackson (1957), e também do P orgânico. Tais frações não foram determinadas por serem não lábeis e, conseqüentemente, de pouca importância para culturas (ROCHA et al., 2005).

Correlação entre as variáveis

O coeficiente de correlação entre os métodos M1 e M3 foi alto ($r^2 = 0,99^{**}$), conforme observado na Tabela 5. Este resultado corrobora Bortolon et al. (2009), Bortolon et al. (2011) e Mumbach et al. (2018). De acordo com Bortolon et al. (2009), isto indica que ambos os métodos podem ser utilizados na extração de P no solo. Além disso, observou-se, no presente estudo, que os extratores M1 e M3 correlacionaram-se positivamente com as mesmas variáveis (P total, relação P disponível/total, P ligado a Ca, P ligado a Fe e P ligado a Al). Segundo Mumbach et al. (2018), tais resultados demonstram que ambos os métodos de extração podem ser utilizados para estimar a disponibilidade de P nos solos, devendo ser preferível o extrator M1, por apresentar extensa calibração de campo.

Tabela 5. Correlações entre o P disponível por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3), P remanescente (P-rem), P total, relação P disponível/total (P disp/tot), frações de P inorgânico (facilmente solúvel (“P-H₂O”), ligado a alumínio (P-Al), a ferro (P-Fe) e a cálcio (P-Ca)) em amostras do horizonte A de solos coletados no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Variáveis	M1	M3	P-rem	P total	P disp/tot	“P-H ₂ O”	P-Al	P-Fe
M3	0,99**							
P-rem	0,17 ^{ns}	0,17 ^{ns}						
P total	0,92*	0,92*	-0,16 ^{ns}					
P disp/tot	0,94**	0,94**	0,47 ^{ns}	0,78 ^{ns}				
“P-H ₂ O”	0,50 ^{ns}	0,50 ^{ns}	-0,69 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,21 ^{ns}			
P-Al	0,99**	0,99**	0,06 ^{ns}	0,97**	0,90*	0,60 ^{ns}		
P-Fe	0,99**	0,99**	0,05 ^{ns}	0,97**	0,90*	0,60 ^{ns}	0,99**	
P-Ca	0,99**	0,99**	0,20 ^{ns}	0,92*	0,94**	0,51 ^{ns}	0,99**	0,99**

^{ns} não significativo; * significativo a 5%; ** significativo a 1%.

O teor de P total dos solos correlacionou positivamente com as variáveis: P disponível pelos extratores M1 e M3, P-Al, P-Fe e P-Ca, com coeficiente de correlação acima de 90%. Isso indica que o teor de P total interfere diretamente na disponibilidade de P, bem como nas formas de P inorgânico dos solos analisados. As variáveis P-rem e “P-H₂O” não correlacionaram com nenhuma característica analisada. Isso indica que, nas presentes condições, essas variáveis não foram boas indicadoras de disponibilidade de P nos solos analisados.

Conclusões

Numa comparação de extratores de P em solos com diferentes graus de intemperismo, o extrator Mehlich-1 superestimou o teor de P disponível em solo com alto teor de Ca (RLm);

Os altos teores de P total em RLm e LVWf são decorrentes do material de origem e das características físicas, químicas e mineralógicas destes solos.

Referências

- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Boletim Informativo, SBCS, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.
- BEEGLE, D. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. In: SIMS, J. T. et al. (Ed.). **Phosphorus: agriculture and the environment**. Madison: SSSA, 2005. p. 123-144.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J. A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 305-312, 2009. DOI: 10.5380/rsa.v10i4.14728
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; KOVAR, J. L. Phosphorus availability to corn and soybean evaluated by three soil-test methods for southern Brazilian soils. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 42, n. 1, p. 39-49, 2010. DOI: 10.1080/00103624.2011.528488
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, p. 73-85, 1974.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v.84, p.133-144, 1957.
- DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 4, p. 1785-1791, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400043
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. SANTOS, H. G. [et al.]. – 4. ed. – Brasília, DF: Embrapa, 2014. E-book: il. color.
- GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: Usos e limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v. 8. p. 141-187.
- GONÇALVES, G. K.; BORTOLON, L.; MEURER, E. J.; GONÇALVES, D. R. N.; SOUSA, R. O.; FAGUNDES, S. M. Extratores de fósforo para o arroz irrigado em solos adubados com fosfato natural reativo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, n. 3, p. 196-204, 2012.
- MANGALASSERY, S.; KALAIVANAN, D.; PHILIP, P. S. Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered tropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 144-151, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2018.12.008
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: North Carolina State University, 1953.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of the Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, p.1409-1416, 1984.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA, Lavras, 2006.

MUMBACH, G. L.; OLIVEIRA, D. A.; WARMLING, M. I.; GATIBONI, L. C. Quantificação de fósforo por Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina Trocadora de Ânions em solos com diferentes teores de argila. **Revista Ceres**, v. 65, n. 6, p. 546-554, 2018. DOI: 10.1590/0034-737X201865060010

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica chimica acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta sob condições tropicais**. Raleigh: Universidade Federal de Viçosa – North Carolina State University, 1999. 399p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa: UFV, 1999. 359 p.

ROCHA, A. T. D.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W.; RIBEIRO, M. R. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005. DOI: 10.1590/S1415-43662005000200005

ROGERI, D. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; AMORIM, M. B. Remaining phosphorus content to determine phosphorus availability of the soils in Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 12, p. 1203-1214, 2017. DOI: 10.1590/S0100-204X2017001200009

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Doses de máxima eficiência econômica de fósforo e potássio para as culturas cultivadas no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 85, p. 20-25, 2005. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049

SHAO, W.; ZHUB, J.; TENGA, Z.; ZHANGA, K.; LIUA, S.; LIA, M. Distribution of inorganic phosphorus and its response to the physicochemical characteristics of soil in Yeyahu Wetland, China. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 125, p. 1-8, 2019. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.025

SOUZA JÚNIOR, R. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por

extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000100017.

SOUZA, L. F. T. **Modelagem de Processos Erosivos em Área de Contatos Geológicos no Alto Paranaíba**. 144p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Editores técnicos). **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.

UHLEIN, A.; BAPTISTA, M. C.; SEER, H. J.; CAXITO, F. A.; UHLEIN, G. J.; DARDENNE, M. A. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): sistema deposicional de leque submarino em bacia de ante-país. **Revista Geonomos**, v. 19, n. 2, 2011.

WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 25-37, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-20887-z

ZHAO, F.; ZHANG, Y.; DIJKSTRA, F. A.; LI, Z.; ZHANG, Y.; ZHANG, T.; LU, Y.; SHI, J.; YANG, L. Effects of amendments on phosphorous status in soils with different phosphorous levels. **Catena**, v. 172, p. 97-103, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2018.08.016

CRESCIMENTO INICIAL, DECOMPOSIÇÃO E MINERALIZAÇÃO DE FÓSFORO EM LEGUMINOSAS

Resumo: É relevante a identificação de espécies de leguminosas com potencial em absorver e mineralizar o fósforo (P) do solo, a fim de aumentar a disponibilidade deste elemento para as culturas subsequentes. Objetivou-se avaliar o crescimento inicial, a dinâmica de decomposição e as taxas de mineralização de P em quatro espécies de leguminosas. Os tratamentos foram definidos por esquema fatorial 2 x 4, assim especificado: dois solos (Latosolo Vermelho Acriférico típico – LVwf e Neossolo Litólico Chernossólico típico – RLm) e quatro espécies de leguminosas (crotalária juncea, guandu anão, feijão-de-porco e mucuna preta). As leguminosas foram cultivadas em casa de vegetação por 45 dias. Após esse período foram determinados os parâmetros de crescimento das plantas e os teores e conteúdos de P na parte aérea. Um outro ensaio foi conduzido a partir da incubação da massa seca da parte aérea das leguminosas, em esquema fatorial 4 x 4: quatro leguminosas (crotalária juncea, guandu anão, feijão-de-porco e mucuna preta) e quatro tempos (0, 20, 40 e 60 dias). Foram determinadas a taxa de decomposição e a mineralização de P das leguminosas. Guandu anão apresentou redução de 89% da biomassa produzida quando cultivado no solo com baixa disponibilidade de P, seguido de crotalária juncea (-84%), mucuna preta (-46%) e feijão-de-porco (-20%). Crotalária juncea e guandu anão apresentaram maiores teores de P na parte aérea, enquanto o feijão-de-porco e a mucuna preta apresentaram maiores conteúdos deste elemento na parte aérea. O feijão-de-porco apresentou a maior taxa de decomposição, o guandu anão a menor e a crotalária juncea apresentou a maior mineralização de P ao final dos 60 dias.

Palavras-chave: Absorção de fósforo. Biomassa vegetal. Fósforo disponível. Plantas de cobertura.

INITIAL GROWTH, DECOMPOSITION AND MINERALIZATION OF PHOSPHORUS IN LEGUMES

Abstract: It is relevant to identify legume species with the potential to absorb and mineralize phosphorus (P) from the soil, in order to increase the availability of this element for subsequent crops. The objective was to evaluate the initial growth, the decomposition dynamics and the mineralization rates of P in four legume species. The treatments were defined by a factorial scheme 2 x 4, as specified: two soils (Typical Acriferic Red Latosol, LVwf, and Typical

Chernosolic Lithic Neosol, RLM) and four legume species (*Crotalaria juncea*, dwarf pigeon pea, *Mucuna black*). Legumes were grown in a greenhouse for 45 days. After that period, the plant growth parameters and the contents and contents of P in the aerial part were determined. Another test was conducted from the incubation of the dry mass of the aerial part of the legumes, in a 4 x 4 factorial scheme: four legumes (*Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, and *Mucuna aterrima*) and four times (0, 20, 40 and 60 days). The rate of decomposition and P mineralization of legumes was determined. *Cajanus cajan* showed a 89% reduction in the biomass produced when cultivated in the soil with low availability of P, followed by *Crotalaria juncea* (-84%), *Mucuna aterrima* (-46%) and *Canavalia ensiformis* (-20%). *Crotalaria juncea* and *Cajanus cajan* showed higher levels of P in the aerial part, while *Canavalia ensiformis* and *Mucuna aterrima* presented higher contents of this element in the aerial part. *Canavalia ensiformis* showed the highest rate of decomposition, the *Cajanus cajan* the lowest and *Crotalaria juncea* showed the highest P mineralization at the end of 60 days.

Keywords: Phosphorus absorption. Vegetable biomass. Match available. Cover plants.

Introdução

Em regiões de clima tropical, os solos altamente intemperizados apresentam baixa disponibilidade de fósforo (P), limitando o crescimento e o desenvolvimento das plantas devido às fortes interações deste elemento com a fase sólida do solo, por exemplo, adsorção e precipitação com ferro (Fe) e alumínio (Al) (TELES et al., 2017; MANGALASSERY et al., 2019). Por conseguinte, o fornecimento deste nutriente representa parte expressiva do custo de produção nessas regiões (SILVA et al., 2011; ZHU et al., 2018).

Os solos precisam de altas taxas de aplicação de P, a fim de superar a sua grande capacidade de adsorção deste nutriente, resultando em quantidades duas vezes mais que as demandas das plantas (WITHERS et al., 2018; RHEINHEIMER et al. 2019). Como as aplicações de fertilizantes fosfatados normalmente excedem a quantidade de P requerida pelas plantas, o solo atua como um reservatório de P (TELES et al., 2017). O P acumulado nos solos representa uma potencial fonte secundária de P que poderia substituir, pelo menos em parte, os fertilizantes fosfatados, mas para isso é necessário encontrar maneiras de disponibilizá-lo (ZHU et al., 2018). Do ponto de vista sustentável, deve-se buscar formas eficientes para aumentar a disponibilidade de P para as plantas através de métodos capazes de recuperar o P adsorvido pelo solo. Uma prática que resulta em aumento na recuperação de P do solo é a implantação de

um sistema de rotação de culturas, incluindo espécies com alta eficiência em extrair e utilizar o P (SILVA et al., 2011).

A investigação da ciclagem de P mediante a utilização de plantas capazes de absorverem este elemento em solos com baixos teores disponíveis é uma demanda constante. As plantas desenvolveram diferentes maneiras de solubilizar o P do solo, especialmente em ambientes com baixa disponibilidade, existindo espécies que são capazes de adquirir esse elemento de frações que não estão disponíveis (TELES et al., 2017). As principais estratégias utilizadas pelas plantas para interceptar e absorver P são: aumento da relação entre a raiz e a parte aérea, exsudação radicular de enzima fosfatase ácida ou compostos orgânicos de baixo peso molecular e associação com outros microrganismos (RHEINHEIMER et al., 2019). Esses mecanismos variam com a espécie vegetal (SOLTANGHEISI et al., 2018), o que torna fundamental a identificação daquelas com maior potencial em absorver e ciclar o P do solo, principalmente as que podem ser utilizadas como plantas de cobertura (CASALI et al., 2016).

