**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Ciclagem de fósforo pela braquiária consorciada com o cafeeiro

João Leonardo Corte Baptistella

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2020**

João Leonardo Corte Baptistella
Engenheiro Agrônomo

Ciclagem de fósforo pela braquiária consorciada com cafeeiro
versão revisada de acordo com a resolução da CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO MAZZAFERA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Baptistella, João Leonardo Corte

Ciclagem de fósforo pela braquiária consorciada com o cafeeiro / João Leonardo Corte Baptistella. - - versão revisada de acordo com a resolução da CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

82 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Café 2. Forrageira 3. Consórcio 4. Eficiência 5. Fertilidade I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico à minha família, amigos e todos que me apoiaram durante o decorrer da execução deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelas bençãos que me foram concedidas durante toda vida.

À minha família, pelo apoio durante todos esses anos e pela paciência.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” /Universidade de São Paulo por mais uma oportunidade de acrescentar ainda mais à minha formação profissional.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido na fase inicial do projeto e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro durante a maior parte da execução desse projeto (Processo FAPESP 2018/02497-3).

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Mazzafera pelos ensinamentos, ideias, atenção e disposição para me ajudar sempre que foi preciso durante a execução desse projeto.

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato pela colaboração na concepção do projeto e por ceder seu laboratório para análises.

À família Moscardini por ceder às áreas do cafezal para a realização do ensaio de campo, pela estadia e disposição em ajudar.

Ao Prof. Dr. José Laércio Favarin e Prof. Dr. Adriana Pinheiro Martinelli pelas parcerias estabelecidas durante a execução do projeto.

À Ana Paula Bettoni Teles pela ajuda e disposição nas várias semanas de análises (intermináveis) do fracionamento do solo.

À Monica Lanzoni Rossi, Adilson Pereira Domingues e Franklin Magnum de Oliveira Silva pela ajuda nas análises e pela atenção sempre que precisei.

A Juan Pablo Portilla Llerena pela atenção, ajuda e disposição para o trabalho. Foram longas jornadas, mas o trabalho será recompensado.

Aos amigos Edson Ademir de Moraes, Giovane “Forest” Assoni, Felipe Schwerz e Davi Bernardes Moscardini que sempre estiveram dispostos a ajudar e não tinham medo de colocar a mão na massa, mesmo que o trabalho fosse pesado.

À empresa JC Maschietto pelo fornecimento das sementes de braquiária para realização desse projeto.

A todos os amigos do Laboratório Multiusuário da Produção Vegetal (ESALQ/USP) pelo companheirismo durante todo esse tempo de convivência. Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso dessa jornada.

MUITO OBRIGADO!

“La barriga se sacia rápido, el espíritu no se sacia nunca”

Francisco Sánchez Gómez – Paco de Lucía.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	9
2. HIPÓTESE E OBJETIVO	11
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
5. RESULTADOS.....	35
6. DISCUSSÃO.....	59
7. CONCLUSÕES	69
8. REFERÊNCIAS	71
9. MATERIAL SUPLEMENTAR	79

RESUMO

Ciclagem de fósforo pela braquiária consorciada com o cafeeiro

O cultivo de café no Brasil ocorre, em sua maioria, a pleno sol com o solo descoberto, o que favorece o aparecimento de estresses ao cafeeiro, principalmente por altas temperaturas no solo e falta de água. Um jeito de se amenizar esses efeitos negativos é a adoção do consórcio café-braquiária. O consórcio promove vários benefícios, dentre eles a solubilização e ciclagem de nutrientes como o fósforo (P). Nesse sistema, a braquiária, que cresce na entrelinha do cafezal, é roçada e seus resíduos depositados sob a saia do cafeeiro. Por possuir um sistema radicular que explora grande volume de solo, a braquiária seria capaz de absorver nutrientes fora da zona de alcance do cafeeiro, disponibilizando-os após decomposição ao mesmo e aumentando a ciclagem de nutrientes. Embora importante, do ponto de vista de uso eficiente de recursos, existe pouca informação na literatura sobre a ciclagem de P nesse sistema de produção. O objetivo desse trabalho foi estudar a ciclagem de P pela braquiária consorciada com o cafeeiro e comparar espécies da forrageira quanto a aquisição e uso do P. Para isso realizou-se três experimentos: (I) campo, (II) rizotron e (III) hidroponia. No experimento I, forneceu-se P em três profundidades de solo (30, 60 e 90 cm) sob braquiária decumbens (*Urochloa decumbens*) cultivada na entrelinha de um cafezal; analogamente, no exp. II forneceu-se P ao longo do perfil de solo (até 2 m) de rizotrons cultivados com braquiária decumbens. Em ambos os casos o objetivo era verificar a capacidade da braquiária para ciclagem de P em profundidade, por isso a biomassa de raiz e parte aérea, o fracionamento do P no perfil e o acúmulo de nutrientes na parte aérea de braquiária foram avaliados. O exp. III, consistiu no cultivo de 3 espécies de braquiária – decumbens, brizanta (*Urochloa brizantha*) e ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) – em solução nutritiva sob 4 níveis de disponibilidade de P – 0.2, 0.5, 1 e 2 $\mu\text{M.L}^{-1}$. Nesse caso, o objetivo era avaliar as diferenças entre espécies na aquisição de P, avaliando a produção de biomassa, atividade de fosfatase ácida e exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes. Considerando os resultados dos três experimentos em conjunto, a magnitude da ciclagem de P depende da produção de biomassa de parte aérea correlaciona positivamente ($r>0.9$) com a disponibilidade do elemento até 80 cm de profundidade. Embora ela seja eficiente em utilizar e absorver o P, não foram verificados efeitos de mobilização das frações mais recalcitrantes do P do solo a campo ou no rizotron, possivelmente pelo limitado tempo de avaliação. Os resultados da hidroponia sugerem que existem diferenças entre espécies de braquiária quanto a eficiência de uso do P e crescimento, com melhor desempenho geral da braquiária ruziziensis. Portanto, dependendo da fertilidade e manejo do sistema, a espécie de braquiária mais adequada pode ser diferente.