A inclusão de espécies com alta eficiência de absorção de P em rotação de culturas pode ajudar a disponibilizar este elemento para a cultura subsequente e reduzir o uso de fertilizantes fosfatados (SOLTANGHEISI et al., 2018). Entre as espécies que podem ser cultivadas como plantas de cobertura, destacam-se aquelas da família Fabaceae (TEODORO et al., 2011). Dentre elas, crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), guandu anão (*Cajanus cajan*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna preta (*Mucuna aterrima*) se destacam pelo potencial de utilização para adubação verde (PEREIRA et al., 2017). As leguminosas são fontes promissora de nitrogênio (N) na agricultura, em razão do aporte deste nutriente ser elevado, superior à maioria das espécies vegetais (FAGERIA et al., 2013). Contudo, estas espécies podem se tornar fontes promissora de P dependendo da taxa de decomposição e mineralização.

Neste sentido, o uso de leguminosas como culturas de cobertura pode ser uma alternativa para sistemas agrícolas, devido à sua capacidade de incorporar e ciclar quantidades significativas de outros nutrientes além do N, com o P, K e S (AITA et al., 2014; PEREIRA et al., 2016). Diante disto, é importante conhecer a capacidade e o potencial de diferentes espécies de leguminosas em acumular e liberar P ao longo do tempo para o manejo nutricional de plantas e do solo, economia de recursos financeiros com fertilizantes fosfatados e a redução do uso das reservas de P.

A principal forma de fornecimento de nutrientes derivado de adubos verdes ocorre através da decomposição e mineralização de sua biomassa depositados no solo quando cortada ou roçada. Para maior eficiência de fornecimento de P na adubação verde com leguminosas em áreas agrícolas é preciso conhecer os fatores que envolvem a decomposição e a liberação de

nutrientes no solo (MALUF et al., 2015), além da capacidade de produzir maior quantidade de biomassa em solos com baixo teor de P disponível. Neste sentido, são relevantes pesquisas envolvendo a mineralização de P e demais nutrientes, pois esses estudos podem auxiliar na escolha de espécies de leguminosas quando se visa realizar adubação verde, considerando o fornecimento de P para as culturas subsequentes (PEREIRA et al., 2016).

Partindo do pressuposto que há espécies de leguminosas com maior capacidade de absorção, decomposição e mineralização de P, objetivou-se avaliar o crescimento inicial, a dinâmica de decomposição e as taxas de mineralização de P em quatro espécies de leguminosas.

Material e Métodos

Caracterização do local do estudo

O estudo foi realizado em casa de vegetação, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), município de Viçosa, região da Zona da Mata de Minas Gerais. O local está inserido nas coordenadas geográficas X: 518969,59 e Y: 4919485,31 e apresenta altitude de 651 m. De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é tropical de altitude, com verões chuvosos e invernos frios e secos (Cwb). A precipitação média anual é de 1.268,2 mm, a umidade relativa em torno de 81% e a temperatura média anual de 20 °C, conforme dados obtidos na estação meteorológica local, no período de 1968 a 2010 (LORENZON et al., 2013).

Amostragem e caracterização dos solos

Foram coletadas amostras do horizonte A de duas classes solos no município de Lagoa Formosa, estado de Minas Gerais (mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba). Os solos coletados foram: Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf) e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2014). As coordenadas geográficas dos solos coletados são, respectivamente, X: 353390,67 e Y: 7926050,50 (LVwf) e X: 362621,72 e Y: 7919872,49 (RLm).

Foram realizadas as caracterizações físico-químicas dos solos (Tabela 1). A composição granulométrica foi determinada de acordo com os procedimentos descritos em Teixeira et al. (2017), com a dispersão das amostras com hidróxido de sódio (NaOH 0,1 mol L⁻¹) e agitação mecânica por 16 h a 50 rpm. As frações areia grossa, areia fina, silte e argila foram determinadas

por meio de separação em peneiras e sedimentação. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico e a densidade das partículas pelo balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017). A caracterização química foi realizada com as determinações dos valores de pH em água, CTC efetiva (t), CTC potencial (T), soma de bases (SB), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), e análises das concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} trocáveis, P disponível, P total e P-rem acidez potencial (H+Al) e carbono orgânico total (COT), seguindo as metodologias descritas por Teixeira et al. (2017).

Tabela 1. Caracterizações físico-químicas do horizonte A de dois solos coletados em Lagoa Formosa, estado de Minas Gerais.

Característica	Solo	
	LVwf	RLm
Areia Grossa (kg kg ⁻¹)	0,085	0,073
Areia Fina (kg kg ⁻¹)	0,079	0,082
Silte (kg kg ⁻¹)	0,232	0,360
Argila (kg kg ⁻¹)	0,603	0,486
⁽¹⁾ Classificação Textural	Muito Argilosa	Argila
Ds (g cm ⁻³)	1,17	1,22
Dp (g cm ⁻³)	3,08	2,89
pH H ₂ O (1:2,5)	5,72	6,01
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,46	15,08
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,18	4,32
K disponível (mg dm ⁻³)	29,00	163,00
P disponível (mg dm ⁻³)	1,70	768,00
P total (mg dm ⁻³)	2969,25	7419,85
P remanescente (mg L ⁻¹)	6,20	13,30
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,00	0,00
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	5,90	8,30
SB (cmol _c kg ⁻¹)	0,71	19,82
t (cmol _c kg ⁻¹)	0,71	19,82
T (cmol _c kg ⁻¹)	6,61	28,12
V (%)	10,70	70,50
m (%)	0,00	0,00
MOS (dag kg ⁻¹)	2,74	3,91

LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico; Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; SB: soma de bases; T: CTC potencial, t: CTC efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MOS: matéria orgânica do solo. ⁽¹⁾Classificação textural de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Cultivo das leguminosas

Os tratamentos foram definidos em um esquema fatorial 2 x 4, assim especificado: dois solos e quatro espécies de leguminosas, totalizando 48 unidades experimentais, distribuídas em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com seis repetições. As unidades experimentais foram constituídas de vasos de polietileno rígido com capacidade para 3 dm³ de solo. Nesses recipientes, as leguminosas crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), guandu anão (*Cajanus cajan*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna preta (*Mucuna aterrima*) foram cultivadas por 45 dias.

Para isto, os solos foram adubados, com exceção de P, de acordo com as recomendações de Novais et al. (1991). Foram aplicadas nos dois solos 100 mg dm⁻³ de N, 40 mg dm⁻³ de S, 0,81 mg dm⁻³ de B, 3,66 mg dm⁻³ de Mn, 0,15 mg dm⁻³ de Mo, 4,00 mg dm⁻³ de Zn, 1,33 mg dm⁻³ de Cu e 1,56 mg dm⁻³ de Fe. Utilizando, respectivamente, as fontes: NH₄NO₃, K₂SO₄, H₃BO₃, MnCl₂.4H₂O, NaMoO₄.2H₂O, ZnCl₂, CuCl, FeCl₃.6H₂O. Adicionalmente, no LVwf foram aplicados 300 mg dm⁻³ de K, utilizando como fonte KCl, e 2,04 g de carbonatos de cálcio (CaCO₃ p.a.) e de magnésio (MgCO₃ p.a.) na proporção 4:1 para o fornecimento de Ca e Mg (RIBEIRO et al., 1999). Na condução do experimento, foi realizada a remoção manual das plantas espontâneas e irrigação, quando necessário, para manter a umidade do solo em torno de 70% da capacidade de campo.

Avaliações agronômicas e nutricionais das leguminosas

Após 45 dias de cultivos foram procedidas as avaliações do crescimento das leguminosas. Foram determinados os seguintes parâmetros: altura (H), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST). A H foi mensurada com o auxílio de uma régua graduada em centímetros (cm) e o DC com um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, na altura de 5 cm do nível do solo. As plantas foram coletadas e as raízes separadas da parte aérea na base do caule. As raízes foram lavadas em água corrente para retirada do excesso de solo, em seguida a parte aérea e a raiz foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa a 65 °C por 72 h. Em seguida, pesadas em balança analítica para a quantificação de MSPA e MSR, cuja soma de ambas obteve-se a MST.

Amostras da parte aérea foram processadas em moinho tipo “Willye Super” com peneira de 1 mm de malha para a determinação dos teores de macronutrientes (P, Ca, Mg, K e S). Foi realizada a digestão nitroperclórica (MALAVOLTA et al., 1997) para quantificação dos teores

de macronutrientes, determinados através do ICP-OES – Inductively Coupled Plasma (espectrometria de emissão óptica por plasma induzido). Os conteúdos dos nutrientes na parte aérea das plantas foram calculados por meio da multiplicação da MSPA pela respectiva concentração dos elementos.

Decomposição e mineralização de nutrientes de leguminosas

Após o cultivo das leguminosas, foi realizado o ensaio de incubação para avaliar a decomposição da biomassa e a mineralização dos nutrientes das plantas. As leguminosas cultivadas no LVwf não produziram biomassa suficiente para a condução deste ensaio. Desta forma, o ensaio foi conduzido apenas com a biomassa das leguminosas cultivadas no RLm.

A massa seca da parte aérea (caules e folhas) das leguminosas foi incubada em frascos de vidro que permaneceram em sala de incubação com condições controladas (no escuro a 25° C ± 1), localizada no laboratório de Isótopos Estáveis da UFV. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), com três repetições. Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial (4 x 4), com incubação da biomassa de quatro leguminosas (crotalaria juncea, guandu anão, feijão-de-porco e mucuna preta), quatro tempos de avaliação (0, 20, 40 e 60 dias após o início da incubação - DAI).

O solo de cultivo das leguminosas (RLm) foi homogeneizado e secado ao ar livre. Em seguida foram coletados 50 g e colocados em recipientes de vidro, com capacidade de 500 mL. A parte aérea das leguminosas (caules e folhas) foi secada em estufa a 30 °C por 7 dias. Em seguida foi fragmentada manualmente em partículas de 1 a 2 cm, pesada, em balança de precisão, aproximadamente 3 g de cada espécie e distribuídas sobre uma tela de polietileno com abertura de 2 mm, posicionada previamente na superfície do solo. A umidade do solo foi mantida próximo de 70% da capacidade de campo com adição de água deionizada sobre o solo com a leguminosa, e os recipientes foram mantidos vedados. A fim de favorecer as trocas gasosas e evitar a redução de O₂, os recipientes foram abertos semanalmente, por 15 minutos.

Foi estabelecido quatro tempos de avaliação (0, 20, 40 e 60 DAI). A determinação da massa seca remanescente (MSR) de cada leguminosa foi realizada com coletas aos 20, 40 e 60 DAI, em que foram secadas em estufa de circulação forçada de ar, a 60° C por 72 h e, em seguida, pesadas. A MSR foi macerada em almofariz ágata para as determinações dos teores de P, K, Ca, Mg e S por digestão nitroperclórica (MALAVOLTA et al., 1997).

As taxas de decomposição dos nutrientes das leguminosas foram estimadas ajustando-se modelos de regressão aos valores observados. A escolha do modelo foi feita com base no menor

valor da soma dos quadrados do erro, na significância dos parâmetros da equação ($p < 0,05$) e no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) ajustado. Os modelos que descrevem a cinética da MSR foram testados no programa SigmaPlot 11.0, sendo escolhido o modelo proposto por Olson (1963), conforme a equação 1:

$$\hat{y} = y_0 e^{-kt} \quad \text{Eq.1}$$

em que \hat{y} é a quantidade estimada de massa seca remanescente (MSR) no tempo, t (anos); y_0 é a massa seca inicial; k é o parâmetro de decomposição da massa seca.

O tempo de meia-vida ($t_{0,5}$) das leguminosas foi calculado por:

$$t_{0,5} = - \ln (0,5) / 0,693 \quad \text{Eq.2}$$

em que $t_{0,5}$ é o tempo necessário para decomposição de 50% da massa seca da leguminosa.

Com base nos teores dos nutrientes na massa secas das leguminosas foram calculadas as quantidades mineralizadas (QM) e as porcentagens mineralizadas (PM) de cada leguminosa pelas equações 3 e 4:

$$QM = CI - CF \quad \text{Eq.3}$$

$$PM = (CF \times 100) / CI \quad \text{Eq.4}$$

em que CI é o conteúdo inicial e CF o conteúdo final do nutriente (g) na MSR de cada leguminosa após a incubação.

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), ao teste F ($p < 0,05$) e, quando significativo, ao teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparar as médias, utilizado o *software* estatístico Sisvar (FERREIRA, 2014).