Palavras-chave: Café; Forrageira; Consórcio; Fertilidade; Disponibilidade de P.

ABSTRACT

Phosphorus cycling by brachiariagrass intercropped with coffee tree

Coffee cultivation in Brazil is made under full sun exposure on bare soil. This favors stress on the coffee tree, mainly due to high soil temperatures and water deficit. Among the ways to alleviate these negative effects is the adoption of the coffee-brachiaria intercrop. This intercrop system promotes several benefits, such as solubilization and cycling of nutrients such as phosphorus (P), to name a few. In this system, the brachiaria that grows between coffee lines is mowed and its residues deposited close to the coffee tree. Because the forage has a root system that exploits a large volume of soil, the brachiaria would be able to absorb nutrients that are unattainable to the coffee roots, making them available after decomposition and increasing nutrient cycling. Although important, from the point of view of efficient use of resources, there is little information about P cycling in this intercrop. The objective of this work was to study P cycling by the brachiaria intercropped with coffee and to compare brachiaria species regarding P acquisition and use. Three essays were assembled: (I) on field, (II) on rhizotron and (III) hydroponics. On essay I, P was applied on three soil depths (30, 60 and 90 cm) under brachiaria decumbens (*Urochloa decumbens*) intercropped with coffee; in essay II, we applied P up to 2 m on rhizotron cultivated with brachiaria decumbens. On both essays the objective was to verify P cycling from deep soil layers by brachiaria, for this reason, root and shoot biomass, soil P fractioning and nutrient accumulation in the shoot were evaluated. In essay III, 3 brachiaria species – decumbens, brizantha (*Urochloa brizantha*) and ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) - were cultivated on nutrient solution containing 4 levels of P availability - 0.2, 0.5, 1 e 2 $\mu\text{M.L}^{-1}$. The objective, in this case, was to compare species on their capacity to acquire P, therefore, biomass production, acid phosphatase activity and organic acid root exudation were accessed. Taken together the three essays showed that the magnitude of P cycling depends on shoot biomass production and has a high positive correlation ($r>0.9$) with P availability up to 80 cm of depth. Although the forage was efficient to use and absorb P, we found no effect of mobilization of the more recalcitrant P fractions on field conditions nor rhizotron, the duration of the experiment might have been not enough to access these changes. The results of the hydroponics suggest that there are differences between brachiaria species in P use efficiency and growth according to P availability, brachiaria ruziziensis being the one presenting the best results. Therefore, depending on the system fertility and management, the species of brachiaria that will achieve better results may differ.

Keywords: Coffee; Forage; Intercrop; Efficiency; Fertility; P availability.

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos principais limitantes à produção agrícola nos trópicos. Nos solos tropicais, o P adicionado via fertilizante é fixado rapidamente, tornando-se indisponível para as plantas a curto prazo (SOLTANGHEISI et al., 2018). Isso é uma das razões da baixa eficiência de uso de P na agricultura ($< 20\%$) (JOHNSTON et al., 2014). Como as reservas desse elemento para produção de fertilizante são limitadas (RODRIGUES et al., 2016), é interessante buscar estratégias para o aumento da eficiência de uso do P na agricultura.