Resultados e Discussão

Desenvolvimento das leguminosas após 45 dias de cultivo

Foi realizado o desdobramento da interação entre os fatores solo e leguminosa em razão da interação significativa ($p < 0,05$) (Tabela 2). As quatro espécies de leguminosas tiveram maiores médias de altura no RLM. Para o DC, crotalária juncea e guandu anão apresentaram as maiores médias quando cultivadas no RLM, enquanto que feijão-de-porco e mucuna preta o DC foi estatisticamente igual quando cultivadas nos dois solos. A média de MSR foi superior no RLM apenas para crotalária juncea e mucuna preta, para feijão-de-porco e guandu anão as médias foram estatisticamente iguais para os dois solos. O NF, a MSPA e a MST das leguminosas foram superiores no RLM em relação ao LVwf, exceto para a MST do feijão-de-porco, que foi similar nos solos.

Tabela 2. Análise do desdobramento dos efeitos dos tratamentos sobre as variáveis altura (H), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST) da interação entre quatro espécies de leguminosas cultivadas em dois solos com diferentes disponibilidades de P.

Solo x Leguminosa	Crotalária	Guandu anão	Feijão-de-porco	Mucuna preta
H (cm)				
LVwf	52,67 bB	26,17 bC	48,00 bB	105,00 bA
RLm	142,5 aA	65,33 aC	141,00 aA	124,17 aB
DC (mm)				
LVwf	2,22 bC	2,12 bC	4,82 aA	3,03 aB
RLm	4,93 aA	4,28 aB	5,02 aA	3,30 aC
NF				
LVwf	23,33 bB	19,00 bB	11,00 bC	29,83 bA
RLm	47,67 aA	45,67 aAB	16,00 aC	41,17 aB
MSPA (g)				
LVwf	0,35 bC	0,09 bC	6,57 bA	4,39 bB
RLm	5,79 aB	3,91 aC	8,92 aA	6,54 aB
MSR (g)				
LVwf	2,10 bA	0,42 aA	1,93 aA	0,49 bA
RLm	9,58 aA	0,81 aB	1,72 aB	2,52 aB
MST (g)				
LVwf	2,45 bB	0,50 bB	8,49 aA	4,88 bAB
RLm	15,37 aA	4,72 aB	10,63 aA	9,06 aAB

LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico e RLM - Neossolo Litólico Chernossólico típico. Letras minúsculas diferentes na coluna e letras maiúsculas diferentes na linha diferem significativamente pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade.

As leguminosas apresentaram melhor desenvolvimento inicial no solo com maior disponibilidade de P (RLm). Todos os nutrientes, com exceção do P, foram fornecidos, quando necessário, nos dois solos, desta forma a baixa disponibilidade de P no LVwf limitou o desenvolvimento das leguminosas. O teor de P disponível no LVwf foi classificado como muito baixo (RIBEIRO et al., 1999) e não supre a demanda das espécies. De acordo com a Lei do Mínimo, proposta pelo químico Justus Von Liebig em 1840, o crescimento vegetal é limitado pelo elemento essencial disponível no solo em quantidade inadequada para suprir a demanda das plantas, mesmo que os demais estejam em quantidades balanceadas (LEPSCH, 2016).

Considerando a biomassa total produzida pelas quatro espécies de leguminosas observou-se que quando não possuiu a maior redução da biomassa quando cultivado no solo com baixa disponibilidade de P (LVwf), redução de 89% da MST em relação ao valor obtido quando cultivado no solo com maior disponibilidade de P (RLm). A redução da biomassa produzida foi de 84% para crotalária juncea, 46% para mucuna preta e 20% para feijão-de-porco. Cada espécie vegetal apresenta determinadas exigências com relação à fertilidade do solo e uma consequência disso relaciona-se ao fato de espécies mais rústicas crescerem e se desenvolverem bem em solos de menor fertilidade, enquanto solos férteis apresentam geralmente espécies mais exigentes (ESPÍNDOLA, GUERRA, ALMEIDA, 1997).

Quando há maior disponibilidade de P as plantas crescem mais, entretanto certas espécies apresentam habilidades diferenciadas em aproveitar os nutrientes do solo, assim, mesmo em solos com baixa disponibilidade de P, pode haver espécies hábeis em absorvê-lo em quantidades que garantam seu bom desenvolvimento (CASALI et al., 2016). Dentre as espécies deste estudo, destacaram-se feijão-de-porco e mucuna preta, que apresentaram menor redução da biomassa quando cultivadas em condições de baixa disponibilidade de P.

Os sintomas de deficiência de P não são marcantes, como ocorre, por exemplo, com nitrogênio e potássio, manifestando-se mais como parada de crescimento e em algumas plantas ocorre coloração vermelha nos talos, decorrente do aumento de antocianina (RAIJ, 2011). No presente estudo não foi identificado nenhum sintoma foliar nas plantas, apenas a redução do crescimento quando cultivadas no LVwf.

Macronutrientes na parte aérea das leguminosas

Houve interação significativa entre solo e leguminosa para os teores de macronutrientes (P, Ca, Mg, K e S), assim, foi feita a análise do desdobramento da interação solo e leguminosa. Os maiores teores de P na parte aérea das leguminosas foram obtidos quando cultivadas no

RLm, sendo crotalária juncea e guandu anão as espécies com maiores teores em relação as demais, independente do solo (Tabela 3). Pode-se inferir que tais espécies requerem maior aquisição de P durante o seu ciclo produtivo. O que justifica a maior redução do seu desenvolvimento quando cultivadas no solo com menor disponibilidade de P (Tabela 2).

Tabela 3. Análise do desdobramento para os teores de macronutrientes na parte aérea das leguminosas cultivadas em dois solos com diferentes disponibilidades de P.

Solo x Leguminosa	Crotalária	Guandu anão	Feijão-de-porco	Mucuna preta
P (g kg ⁻¹)				
LVwf	1,24 bA	1,17 bA	0,76 bC	0,85 bAB
RLm	3,15 aA	3,13 aA	1,69 aC	2,32 aB
Ca (g kg ⁻¹)				
LVwf	11,57 aA	11,03 aA	10,03 bA	9,35 bA
RLm	12,26 aB	13,17 aB	18,21 aA	14,64 aB
Mg (g kg ⁻¹)				
LVwf	3,61 bA	2,38 bB	2,63 aB	2,85 aB
RLm	5,42 aA	4,08 aB	2,97 aAB	3,03 aAB
K (g kg ⁻¹)				
LVwf	12,63 bA	11,82 bAB	10,93 aAB	8,52 bB
RLm	17,85 aA	18,55 aA	11,59 aB	11,34 aB
S (g kg ⁻¹)				
LVwf	2,04 bA	1,71 bB	1,53 aC	1,62 aC
RLm	3,40 aA	2,40 aA	1,55 aA	1,81 aA

LVwf - Latossolo Vermelho Acriférico típico e RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico. Letras minúsculas diferentes na coluna e letras maiúsculas diferentes na linha diferem significativamente pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade.

De modo geral, foram observados maiores teores de Ca>K>Mg>S>P para feijão-de-porco e mucuna preta e K>Ca>Mg>S>P para crotalária e guandu anão. Apesar desses resultados, os teores de P foram baixos em todas as plantas. De acordo com Rajj (2011) os teores de P nas plantas são baixos, não ultrapassando 5 g kg⁻¹. Isso foi constatado no presente estudo, mesmo quando cultivadas no solo com mais de 700 mg dm⁻³ de P disponível (Tabela 1), o teor máximo de P na parte aérea das plantas foi de 3,15 g kg⁻¹.

Conteúdos de macronutrientes na parte aérea das leguminosas

Houve interação significativa entre solo e leguminosa para os conteúdos de macronutrientes (P, Ca, Mg, K e S) na parte aérea das espécies de leguminosas cultivadas no LVwf e RLm. Desta forma, foi feita a análise do desdobramento da interação para os conteúdos de macronutrientes. Os conteúdos de P e dos demais macronutrientes, foram superiores no RLm

nas quatro leguminosas (Tabela 4), devido à maior biomassa produzida neste solo. O conteúdo de nutrientes na planta considera a concentração de nutriente na planta e a biomassa produzida. Quando cultivadas no RLm, as leguminosas crotalária juncea, feijão-de-porco e mucuna preta apresentaram maiores conteúdos de P, enquanto que quando cultivadas no LVwf os maiores conteúdos foram observados apenas em feijão-de-porco e mucuna preta.

Tabela 4. Análise do desdobramento da para os conteúdos de macronutrientes na parte aérea das leguminosas cultivadas em dois solos com diferentes disponibilidades de P.

Solo x Leguminosa	Crotalária	Guandu anão	Feijão-de-porco	Mucuna preta
P (mg planta ⁻¹)				
LVwf	0,39 bB	0,09 bB	4,76 bA	3,73 bA
RLm	17,82 aA	12,57 aB	15,46 aAB	15,22 aAB
Ca (mg planta ⁻¹)				
LVwf	3,26 bB	0,90 bB	63,37 bA	40,94 bA
RLm	70,00 aC	51,90 aC	167,14 aA	95,51 aB
Mg (mg planta ⁻¹)				
LVwf	1,53 bC	0,34 bC	18,81 bA	13,22 bB
RLm	20,53 aAB	5,56 aC	24,15 aA	18,57 aB
K (mg planta ⁻¹)				
LVwf	4,30 bC	0,93 bC	72,36 bA	37,43 bB
RLm	102,15 aA	74,39 aB	99,47 aA	74,52 aB
S (mg planta ⁻¹)				
LVwf	0,95 bB	0,20 bB	9,67 bA	7,10 bA
RLm	11,53 aB	6,87 aC	14,28 aA	11,85 aAB

LVwf - Latossolo Vermelho Acriférrico típico e RLm - Neossolo Litólico Chernossólico típico. Letras minúsculas diferentes na coluna e letras maiúsculas diferentes na linha diferem significativamente pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade.

Os teores de P foram superiores na crotalária juncea em ambos os solos, entretanto seu conteúdo foi inferior no LVwf, devido a pequena quantidade de biomassa produzida. A mucuna preta e o feijão-de-porco, embora possuíram baixos teores de P na parte aérea, conseguiram acumular maiores quantidade de P, devido à maior produção de biomassa. De acordo com Fernandes et al. (2007), espera-se que as espécies utilizadas para adubos verdes produzam massa seca e reciclem nutrientes em grandes quantidades. Neste sentido, feijão-de-porco e mucuna preta se destacaram devido à maior produção de biomassa sob condições de menor disponibilidade de P, que é uma das características mais importantes das leguminosas utilizadas como adubos verdes (FERNANDES et al., 2007).

A avaliação dos conteúdos de P no tecido vegetal é importante para auxiliar na identificação de espécies que apresentem maior capacidade de absorção e maior eficiência de uso dos nutrientes (CASALI et al., 2016). O P acumulado na biomassa da cultura de cobertura

pode ser liberado através da decomposição dos seus resíduos, sendo aproveitado pela cultura subsequente, aumentando a eficiência desse nutriente no sistema de produção agrícola (TELES et al., 2017; SOLTANGHEISI et al., 2018). Para avaliar a eficiência de uma planta como adubação verde deve-se observar se ela produz grande quantidade de biomassa e se recicla elevada quantidade de nutrientes (CAVALCANTE et al., 2012).

Decomposição das leguminosas

O feijão-de-porco apresentou a maior taxa de decomposição ao longo do tempo, com valor médio de MSR aos 60 DAI de 45,14% e o guandu anão a menor taxa de decomposição, com valor médio de MSR aos 60 DAI de 56,9%; a decomposição da mucuna preta e da crotalária juncea foram similares (Figura 1). O menor tempo de meia vida ($t_{0,5}$) observado foi para o feijão-de-porco e o maior para o guandu anão (Figura 1), com resultado inversamente proporcional ao observado para a taxa de decomposição nestas leguminosas, enquanto que para a mucuna preta e crotalária juncea foram similares. O tempo de meia-vida é uma característica útil na avaliação da decomposição de materiais vegetais, pois expressa o período necessário para que metade das massas vegetais se decomponha ou para que metade dos nutrientes contidos nesses materiais seja liberado (ESPINDOLA et al., 2006).

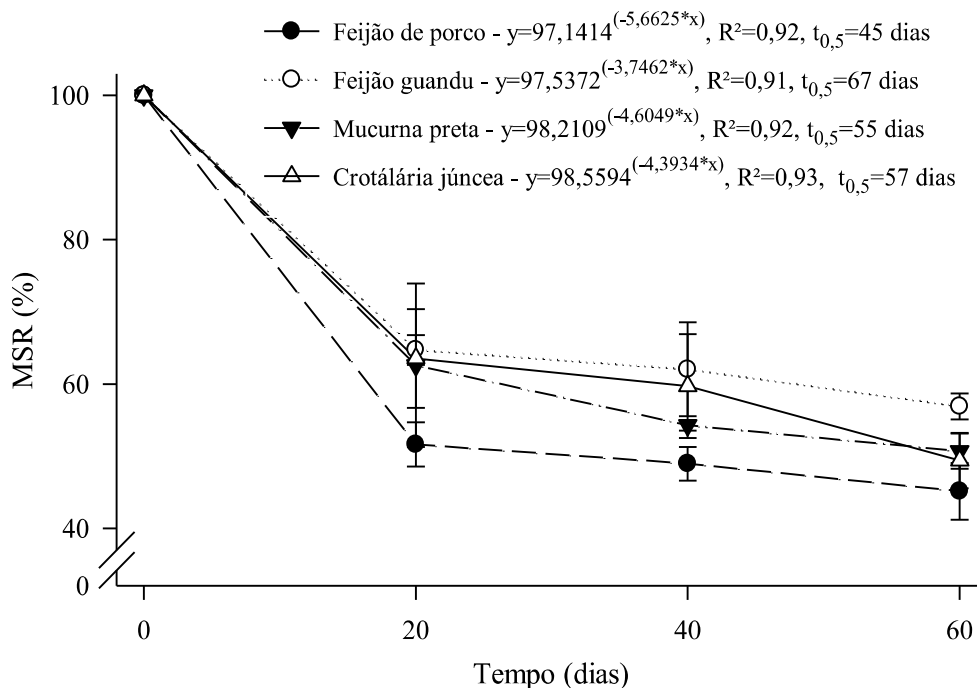


Figura 1. Massa seca remanescente (MSR) de leguminosas, ao longo do tempo de incubação. Equações ajustadas no modelo proposto por Olson (1963) para a decomposição das leguminosas com os respectivos tempos de meia-vida ($t_{0,5}$).

As maiores taxas de decomposição ocorreram nos primeiros 20 dias após a incubação com uma média geral de 60,63% de MSR, a partir desse período a decomposição de massa seca ocorreu de forma mais lenta até 60 dias. As elevadas taxas de decomposição no período inicial ocorrem devido a decomposição mais intensa das frações mais lábeis como aminoácidos, nucleotídeos, açúcares, amido, proteínas (VALADARES et al., 2016), além do menor teor de lignina e baixa relações de C/N e lignina/N (WATTHIER et al., 2020). Nos períodos seguintes, as taxas de decomposição foram reduzidas em razão de maiores frações de componentes recalcitrantes como lignina, taninos e celulose (VALADARES et al., 2016).

A maior taxa de decomposição do feijão-de-porco pode ter sido favorecida pelos menores teores de celulose, hemicelulose, lignina e maiores teores de N, menor relação C/N (WATTHIER et al., 2020). A decomposição do guandu é mais lenta, em relação às outras leguminosas, devido aos elevados teores de compostos de carbono dos grupos aromáticos e alquilas (mais recalcitrantes) e relação C/N mais elevada que contribuem para menor decomposição (BURLE et al., 2006; LIMA et al., 2012).

A relação C/N difere entre os materiais vegetais em razão, principalmente, da considerável variação existente no teor de N total da matéria seca, uma vez que o teor de C varia pouco e situa-se entre 40 a 45% (AITA et al., 2014). De modo geral, as leguminosas apresentam baixa relação C/N, esse aspecto, aliado à presença de substâncias solúveis em grande quantidade, facilita a ação de microrganismos na sua decomposição que pode ser rápida e assegurar maior suprimento de nutrientes às culturas (PERIN et al., 2010).

O processo de decomposição e as taxas de mineralização de nutrientes são regulados pelos teores e relações de C, N, P, S, lignina, celulose e polifenóis, pela atuação de microrganismos decompositores e das condições edafoclimáticas (PERIN et al., 2010, MALUF et al., 2015; XAVIER et al., 2017). Assim, as taxas de mineralização podem ser diferenciadas entre as espécies de leguminosas utilizadas na adubação verde (JOHNSON et al., 2007). O conhecimento da decomposição e mineralização de nutrientes das leguminosas na prática da adubação verde é de fundamental importância para alcançar o máximo de eficiência no sistema de produção, considerando o fornecimento de nutrientes para culturas sucessoras via ciclagem biogeoquímica (MALUF et al., 2015).

Mineralização de P e demais macronutrientes de leguminosas

A crotalária juncea apresentou maior CI de P, seguida de feijão-de-porco, mucuna preta e guandu anão; O CF de P também foi maior na crotalária juncea, seguido de mucuna preta, guandu anão e feijão-de-porco (Tabela 5). A crotalária juncea apresentou conteúdo inicial de P em cerca de 10, 6 e 2 vezes maior que as leguminosas feijão-de-porco, guandu anão e mucuna preta, respectivamente. A quantidade de P mineralizada pela crotalária juncea foi superior em 96, 95, e 80% em relação ao feijão-de-porco, mucuna preta e guandu anão, respectivamente. Este resultado indica que essa leguminosa possui maior eficiência em extrair o P do solo, acumular na sua biomassa e disponibilizar no solo para as plantas, uma vez que a quantidade de massa seca incubada foi igual para os tratamentos.

Embora o guandu anão tenha apresentado menores conteúdos iniciais e finais de P, apresentou a maior porcentagem de mineralização, mas com valor aproximado da crotalária juncea, variando entre 45 a 50%. O guandu anão e a crotalária juncea apresentaram as maiores porcentagem de mineralização de P, que foram similares entre si, contudo, a quantidade mineralizada deste elemento para a crotalária juncea foi, aproximadamente, 5 vezes maior que o guandu anão.

Tabela 5. Conteúdos inicial (CI) e final (CF), quantidade mineralizada (QM) e porcentagem mineralizada (PM) de P, K, Ca, Mg e S de leguminosas, aos 60 dias após a incubação.

Leguminosa	CI	CF	QM	PM
	----- g -----			%
P				
Feijão-de-porco	0,169	0,138	0,031 b	18,14
Guandu anão	0,313	0,156	0,157 b	50,08
Mucuna preta	0,834	0,760	0,044 b	5,33
Crotalária juncea	1,785	0,982	0,803 a	45,01
K				
Feijão-de-porco	1,159	0,8375	0,322 b	27,74
Guandu anão	1,855	1,0071	0,850 a	45,71
Mucuna preta	1,464	1,5755	-0,112 b	-
Crotalária juncea	1,226	1,3007	-0,075 b	-
Ca				
Feijão-de-porco	1,821	1,160	0,661 a	63,72
Guandu anão	1,317	0,966	0,351 b	73,34
Mucuna preta	0,303	0,256	0,047 c	84,45
Crotalária juncea	0,542	0,298	0,244 bc	55,01
Mg				
Feijão-de-porco	0,297	0,234	0,063 b	36,28
Guandu anão	0,408	0,329	0,079 b	26,66
Mucuna preta	0,181	0,113	0,068 b	15,55
Crotalária juncea	0,340	0,060	0,280 a	44,99
S				
Feijão-de-porco	0,155	0,099	0,056 c	21,13
Guandu anão	0,240	0,112	0,128 b	19,38
Mucuna preta	0,181	0,113	0,068 c	37,79
Crotalária juncea	0,340	0,060	0,280 a	82,23

Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey, a 5%.

A maior taxa de mineralização de P da crotalária juncea provavelmente está relacionada às baixas relações C/P (SORATTO et al., 2012) e C/N (PERIN et al., 2010), e composição bioquímica, como os teores de lignina, fibras e polifenóis (LIMA et al., 2012). A mineralização rápida de P está associada à perda de P solúvel acumulado nos vacúolos dos tecidos das plantas (TAIZ et al.2017) e pelo maior teor de P que essa leguminosa possui na sua biomassa. Uma proporção de C/P inferior a 200 em resíduos vegetais contribui na liberação rápida de P, enquanto que essa relação superior a 300 favorece a imobilização de P (DOSSA et al., 2009; MALUF et al., 2015).

O P participa de constituintes celulares, como fosfolípidos, ácidos nucleicos e estruturas de DNA e RNA, e faz parte da molécula de ATP (HA et al., 2007). A liberação do P está

diretamente relacionada ao teor total de P inorgânico e P solúvel da adubação verde (GIACOMINI et al., 2003). O P inorgânico é rapidamente liberado para o solo após a incorporação da adubação verde e pode ser rapidamente consumido por microrganismos do solo, nos estágios posteriores de decomposição, P orgânico é liberado mais lentamente (HA et al., 2007).

Em relação aos demais macronutrientes, a crotalária juncea contribuiu para maior taxa de mineralização de Mg e S aos 60 dias, enquanto o guandu anão e o feijão-de-porco contribuíram para maiores taxas de mineralização de K e Ca, respectivamente (Tabela 2).

O K, em razão de não estar associado a nenhum componente estrutural do tecido vegetal e por estar na forma iônica no vacúolo das células, é liberado mais fácil com o rompimento da membrana plasmática (LEITE et al., 2010; MARSCHNER, 2012). Segundo Maluf et al. (2015) a mineralização não seria um pré-requisito para a transferência de K de resíduos vegetais para o solo, sendo o termo liberação mais adequado para esse nutriente. De modo geral, o Ca foi o nutriente mais mineralizado no período de 60 dias, seguido por P, S e Mg.

Embora o feijão-de-porco tenha apresentado maior taxa de decomposição no período de 60 dias, a crotalária juncea apresentou a maior taxa de mineralização para a maioria dos macronutrientes, incluindo o P. De acordo com Aita et al. (2014), é importante que a taxa de decomposição dos adubos verdes ocorra em sincronia com a demanda dos nutrientes pelas culturas em sucessão. Uma rápida decomposição dos resíduos vegetais resulta em maior taxa de mineralização, enquanto a decomposição mais lenta resulta em menor taxa de mineralização (AITA et al., 2014; XAVIER et al., 2017).

Conclusões

As leguminosas feijão-de-porco e mucuna preta apresentaram menor redução do crescimento quando cultivadas no solo com baixa disponibilidade de P;

O feijão-de-porco apresentou a maior taxa de decomposição e menor tempo de meia-vida, enquanto o guandu anão a menor taxa e o maior tempo;

A crotalária juncea apresentou os maiores conteúdos de P, no início e ao final da incubação, e maior mineralização de P, o que a torna altamente promissora no fornecimento deste elemento para as culturas sucessoras.

Referências

- AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; CERETTA, C. A. Decomposição e liberação de nutrientes dos resíduos culturais de adubos verdes. In: LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (eds.) **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. EMBRAPA Agropecuária Oeste, Brasília, DF, 2014. p. 225-264.
- BURLE, M. L.; CARVALHO, A. M.; AMABILE, R. F.; PEREIRA, J. Caracterização das espécies de adubo verde. In: CARVALHO, A. M.; AMABILE, R. F. (eds.) **Cerrado: Adubação verde**. EMBRAPA Cerrados, Planaltina, DF, 2006. p. 71-142.
- CASALI, C. A.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R. D.; CALEGARI, A.; PICCIN, R. **Benefícios do uso de plantas de cobertura de solo na ciclagem de fósforo**. In: TIECHER, T. (Ed.) *Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água*. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2016. p. 23–33.
- CAVALCANTE, V. S.; SANTOS, V. R.; SANTOS NETO, A. L. D.; SANTOS, M. A., SANTOS, C. G.; COSTA, L. C. Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000500008
- CAVALCANTE, V. S.; BARBOZA, J. T. V.; COSTA, L. C.; SANTOS, V. R.; SANTOS, M. J. N. Produção de adubos verdes e a utilização dos resíduos no cultivo da cebolinha. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 10, n. 1, 2015.
- DOSSA, E. L.; KHOUMA, M.; DIEDHIOU, I.; SENE, M.; KIZITO, F.; BADIANE, A. N.; SAMBA, S. A.; DICK, R. P. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization potential of semiarid Sahelian soils amended with native shrub residues. **Geoderma**, v. 148, p. 251-260, 2009. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.10.009
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. SANTOS, H. G. [et al.]. – 4. ed. – Brasília, DF: Embrapa, 2014. E-book: il. color.
- ESPINDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; TEIXEIRA, M. G.; URQUIAGA, S. Decomposição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 321-328, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000200012
- ESPÍNDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. **Adubação verde: estratégia para uma agricultura sustentável**. Seropédica: EMBRAPA-CNPAB, 1997. 20 p. (EMBRAPA-CNPAB. Documentos, 42).
- FAGERIA, N. K.; FERREIRA, E. P. B.; BALIGAR, V. C.; KNUPP, A. M. Growth of Tropical Legume Cover Crops as Influenced by Nitrogen Fertilization and Rhizobia. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 44, p. 3103-3119, 2013. DOI: 10.1080/00103624.2013.832283

- FERNANDES, A. R.; MORAIS, F. D. O.; LINHARES, L. C. F.; SILVA, G. R. D. Produção de matéria seca e eficiência nutricional para P, Ca e Mg em leguminosas herbáceas. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 2, p. 169-176, 2007. DOI: 10.1590/S0044-59672007000200001
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014. DOI: 10.1590/S1413-70542014000200001
- GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HÜBNER, A. P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E. B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 1097-1104, 2003. DOI: 10.1590/S0100-204X2003000900011
- HA, K. V.; MARSCHNER, P.; BÜNEMANN, E. K.; SMERNIK, R. J. Chemical changes and phosphorus release during decomposition of pea residues in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, p. 2696-2699, 2007. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.05.017
- JOHNSON, J. M. F.; BARBOUR, N. W.; LACHNIGHT-WEYERS, S. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, p. 155-162, 2007. DOI: 10.2136/sssaj2005.0419
- KOPPEN, W. **Climatologia com um estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478p.
- LEITE, L. F. C.; FREITAS, R. C. A.; SARGILO, E.; GALVÃO, S. R. S. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos vegetais depositados sobre Latossolo Amarelo no Cerrado Maranhense. **Revista Ciências Agrônômicas**, v. 1, n. 1, p. 29-35, 2010. DOI: 10.5935/1806-6690.20100004
- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. Ed. São Paulo, Oficina de textos, 2010. 216 p.
- LIMA, J. D.; SAKAI, R. K.; ALDRIGHI, M. Produção de biomassa e composição química de adubos verdes cultivados no Vale do Ribeira. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 5, p. 709-717, 2012.
- LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; LEITE, H. G. Precipitação efetiva e interceptação da chuva em um fragmento florestal com diferentes estágios de regeneração. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, 2013. DOI: 10.1590/S0100-67622013000400005
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MALUF, H. J. G. M.; SOARES, E. M. B.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; SILVA, L. D. O. G. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1681-1689, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140657
- MANGALASSERY, S.; KALAIIVANAN, D.; PHILIP, P. S. Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered

tropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 144-151, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2018.12.008

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3^aed. New York: Academic Press, 2012.

NOVAIS, R. D.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. D. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA A. J.; GARRIDO W. E.; ARAÚJO J. D.; LOURENÇO S. (eds). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. EMBRAPA SEA, Brasília, 1991. p. 189-253

OLSON, J. S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology**, v. 44, p. 322-331, 1963. DOI: 10.2307/1932179

PEREIRA, N. S.; SOARES, I.; MIRANDA, F. R. D. Decomposition and nutrient release of leguminous green manure species in the Jaguaribe-Apodi region, Ceará, Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, n. 6, p. 970-975, 2016. DOI: 10.1590/0103-8478cr20140468

PEREIRA, A. P.; SCHOFFEL, A.; KOEFENDER, J.; CAMERA, J. N.; GOLLE, D. P.; HORN, R. C. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 4, p. 120-129, 2017. DOI: 10.19084/RCA17065

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; CABALLERO, S. S. U.; GUERRA, J. G. M.; GUSMÃO, L. A. Acúmulo e liberação de P, K, Ca e Mg em crotalária e milho solteiros e consorciados. **Ceres**, v. 57, n. 2, p.274-281, 2010. DOI: 10.1590/S0034-737X2010000200020

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RHEINHEIMER, D. S.; FORNARI, M. R.; BASTOS, M. C.; FERNANDES, G.; SANTANNA, M. A.; CALEGARI, A.; CANALLI, L. B. S.; CANER, L.; LABANOWSKI, J.; TIECHER, T. Phosphorus distribution after three decades of different soil management and cover crops in subtropical region. **Soil & Tillage Research**, v. 192, p. 33-41, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.04.018

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa: UFV, 1999. 359 p.

SILVA, T. O.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; PALUDO, V. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 4, 2011. DOI: 10.5433/1679-0359.2011v32n4p1315

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2018.01.006

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2017. 888 p.

- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Editores técnicos). **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.
- TELES, A. P. B.; RODRIGUES, M.; BEJARANO HERRERA, W. F.; SOLTANGHEISI, A.; SARTOR, L. R.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. **Soil use and management**, v. 33, p. 34-44, 2017. DOI: 10.1111/sum.12327
- TEODORO, R. B.; OLIVEIRA, F. L. D.; SILVA, D. M. N. D.; FÁVERO, C.; QUARESMA, M. A. L. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Ho Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 35, v. 1, p. 635-643, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200032
- VALADARES, R. V.; ÁVILA-SILVA, L.; TEIXEIRA, R. S.; SOUSA, R. N.; VERGÜTZ, L. Green manures and crop residues as source of nutrients in tropical environment. In: LARRAMENDY, M.; SOLONESKI, S. (eds). **Organic fertilizers - from basic concepts to applied outcomes**. London: INTECH p.51-84. 2016. DOI: 10.5772/62981
- WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 25-37, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-20887-z
- XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, J. I. A.; SILVA, M. R. Decomposition and nutrient release dynamics of shoot phytomass of cover crops in the Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017. DOI: 10.1590/18069657rbc20160103
- ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 522-537, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.095

CRESCIMENTO DE MUDAS DE CAFEIEIRO APÓS O CULTIVO DE LEGUMINOSAS EM SOLOS COM TEORES CONTRASTANTES DE FÓSFORO

Resumo: O crescimento do cafeeiro é alterado pela disponibilidade de fósforo (P) no solo e pode ser influenciado pela adubação verde com leguminosas no pré-cultivo. Objetivou-se avaliar o crescimento e a eficiência de uso de P em mudas de cafeeiro em solos com diferentes disponibilidades de P após o cultivo de leguminosas. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com seis repetições. Os tratamentos foram arranjados em um esquema fatorial $[(2 \times 4) + 1]$: dois solos, pré-cultivo com quatro espécies de leguminosas e um tratamento adicional como controle (sem planta pré-cultivada). Os solos selecionados foram: Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf), com baixa disponibilidade de P, e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm), com alta disponibilidade de P. As parcelas foram constituídas de vasos com capacidade de 3 dm³ de solo, onde foram cultivadas previamente, por 45 dias, as leguminosas: *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis* e *Mucuna aterrima*. As mudas de cafeeiro foram transplantadas para os vasos e cultivadas por 120 dias, em seguida foram procedidas as avaliações. Para a avaliação do crescimento das plantas foram determinados: altura (H), diâmetro do caule (DC), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST). Também foram determinados os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S). As mudas apresentaram maior crescimento quando cultivadas no solo com maior disponibilidade de P, com incrementos de 13,05% na H, 4,86% no DC, 46,98% na MSPA, 17,61% na MSR e 41,80% na MST. Houve ainda incrementos de 28,09% no teor de P na parte aérea das mudas de cafeeiro cultivadas no RLM. O pré-cultivo da *Crotalaria juncea* proporcionou os maiores incrementos no crescimento dos cafeeiros em relação ao tratamento controle (sem planta), embora similar ao proporcionado pelas demais leguminosas. As mudas dos cafeeiros cultivadas após o cultivo do *Canavalia ensiformis* apresentaram os maiores teores de P, Ca, Mg e S na parte aérea, com incrementos de 45%, 39%, 18% e 17% respectivamente, em relação ao tratamento sem planta. As mudas de café apresentaram maior crescimento e maiores teores de nutrientes na parte aérea quando cultivadas no solo com maior disponibilidade de P e após o pré-cultivo com leguminosas, com destaque para o pré-cultivo com *Crotalaria juncea* e *Canavalia ensiformis*.

Palavras chave: Adubação verde. Adubação fosfatada. Ciclagem de fósforo. *Coffea arabica*. Eficiência nutricional.

GROWTH OF COFFEE SEEDLINGS AFTER THE GROWING OF VEGETABLES IN SOILS WITH CONTRASTANT CONTENT OF PHOSPHORUS

Abstract: The development of coffee is altered by the availability of phosphorus (P) in the soil and can be influenced by green manure with legumes in the pre-cultivation. The objective was to evaluate the growth and the efficiency of use of P in coffee seedlings in soils with different availability of P after the cultivation of legumes. The experimental design was completely randomized, with six replications. The treatments were arranged in a factorial scheme [(2 x 4) + 1]: two soils, pre-cultivation with four legume species and an additional treatment as a control (without pre-cultivated plant). The soils selected were: Typical Acriferric Red Latosol (LVwf), with low availability of P, and Typical Chernosolic Lithic Neosol (RLm), with high availability of P. The plots consisted of pots with a capacity of 3 dm³ of soil, where previously grown, for 45 days, the legumes: *Crotalaria juncea*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis* and *Mucuna aterrima*. The coffee seedlings were transplanted to the pots and grown for 120 days, then the evaluations were carried out. For the evaluation of plant growth, height (H), stem diameter (DC), shoot dry matter (MSPA), root (MSR) and total (MST) mass were determined. The contents of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S) were also determined. Seedlings showed greater growth when cultivated in the soil with greater availability of P, with increments of 13.05% in H, 4.86% in DC, 46.98% in MSPA, 17.61% in MSR and 41.80% at the MST. There were also increases of 28.09% in the P content in the aerial part of the coffee seedlings grown in the RLm. The pre-cultivation of *Crotalaria juncea* provided the largest increases in the growth of coffee trees in relation to the control treatment (without plant). The coffee seedlings grown after the cultivation of *Canavalia ensiformis* showed the highest levels of P, Ca, Mg and S in the aerial part, with increments of 45%, 39%, 18% and 17% respectively, in relation to the treatment without plant. The coffee seedlings showed greater growth and higher nutrient contents in the shoot when cultivated in the soil with greater availability of P and after pre-cultivation with legumes, with emphasis on pre-cultivation with *Crotalaria juncea* and *Canavalia ensiformis*.

Keywords: Green manure. Phosphate fertilization. Phosphorus cycling. *Coffea arabica*. Nutritional efficiency.

Introdução

Devido à importância econômica e social do café para o Brasil é relevante pesquisas que visem o aumento da eficiência na absorção de fósforo (P) e sua influência no crescimento do cafeeiro, que está relacionado com a produtividade. O cafeeiro necessita de macro e micronutrientes essenciais para o seu completo desenvolvimento (VILELA et al., 2017). O P é um dos macronutrientes mais importante para o cafeeiro, pois resulta em maior desenvolvimento de raiz e vigor das plantas (SANTINATO et al., 2014), que são fatores fundamentais para garantir maior crescimento, desenvolvimento e produtividade.

Em solos tropicais, bastante intemperizados, é comum a baixa disponibilidade de P devido à grande interação dos fosfatos com a fase sólida do solo, o qual pode ser adsorvido ou precipitado, tornando-se indisponível para as plantas. A retenção do P adicionado ao solo ocorre tanto pela precipitação do P em solução com formas iônicas de ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca), como pela sua adsorção aos oxihidróxidos de Fe e Al (NOVAIS, SMITH, 1999). Em solos com baixa disponibilidade de P são comuns aplicações elevadas deste nutriente visando elevar seu teor próximo do nível crítico (RAIJ, 2011).

Estudos demonstraram a relação do fornecimento de P com fertilizantes fosfatados e o crescimento das mudas de cafeeiro (TOMAZ et al., 2009; LEMOS et al., 2015; SILVA et al., 2019). Entretanto, há uma preocupação crescente sobre quanto tempo a sociedade poderá contar com suprimentos de fertilizantes fosfatados, que são limitados aos depósitos de rocha fosfática (ELSER, BENNETT, 2011). Neste sentido, estratégias que visam substituir a utilização dos fertilizantes fosfatados e que prolongue o uso das reservas de fosfato são necessárias. Assim, é relevante a investigação do melhor aproveitamento e ciclagem de P nativo do solo pelas plantas utilizadas em pré-cultivo, como as leguminosas, e culturas sucessoras, como o cafeeiro, que é o foco do presente estudo.

A rotação de culturas com espécies de alta eficiência em extrair e utilizar o P pode ser uma prática para ciclar este elemento mediante a recuperação da forma indisponível para a mais lábil (SILVA et al., 2011). Esta prática pode aumentar a eficiência desse elemento no sistema de produção agrícola, pois a cultura subsequente pode usar o P mineralizado após a decomposição de biomassa da parte aérea e do sistema radicular da cultura antecessora (SOLTANGHEISI et al., 2018). Neste contexto, destacam-se as leguminosas, que são culturas comumente utilizadas em rotação como cultura de cobertura e adubação verde.

As leguminosas na rotação de cultura e na adubação verde têm sido amplamente utilizadas devido à maior mineralização de nitrogênio (N) em razão da capacidade de associação com

bactérias fixadoras do N atmosférico, além da alta capacidade de mobilizar e absorver nutrientes e de produzir grande quantidade de massa (AMABILE, CARVALHO, 2006). Ao contrário do N, poucos estudos têm sido realizados de modo a relacionar a taxa de mineralização de P com as características bioquímicas da biomassa de leguminosas (CASALI et al., 2011). Nesse sentido, as leguminosas usadas na rotação de culturas ou na adubação verde poderão, também, atuar como fonte complementar e aumentar a eficiência de uso de P.

O P não disponível pode ser solubilizado e disponibilizado a partir do cultivo de algumas leguminosas, o que torna uma estratégia atrativa no manejo de solos com elevada capacidade de adsorção de fosfato (MASCARENHAS, WUTKE, 2014). De acordo com Nziguhebae Bünemann (2005), os adubos verdes podem aumentar a disponibilidade de P em duas circunstâncias: durante seu crescimento, pela modificação das propriedades do solo e mobilização de P; e pela decomposição da sua biomassa, quando o P orgânico é mineralizado. A quantidade de P que os adubos verdes podem extrair do solo depende da espécie, da quantidade do nutriente no solo e das características morfológicas e fisiológicas das suas raízes (SILVA et al., 2014).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o crescimento e a eficiência de uso de P de mudas de cafeeiro cultivadas em solos com diferentes disponibilidades de P após o cultivo de leguminosas.

Material e Métodos

Local do estudo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), município de Viçosa, Minas Gerais, sob as coordenadas geográficas X: 518969,59 e Y: 4919485,31 e altitude de 651 m. De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é temperado quente, com verões chuvosos e invernos frios e secos (Cwb). A precipitação média anual é de 1.268,2 mm, a umidade relativa em torno de 81% e a temperatura média anual de 20 °C, conforme dados obtidos na estação meteorológica local, no período de 1968 a 2010 (LORENZON et al., 2013).

Caracterização dos solos

Foram coletadas amostras do horizonte A de dois solos no município de Lagoa Formosa, Minas Gerais (mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba). Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf) e Neossolo Litólico Chernossólico típico (RLm). A caracterização físico-químicas dos solos está disposta na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas e químicas de dois solos coletados em Lagoa Formosa, Minas Gerais.

Característica	Solo	
	LVwf	RLm
Areia Grossa (kg kg ⁻¹)	0,085	0,073
Areia Fina (kg kg ⁻¹)	0,079	0,082
Silte (kg kg ⁻¹)	0,232	0,360
Argila (kg kg ⁻¹)	0,603	0,486
Ds (g cm ⁻³)	1,17	1,22
Dp (g cm ⁻³)	3,08	2,89
pH H ₂ O (1:2,5)	5,72	6,01
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,46	15,08
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,18	4,32
K ⁺ (mg dm ⁻³)	29,00	163,00
P disponível (mg dm ⁻³)	1,70	768,00
P total (mg dm ⁻³)	2969,25	7419,85
P remanescente (mg L ⁻¹)	6,20	13,30
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,00	0,00
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	5,90	8,30
SB (cmol _c kg ⁻¹)	0,71	19,82
t (cmol _c kg ⁻¹)	0,71	19,82
T (cmol _c kg ⁻¹)	6,61	28,12
V (%)	10,70	70,50
m (%)	0,00	0,00
MO (dag kg ⁻¹)	2,74	3,91

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; SB: soma de bases; T: CTC potencial, t: CTC efetiva; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico.

Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente casualizados (DIC), com seis repetições. Os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial [(2 x 4) + 1], assim especificado: dois

solos, pré-cultivo com quatro espécies de leguminosas e um tratamento adicional como controle (sem planta pré-cultivada), totalizando 60 parcelas experimentais.

Cultivo das mudas de cafeeiro

As parcelas experimentais foram constituídas de vasos de polietileno rígido com capacidade para 3 dm³ de solo. Primeiramente foram cultivadas as leguminosas crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), guandu anão (*Cajanus cajan*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna preta (*Mucuna aterrima*). Para o cultivo das leguminosas os solos foram adubados de acordo com as recomendações de Novais et al. (1991), com exceção de P, para ambos os solos, e de K, para o RLm. Após o período de 45 dias de cultivo a parte aérea e as raízes das leguminosas foram retiradas dos vasos. Em seguida foi realizado a amostragem de solo em cada unidade experimental para caracterização química (Tabela 2), conforme os procedimentos descritos em Teixeira et al. (2017).

Tabela 2. Caracterização química dos solos após o cultivo de leguminosas por 45 dias.

Leguminosas	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K disponível*	P disponível*	Al ³⁺	H+Al
	H ₂ O	cmol _c kg ⁻¹		----- mg dm ⁻³ -----		cmol _c kg ⁻¹	
LVwf							
Crotalária juncea	5,63	0,83	0,53	18,58	0,28	0,00	3,54
Guandu anão	5,16	0,70	0,40	21,56	0,28	0,00	3,69
Feijão-de-porco	5,75	0,76	0,53	9,65	1,49	0,00	3,98
Mucuna preta	5,88	0,95	0,63	25,53	0,19	0,00	3,98
RLm							
Crotalária juncea	6,32	13,04	4,42	89,79	832,70	0,00	6,49
Guandu anão	6,11	14,14	5,30	104,26	852,12	0,00	6,63
Feijão-de-porco	6,17	14,02	4,54	89,79	761,47	0,00	6,78
Mucuna preta	6,32	14,76	4,51	89,79	842,41	0,00	6,63

*Determinados pelo extrator Mehlich-1.

LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico.

As mudas de cafeeiro (*Coffea arabica*), cultivar MGS Paraíso 2, foram produzidas em saquinhos plásticos e transplantadas nos vasos, sendo uma muda em cada vaso. Para o transplante nos vasos cortou-se o pião (fundo do saquinho). Após o transplante das mudas de cafeeiro, os solos foram adubados com exceção de P, de acordo com as recomendações de Novais et al. (1991). As doses de nutrientes aplicadas nos dois solos foram 100 mg dm⁻³ de N, 40 mg dm⁻³ de S, 0,81 mg dm⁻³ de B, 3,66 mg dm⁻³ de Mn, 0,15 mg dm⁻³ de Mo, 4,00 mg dm⁻³ de Zn, 1,33 mg dm⁻³ de Cu e 1,56 mg dm⁻³ de Fe. Utilizando, respectivamente, as fontes:

NH_4NO_3 , K_2SO_4 , H_3BO_3 , $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ZnCl_2 , CuCl , $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Adicionalmente, no LVwf foram aplicados 300 mg dm^{-3} de K, utilizando como fonte KCl, e 2,04 g de carbonatos de cálcio (CaCO_3 p.a.) e de magnésio (MgCO_3 p.a.) na proporção 4:1 para o fornecimento de Ca e Mg (RIBEIRO et al., 1999). Na condução do experimento, foi realizada a remoção manual das plantas espontâneas e irrigação, quando necessário, para manter a umidade do solo em aproximadamente 70% da capacidade de campo.

Avaliações agronômicas e nutricionais do cafeeiro

Após 120 dias de cultivo do cafeeiro, foram procedidas as avaliações de crescimento e estado nutricional das mudas. Para a avaliação do crescimento foram determinados os seguintes parâmetros: altura (H), diâmetro do caule (DC) na altura de 5 cm do nível do solo, massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST), e índice de qualidade de Dickson (IQD). A H foi mensurada com o auxílio de uma régua graduada em centímetros (cm) e o DC com um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Para a quantificação da MSPA e MSR as plantas foram coletadas e as raízes separadas da parte aérea na base do caule. Após o corte da parte aérea, as raízes foram recolhidas, lavadas em água corrente sobre peneira de 0,5 mm de malha. A parte aérea e a raiz foram acondicionadas em sacos de papel, secadas em estufa a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 h e pesadas em balança analítica.

O IQD foi calculado a partir da fórmula (DICKSON et al., 1960):

$$\text{IQD} = \frac{\text{MST}}{(\text{H/D}) + (\text{MSPA/MSR})} \quad \text{Eq. 1}$$

Para a determinação dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), amostras da parte aérea e da raiz foram processadas em moinho tipo “WillyeSuper”. Foi realizada a digestão nitroperclórica (MALAVOLTA et al., 1997) para quantificação dos teores de P, K, Ca, Mg e S, determinados através do ICP-OES – Inductively Coupled Plasma (espectrometria de emissão óptica por plasma induzido). O N foi determinado por digestão sulfúrica e destilação Kjeldahl (TEDESCO, GIANELLO, 1979). Os conteúdos dos nutrientes foram calculados mediante a multiplicação da massa de matéria seca pela concentração de cada elemento na parte aérea e na raiz.

Os índices de eficiência nutricional para o P foram obtidos a partir dos pesos da massa de matéria seca e os teores de P de cada parte da planta, conforme as relações apresentadas a seguir (AMARAL, 2002):

Eficiência de utilização de nutrientes (EU):

$$EU = \frac{(MST)^2}{\text{Conteúdo de P na planta toda}}, \text{ em g}^2 \text{ mg}^{-1} \quad \text{Eq. 2}$$

Eficiência de utilização de nutrientes para produção de parte aérea (EUPA):

$$EUPA = \frac{(MSPA)^2}{\text{Conteúdo de P na planta toda}}, \text{ em g}^2 \text{ mg}^{-1} \quad \text{Eq. 3}$$

Eficiência de produção de raízes (EPR):

$$EPR = \frac{(MSR)^2}{\text{Conteúdo de P na planta toda}}, \text{ em g}^2 \text{ mg}^{-1} \quad \text{Eq. 4}$$

Com os valores dos conteúdos de P, calculou-se o índice de translocação de P pela seguinte fórmula (ABICHEQUER, BOHNEN, 1998):

$$IT = \frac{\text{Conteúdo de P na parte aérea}}{\text{Conteúdo de P na planta inteira}} \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), ao teste F ($p < 0,05$) e, quando significativo, ao teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparar as médias utilizado o *software* estatístico Sisvar (FERREIRA, 2014).

Resultados e Discussão

Crescimento do cafeeiro

Não houve interação significativa ($p > 0,05$) entre solos e leguminosas para as variáveis de crescimento das mudas de cafeeiro após 120 dias de cultivo (Tabela 3). O cultivo de cafeeiros no RLm proporcionou maiores valores de H, DC, MSPA, MSR, MST e IQD das mudas, com

incrementos de 13,05% na H, 4,86% no DC, 46,98% na MSPA, 17,61% na MSR e 41,80% na MST em relação às mudas cultivadas no LVwf.

O pré-cultivo com crotalária juncea proporcionou aumento dos valores de DC, MSPA, MST e IQD das mudas de cafeeiro em relação ao controle (sem leguminosa), com incrementos de 20% de DC, 33% de MSPA, 34% de MST e 52% de IQD. O IQD é considerado um indicador de qualidade de mudas que considera o equilíbrio da distribuição de biomassa na muda (FONSECA et al., 2002). Assim, quanto maior o IQD, melhor a distribuição da biomassa das plantas. Para os demais tratamentos os resultados foram similares, com exceção do feijão-deporco e da mucuna preta, que proporcionaram aumentos no DC. Não houve diferença para H e MSR.

Tabela 3. Variáveis de crescimento em mudas de cafeeiro cultivadas por 120 dias, após o cultivo de leguminosas em solos com teores de P contrastantes.

Tratamentos	H	DC	MSPA	MSR	MST	IQD
	cm	mm	----- g -----			
Leguminosas (L)						
Crotalária juncea	38,11a	6,07a	11,24a	2,29a	13,53a	1,21a
Guandu anão	38,50a	5,54ab	9,75ab	1,88a	11,62ab	0,94ab
Feijão-de-porco	37,53a	5,98a	9,47ab	1,93a	11,39ab	1,01ab
Mucuna preta	38,62a	5,80a	10,10ab	1,85a	11,94ab	0,93ab
Sem planta	38,63a	5,08b	8,46b	1,64a	10,10b	0,79b
Solos (S)						
LVwf	35,93b	5,56b	7,94b	1,76a	9,69b	0,88b
RLm	40,62a	5,83a	11,67a	2,07a	13,74a	1,07a
L*S	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	5,91	8,77	17,36	39,68	19,10	32,83
Média geral	38,28	5,69	9,80	1,92	11,72	0,98

H: Altura, DC: diâmetro do caule, MSPA: massa seca da parte aérea, MSR: massa secada raiz, MST: massa seca total, IQD: índice de qualidade de Dickson. LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico; L*S: interação leguminosas x solos; C.V.: coeficiente de variação; ns: não significativo pelo teste F da ANOVA; Letras diferentes na coluna diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os maiores valores das variáveis de crescimento do cafeeiro no RLm podem ser justificados pelo maior teor de P disponível neste solo. De acordo com a Lei do Mínimo, proposta pelo químico Justus Von Liebig em 1840, o crescimento vegetal é limitado pelo elemento essencial disponível no solo em quantidade inadequada para suprir a demanda das plantas, mesmo que os demais estejam em quantidades balanceadas (LEPSCH, 2016).

Embora a falta de P disponível em quantidades adequadas para o pleno crescimento das mudas de cafeeiro cultivadas no LVwf, o pré-cultivo com crotalária juncea pode ser uma alternativa promissora visando complementar o fornecimento de P para o cultivo sucessor. Isso

porque foi a leguminosa que se destacou no pré-cultivo proporcionando aumentos das variáveis de crescimento nas mudas de cafeeiro.

A ciclagem de P e demais nutrientes na nutrição do cafeeiro é relevante (CARDOSO et al., 2018), em razão da diminuição dos custos e da dependência de insumos industriais para a cafeicultura (VILELA et al., 2011). A adubação verde é uma técnica que tem apresentado resultados promissores para o cafeeiro (PAULO et al., 2006; ARAÚJO et al., 2013; VILELA et al., 2011; CARDOSO et al., 2018; JAEGGI et al., 2019), seja em pré-cultivo ou em consórcio nas entrelinhas de plantas já estabelecidas no campo.

Macronutrientes na parte aérea e na raiz do cafeeiro

Houve interação ($p < 0,05$) entre solos e leguminosas apenas para o teor e o conteúdo de K na parte aérea das mudas do cafeeiro (Tabela 4). Para os demais macronutrientes (N, P, Ca, Mg e S) não houve interação entre os fatores, sendo feita a análise individual do efeito de cada fator. As mudas de cafeeiro cultivadas no RLM apresentaram maiores teores e conteúdos de N, P, Ca, Mg e S na parte aérea quando comparadas às cultivadas no LVwf.

Tabela 4. Teores e conteúdos de macronutrientes na parte aérea de mudas de cafeeiro, cultivadas por 120 dias, após o cultivo de leguminosas em solos com teores de P contrastantes.

Tratamentos	N	P	Ca	Mg	K	S
Teores (g kg ⁻¹)						
Leguminosas (L)						
Crotalária juncea	28,34a	0,91ab	6,50ab	2,57ab	-	1,58ab
Guandu anão	29,13a	1,11ab	7,76ab	3,01a	-	1,78ab
Feijão-de-porco	29,55a	1,19a	8,10a	3,24a	-	1,92a
Mucuna preta	28,30a	1,05ab	7,34ab	2,91ab	-	1,75ab
Sem planta	30,25a	0,82b	5,85b	2,18b	-	1,35b
Solos (S)						
LVwf	27,75b	0,89b	6,19b	2,52b	-	1,53b
RLm	30,48a	1,14a	8,03a	3,04a	-	1,82a
L*S	ns	ns	ns	ns	**	ns
C.V. (%)	7,94	27,34	24,60	25,30	44,47	23,20
Média geral	29,11	1,02	7,11	2,78	7,62	1,68
Tratamentos	N	P	Ca	Mg	K	S
Conteúdos (mg planta ⁻¹)						
Leguminosas (L)						
Crotalária juncea	302,07a	10,23ab	73,96ab	29,15ab	-	17,94a
Guandu anão	280,50ab	11,33a	79,12a	30,50a	-	18,01a
Feijão-de-porco	275,99ab	11,55a	78,30a	31,20a	-	18,42a
Mucuna preta	279,59ab	10,82ab	75,89ab	29,86a	-	17,83a
Sem planta	253,74b	7,20b	51,41b	19,07b	-	11,81b
Solos (S)						
LVwf	237,50b	7,02b	49,19b	20,01b	-	12,17b
RLm	319,25a	13,44a	94,27a	35,90a	-	21,44a
L*S	ns	ns	ns	ns	*	ns
C.V. (%)	13,07	33,79	31,19	31,62	48,71	29,34
Média geral	278,38	10,22	71,73	27,96	78,04	16,80

LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico; L*S: interação leguminosas x solos; C.V.: coeficiente de variação; ns: não significativo, ** e * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F da ANOVA; Letras diferentes na coluna diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

As mudas de cafeeiro cultivadas após o feijão-de-porco apresentaram maiores teores de P, Ca, Mg e S na parte aérea, comparativamente ao controle. Para o N não houve diferença nos teores, no entanto, o seu acúmulo no cafeeiro após pré-cultivo de crotalária foi maior quando comparado ao controle, que é justificado pela maior produção de massa seca. Além disso, a crotalária em pré-cultivo proporcionou também maior acúmulo de S no cafeeiro. Este resultado sugere que essa leguminosa no pré-cultivo proporciona maior benefício no cultivo sucessor. Em relação aos conteúdos dos demais macronutrientes o pré-cultivo com guandu anão e feijão-de-porco proporcionaram maiores conteúdos de P, Ca e Mg. Para os conteúdos de S no cafeeiro,

as quatro leguminosas em pré-cultivo proporcionaram valores similares entre si e superiores ao controle. As leguminosas possuem a capacidade de mobilizar nutrientes e disponibilizá-los para a cultura sucessora, assim, ao longo do tempo, a prática de adubação verde na cultura do cafeeiro pode reduzir a necessidade de aplicação de fertilizantes.

Houve interação significativa entre solos e leguminosas para os teores de P, Mg e K e não houve interação significativa para os teores de Ca e S e conteúdos de P, Ca, Mg, K e S na raiz das mudas do cafeeiro (Tabela 5). O teor de Ca e os conteúdos de P, Ca, Mg e K foram superiores nas raízes das mudas quando cultivadas no RLM, enquanto que o teor e o conteúdo de S não apresentaram diferenças entre os solos. Não houve diferença para os teores de Ca e S e conteúdos de P, Ca, Mg, K e S na raiz das mudas do cafeeiro considerando o efeito do pré-cultivo das leguminosas. O coeficiente de variação (CV) dos conteúdos de macronutrientes nas raízes das mudas de cafeeiro apresentaram valores elevados, acima de 35%. Isso pode ter interferido a não detectar diferença entre os tratamentos. A avaliação de raízes, mesmo em experimentos em condições controladas, pode apresentar elevados CV.

Tabela 5. Teores e conteúdos de macronutrientes na raiz de mudas de cafeeiro, após 120 dias de cultivo.

Tratamentos	P	Ca	Mg	K	S
Teores (g kg ⁻¹)					
Leguminosas (L)					
Crotalária juncea	-	7,75a	-	-	3,40a
Guandu anão	-	7,75a	-	-	3,41a
Feijão-de-porco	-	7,62a	-	-	3,34a
Mucuna preta	-	7,60a	-	-	3,60a
Sem planta	-	7,73a	-	-	3,40a
Solos (S)					
LVwf	-	5,80b	-	-	3,37a
RLm	-	9,58a	-	-	3,49a
L*S	**	ns	*	**	ns
C.V. (%)	13,61	11,66	10,88	16,79	8,57
Média geral	1,19	7,69	9,23	11,22	3,43
Tratamentos	P	Ca	Mg	K	S
Conteúdos (mg planta ⁻¹)					
Leguminosas (L)					
Crotalária juncea	2,64a	18,34a	21,27a	22,40a	7,72a
Guandu anão	2,56a	15,40a	17,76a	25,25a	6,33a
Feijão-de-porco	2,44a	14,72a	18,20a	20,62a	6,46a
Mucuna preta	2,16a	13,12a	16,39a	19,26a	6,35a
Sem planta	1,81a	13,02a	15,10a	19,96a	5,54a
Solos (S)					
LVwf	1,79b	10,19b	15,66b	17,86b	5,92a
RLm	2,85a	19,65a	19,83a	25,14a	7,04a
L*S	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	42,44	43,33	38,76	44,36	37,72
Média geral	2,32	14,92	17,74	21,50	6,48

LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico; L*S: interação leguminosas x solos; C.V.: coeficiente de variação; ns: não significativo, ** e * significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F da ANOVA; Letras diferentes na coluna diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Foi feita a análise do desdobramento da interação entre leguminosas e solos para os teores e conteúdos de K na parte aérea e teores de P, Mg e K na raiz de mudas de cafeeiro (Tabela 6). De modo geral, pode-se observar que, exceto para o teor de K na raiz, não houve diferença entre os tratamentos correspondentes aos pré-cultivos das mudas de cafeeiro quando cultivados no LVwf. Quando cultivadas no RLm os menores valores encontrados nas mudas de cafeeiro foram nos tratamentos sem leguminosas pré-cultivadas e após o cultivo de crotalária juncea para os teores e conteúdos de K na parte aérea e teores de P, Mg e K na raiz e após o cultivo de mucuna preta os teores de P, Mg e K na raiz.

Tabela 6. Análise do desdobramento da interação leguminosas (L) x solos (S) para teor e conteúdo de K na parte aérea, teores de P, Mg e K na raiz de mudas de cafeeiro, após 120 dias de cultivo.

L x S	Crotalária juncea	Guandu anão	Feijão-de-porco	Mucuna preta	Sem planta
teor de K na parte aérea (g kg ⁻¹)					
LVwf	6,78aA	5,44bA	6,38bA	5,20bA	4,92aA
RLm	4,97aB	12,10aA	10,67aA	12,55aA	7,21aAB
conteúdo de K na parte aérea (mg planta ⁻¹)					
LVwf	59,12aA	43,81bA	50,44bA	37,37bA	35,41aA
RLm	72,32aB	140,28aA	118,52aAB	146,94aA	76,19aB
teor de P na raiz (g kg ⁻¹)					
LVwf	1,07aA	0,97bA	0,99bA	1,01bA	1,02aA
RLm	1,21aB	1,69aA	1,56aA	1,28aB	1,14aB
teor de Mg na raiz (g kg ⁻¹)					
LVwf	9,35aA	8,73bA	8,47bA	8,68aA	8,86aA
RLm	9,22aAB	10,48aA	10,34aA	8,70aB	9,45aAB
teor de K na raiz (g kg ⁻¹)					
LVwf	9,15aB	11,04bAB	8,54bB	9,65aB	12,98aA
RLm	10,33aB	15,21aA	12,93aAB	11,16aB	11,26aB

LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico; Letras minúsculas diferentes na coluna e letras maiúsculas diferentes na linha diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Eficiência nutricional de P no cafeeiro

Não houve interação significativa entre leguminosas e solos para eficiência de utilização de nutriente (EU), eficiência de utilização de nutriente para produção da parte aérea (EUPA) e eficiência de produção de raiz (ERR) de P em mudas de cafeeiro (Tabela 7). Contudo, houve interação para o índice de translocação (IT) de P. Considerando os efeitos individuais dos fatores em estudo, não houve diferença significativa entre os dois solos (RLm e LVwf) para EU, EUPA e EPR das mudas de cafeeiro; o pré-cultivo com o feijão-de-porco proporcionou a menor eficiência de utilização e produção de parte aérea por unidade de P, não havendo diferença significativa para eficiência de utilização de P para produção de raízes.

Tabela 7. Eficiência de utilização de nutriente (EU), eficiência de utilização de nutriente para produção da parte aérea (EUPA), eficiência de produção de raiz (EPR) e índice de translocação (IT) do P em mudas de cafeeiro, após 120 dias de cultivo.

Tratamentos	EU	EUPA	EPR	IT
	----- g ² mg ⁻¹ -----			%
Leguminosas (L)				
Crotalária juncea	15,45a	10,64a	0,47a	-
Guandu anão	10,72ab	7,61ab	0,29a	-
Feijão-de-porco	9,77b	6,70b	0,31a	-
Mucuna preta	12,17ab	8,54ab	0,38a	-
Sem planta	12,46ab	8,82ab	0,34a	-
Solos (S)				
LVwf	11,81a	7,96a	0,40a	-
RLm	12,42a	8,96a	0,32a	-
L*S	ns	ns	ns	*
C.V. (%)	35,00	34,53	64,52	8,82
Média geral	12,11	8,46	0,36	80,40

LVwf: Latossolo Vermelho Acriférrico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico; L*S: interação leguminosas x solos; C.V.: coeficiente de variação; ns: não significativo e * significativo a 5% de probabilidade pelo teste F da ANOVA; Letras diferentes na coluna diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

De acordo com Amaral et al. (2011) o termo ‘eficiência nutricional’ é utilizado para caracterizar plantas em sua capacidade de absorver e utilizar nutrientes, estando relacionado à eficiência de absorção, translocação e utilização de nutrientes. Grande parte das pesquisas envolvendo a eficiência nutricional evidencia a eficiência de utilização de P (AMARAL et al., 2011). No entanto, na presente pesquisa, o aumento da disponibilidade de P não resultou em diferenças entre as mudas de cafeeiro cultivadas em solos com diferentes disponibilidades deste nutriente. Provavelmente por se tratar da mesma espécie e mesmo cultivar, já que plantas de diferentes espécies diferem em suas respostas à disponibilidade de nutrientes no solo, devido às diferenças de capacidade de absorção e de utilização dos nutrientes (TOMAZ et al., 2008). Entretanto, o pré-cultivo com leguminosas resultou em diferenças significativas entre as mudas de cafeeiro, com destaque àquelas cultivadas após a crotalária juncea. Provavelmente a mobilização de P por esta leguminosa durante o seu cultivo inferiu na maior eficiência de utilização e maior produção de parte aérea e raiz por unidade de P nas mudas de cafeeiro.

Foi feita a análise do desdobramento da interação entre leguminosas e solos para o IT de P das mudas de cafeeiro. As mudas cultivadas no LVwf não apresentaram diferença do pré-cultivo com leguminosas para o IT, quando cultivadas no RLm o pré-cultivo da mucuna preta proporcionou maior IT e o pré-cultivo da crotalária juncea o menor. Em relação ao pré-cultivo com leguminosas, apenas o pré-cultivo com mucuna preta apresentou diferença no IT das

mudas de cafeeiro nos diferentes solos, em que as mudas cultivadas no RLm apresentaram maior IT (Tabela 8).

Tabela 8. Análise do desdobramento da interação leguminosas (L) x solos (S) para o índice de translocação (IT) de mudas de cafeeiro, após 120 dias de cultivo.

L x S	Crotalária juncea	Guandu anão	Feijão-de-porco	Mucuna preta	Sem planta
LVwf	78,82aA	82,06aA	80,31aA	73,86bA	78,02aA
RLm	77,70aB	80,82aAB	83,14aAB	89,48aA	79,76aAB

LVwf: Latossolo Vermelho Acriférico típico; RLm: Neossolo Litólico Chernossólico típico; Letras minúsculas diferentes na coluna e letras maiúsculas diferentes na linha diferem significativamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A translocação refere-se ao movimento ou à transferência do íon, do local de absorção na raiz para outro ponto qualquer, dentro ou fora da raiz (MALAVOLTA et al., 1997), portanto o índice de translocação (IT) é representado pela porcentagem da quantidade total absorvida, que foi transferida para a parte aérea (ABICHEQUER, BOHNEN, 1998) e quanto maior o IT, maior a quantidade translocada da raiz para a parte aérea (SILVA et al., 2007). Assim, diante dos resultados, foi possível observar que houve elevada translocação de P da raiz até a parte aérea das mudas de cafeeiro, mesmo quando cultivadas no solo com baixa disponibilidade deste elemento. Embora o P seja um elemento pouco móvel no solo, na planta apresenta alta mobilidade entre os tecidos, sendo facilmente translocado da raiz para a parte aérea (NOVAIS, SMYTH, 1999).

Conclusões

O pré-cultivo com leguminosas proporcionou maior crescimento das mudas de cafeeiro, com destaque para o pré-cultivo de crotalária juncea e feijão-de-porco; representando uma alternativa promissora visando complementar o fornecimento de P para o cultivo sucessor em solos com baixa disponibilidade de P.

Referências

- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 21-26, 1998. DOI: 10.1590/S0100-06831998000100003
- AMABILE, R. F.; CARVALHO, A. M. Histórico da adubação verde. In: CARVALHO, A. M.; AMABILE, R. F. (eds.) **Cerrado: Adubação verde**. EMBRAPA Cerrados, Planaltina, DF, 2006. p. 23-40.
- AMARAL, J. F. T. D.; MARTINEZ, H. E. P.; LAVIOLA, B. G.; FERNANDES FILHO, E. I.; CRUZ, C. D. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, v.41, n.4, 2011. DOI: 10.1590/S0103-84782011005000027
- AMARAL, J. F. T. **Eficiência de produção de raízes, absorção, translocação e utilização de nutrientes em cultivares de café arábica**. 2002. 97f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, MG.
- ARAÚJO, J. B. S.; RODRIGUES, M. C.; RODRIGUES, L. B.; SANTOS, R. H. S.; MARTINEZ, H. E. P. Nitrogen fertilization of coffee: organic compost and *Crotalaria juncea* L. *Revista Ceres*, v. 60, n. 6, p. 842-851, 2013. DOI: 10.1590/S0034-737X2013000600013
- CARDOSO, R. G. S.; PEDROSA, A. W.; RODRIGUES, M. C.; SANTOS, R. H. S.; MARTINEZ, H. E. P.; CECON, P. R. Intercropping period between species of green manures and organically-fertilized coffee plantation. **Coffee Science**, v. 13, n. 1, p. 23-32, 2018. DOI: 10.25186/cs.v13i1.1332
- CASALI, C. A.; KAMINSKI, J.; PICCIN, R.; ARBUGERI, F. E.; DONEDA, A. Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura. **Informações Agronômicas**, v. 135, p. 21-24, 2011.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, v. 6 - Safra 2020, n. 1 – primeiro levantamento, janeiro de 2020.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forest Chronicle**, v. 36, p. 10-13, 1960.
- ELSER, J.; BENNETT, E. Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 29, 2011. DOI: 10.1038/478029a
- FERREIRA, D. F. Sisvar: A guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n. 2, p.109-112, 2014. DOI: 10.1590/S1413-70542014000200001
- FONSECA, E. P.; VALÉRI, S. V.; MIGLIORANZA, É.; FONSECA, N. A. N.; COUTO, L. Padrão de qualidade de mudas de *Tremamicrocrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 515-523, 2002. DOI: 10.1590/S0100-67622002000400015

- JAEGGI, M. E. P. C.; COELHO, F. C.; PEREIRA, I. M.; ZACARIAS, A. J.; GRAVINA, G. A.; LIMA, W. L.; PEREIRA, L. L.; MOREIRA, T. R.; SILVA, S. F.; PARAJARA, M. C. Path Analysis of Vegetative Characteristics in Conilon Coffee Production Consortiated with Green Fertilizers in Tropical Climate. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 40, n. 2, p. 1-11, 2019. DOI: 10.9734/JEAI/2019/v40i230361
- LEMONS, V. T.; FRANÇA, A. C.; SILVA, E. D. B.; MARINHO, R. L. D. S.; FRANCO, M. H. R.; AVELLAR, M. D.; FREITAS, A. F.; REIS, L. A. C.; CORRÊA, J. M.; CARVALHO, G. R. Ácido cítrico e fósforo no desenvolvimento e estado nutricional de mudas de café. **Coffee Science**, v. 10, n. 3, p. 298-308, 2015. DOI: 10.25186/cs.v10i3.858
- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. Ed. São Paulo, Oficina de textos, 2010. 216 p.
- LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; LEITE, H. G. Precipitação efetiva e interceptação da chuva em um fragmento florestal com diferentes estágios de regeneração. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, 2013. DOI: 10.1590/S0100-67622013000400005
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MASCARENHAS, H. A. A.; WUTKE, E. B. Adubação, nutrição e fatores climáticos limitantes ao desenvolvimento dos adubos verdes. In: LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (eds.) **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. EMBRAPA Agropecuária Oeste, Brasília, DF, 2014. p. 189-224.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA, Lavras, 2006.
- NOVAIS, R. D.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. D. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA A. J.; GARRIDO W. E.; ARAÚJO J. D.; LOURENÇO S. (eds.) **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. EMBRAPA SEA, Brasília, 1991. p. 189-253
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta sob condições tropicais**. Raleigh: Universidade Federal de Viçosa – North Carolina State University, 1999. 399p.
- NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E. K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B. L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Ed.) **Organic phosphorus in the environment**. cap. 11, 2005. p. 243-268.
- PAULO, E. M.; BERTON, R. S.; CAVICHIOLI, J. C.; BULISANI, E. A.; KASAI, F. S. Produtividade do cafeeiro Mundo Novo enxertado e submetido à adubação verde antes e após recepa da lavoura. **Bragantia**, v. 65, n. 1, p. 115-120, 2006. DOI: 10.1590/S0006-87052006000100015.
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa: UFV, 1999. 359 p.

SANTINATO, F.; CAIONE, G.; TAVARES, T. O.; PRADO, R. M. Doses of phosphorus associated with nitrogen on development of coffee seedlings. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 419-426, 2014. DOI: 10.25186/cs.v9i3.689

SILVA, M. D. S.; VITTI, G. C.; TREVIZAM, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 4, p. 527-535, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007000400011

SILVA, E. C.; AMBROSANO, E. J.; SCIVITTARATO, W. B.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; CARVALHO, A. M. Adubação verde como fonte de nutrientes às culturas. In: LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (eds.) **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. EMBRAPA Agropecuária Oeste, Brasília, DF, 2014. p. 265-306.

SILVA, T. O.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; PALUDO, V. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 4, 2011. DOI: 10.5433/1679-0359.2011v32n4p1315

SILVA, I. M.; SCHIAVON, N. C.; FRANÇA, A. C.; FRANCO, M. H. R.; FARNEZI, M. M. Respostas de genótipos de Coffea arabica à aplicação de fósforo em substrato com ácido cítrico. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-7, 2019. DOI: 10.22491/rca.2019.2768

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2018.01.006

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. Conjunto modulado em vidro para destilação a vapor de amônia pelo método kjeldahl. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 61-63. 1979.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Editores técnicos). **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.

TOMAZ, M. A.; MARTINEZ, H. E. P.; CRUZ, C. D.; FERRARI, R. B.; ZAMBOLIM, L.; SAKIYAMA, N. S. Diferenças genéticas na eficiência de absorção, na translocação e na utilização de K, Ca e Mg em mudas enxertadas de cafeeiro. **Ciência Rural**, v. 38, n. 6, p. 1540-1546, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000600008

TOMAZ, M. A.; MARTINEZ, H. E. P.; CRUZ, C. D.; FREITAS, R. S. D.; PEREIRA, A. A.; SAKIYAMA, N. S. Eficiência relacionada à absorção e utilização de nitrogênio, fósforo e enxofre, em plantas de cafeeiros enxertadas, cultivadas em vasos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 4, p. 993-1001, 2009. DOI: 10.1590/S1413-70542009000400008

VILELA, E. F.; FREITAS, M. R. C.; PIANO, P. B.; SANTOS, R. H. S.; MENDONÇA, E. D. S. Crescimento inicial de cafeeiros e fertilidade do solo adubado com mucuna, amendoim forrageiro ou sulfato de amônio. **Coffee Science**, v. 6, n. 1, p. 27-35, 2011.

VILELA JÚNIOR, D., CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; CARVALHO, A. M.; PRAXEDES, M. A.; SANTOS, M. C.; FERNANDES, F. C. Initial growth of coffee tree cultivars with different doses of nitrogen, phosphorus and potassium. **Coffee Science**, v. 12, n. 4, p. 552 - 561, 2017. DOI: 10.25186/cs.v12i4.1370

CONCLUSÕES GERAIS

A crotalária juncea apresentou maior crescimento e produção de biomassa quando cultivada no solo com maior disponibilidade de P. Entretanto, quando cultivada no solo com baixa disponibilidade de P, seu crescimento foi severamente afetado. A crotalária juncea possuiu maior teor de P em relação às demais leguminosas, independente do solo de cultivo. Sua biomassa apresentou os maiores conteúdos de P, no início e ao final da incubação por 60 dias, e maior mineralização de P, o que a torna altamente promissora no fornecimento deste elemento para as plantas através da ciclagem. O pré-cultivo da crotalária juncea proporcionou os maiores incrementos nas variáveis de crescimento de mudas de cafeeiros em relação ao tratamento controle (sem planta).

O feijão-de-porco, além de apresentar maior crescimento e produção de biomassa quando cultivado no solo com alta disponibilidade de P, apresentou menor redução de crescimento e de produção de biomassa no solo com limitação P, apresentando maior acúmulo de P na biomassa quando cultivado no solo de baixa disponibilidade de P. Além disso, sua biomassa apresentou a maior taxa de decomposição e o menor tempo de meia vida ao final dos 60 dias de incubação, indicando maior potencial de decomposição em relação às demais leguminosas. O pré-cultivo do feijão-de-porco proporcionou os maiores incrementos nos teores e acúmulos de P na parte aérea de mudas cafeeiros em relação ao tratamento controle (sem planta).

Diante do exposto, as leguminosas crotalária juncea e feijão-de-porco apresentaram maior potencial para cultivo visando a absorção de P fixado no solo com a finalidade de aumentar a disponibilidade deste elemento para a cultura subsequente.