As plantas desenvolveram mecanismos para lidar com a falta de P ao longo de sua evolução. Eles vão desde o aumento da eficiência de uso interno do P e associação com fungos micorrízicos, até a exsudação de ácidos orgânicos e enzimas, como a fosfatase ácida (APase) nas raízes para disponibilizar o P do solo (LAMBERS et al., 2006). A inclusão de plantas que disponham desses mecanismos, em consórcios ou como cultura principal, pode ser uma maneira de melhorar a eficiência de uso desse nutriente (MERLIN; HE; ROSOLEM, 2013).

No Brasil, o cafeeiro é cultivado predominantemente a pleno sol, com o solo da entrelinha descoberto. Nesse ambiente o café está submetido a estresses como as altas temperaturas no solo e baixa disponibilidade de água nas camadas superficiais (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013). Isso limita a absorção de água e nutrientes e consequentemente, o desenvolvimento e a produção do cafeeiro. Esses danos podem ser minimizados com a introdução de culturas na entrelinha do cafezal (WUTKE; CALEGARI; WILDNER, 2014).

O gênero braquiária [*Urochloa* (Syn *Brachiaria*) spp.] possui alto potencial produtivo de parte aérea e um sistema radicular abundante e profundo que explora grande volume de solo. Portanto, as braquiárias geram grande quantidade de resíduos, tanto na superfície, como dentro do solo (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013; VOLPE et al., 2006).

Em consórcio com o café, a parte aérea de braquiária é roçada periodicamente e seus resíduos direcionados ao cafeeiro. Após decomposição/mineralização esses resíduos fornecem nutrientes ao longo do ciclo do cafeeiro. Esse processo caracteriza, de forma simplista, a ciclagem de nutrientes. Além de fornecer nutrientes, os resíduos depositados na superfície aumentam a água disponível no solo (PEDROSA, 2013), o que pode facilitar a difusão e absorção do P. Em profundidade, as raízes da braquiária podem se beneficiar da maior quantidade de água disponível no subsolo e absorver os nutrientes disponíveis, as próprias raízes mortas serviriam como uma potencial fonte nutricional nessas camadas.

As braquiárias possuem os mecanismos já citados para aumento da aquisição de P. Seu cultivo pode aumentar a atividade da enzima fosfatase ácida no solo (ROSOLEM; MERLIN; BULL, 2014). Os ácidos orgânicos exsudados em suas raízes diminuem a fixação de P, podem reduzir a capacidade de adsorção do elemento (JANEGITZ; INOUE; ROSOLEM, 2013).

A espécie de braquiária ideal para o consórcio com o cafeeiro ainda não é um consenso entre os técnicos, pois existem diferenças interespecíficas que podem ser mais desejáveis dependendo do sistema adotado. De qualquer maneira, a adoção do consórcio café-braquiária por parte dos produtores mostra inúmeros benefícios, contudo, alguns desses supostos benefícios observados no campo precisam ser verificados pela pesquisa. Embora a braquiária disponha de todos os mecanismos para tal, não se sabe se de fato ela realiza a ciclagem de P de camadas profundas, nem qual seria sua efetiva contribuição para o sistema caso ela ocorra. Também não se sabe quais os efeitos do cultivo de braquiária sobre as diversas frações de P ao longo do perfil de solo e se existem diferenças entre espécie de braquiária na ciclagem de P. Este projeto visou compreender o processo de ciclagem P pela braquiária consorciada com o cafeeiro.

2. HIPÓTESE E OBJETIVO

2.1.Hipótese

- (i) As braquiárias possuem sistema radicular abundante, profundo e dispõe de mecanismos para mobilizar e absorver P de frações menos lábeis do solo. Portanto, absorvem P em profundidade e ciclam esse elemento.
- (ii) Diferentes espécies de braquiária possuem adaptabilidade e estratégias distintas para aquisição de P em baixa disponibilidade.

2.2.Objetivos

O objetivo desse trabalho foi verificar a capacidade das braquiárias em mobilizar e ciclar P ao longo do perfil do solo; além de comparar as estratégias de adaptabilidade à baixa disponibilidade de P de diferentes espécies de braquiária.

3. REVISÃO DE LITERATURA

O fósforo

O fósforo (P) é considerado um macronutriente de plantas pela quantidade demandada, junto com N, K, S, Ca e Mg. Ele é um dos nutrientes de menor disponibilidade para as plantas, limitando seu crescimento (MARSCHNER, 2012). A disponibilidade de P no solo para as plantas depende principalmente da umidade, do pH e do tipo de solo. Devido a sua alta capacidade de adsorção específica às partículas do solo, mesmo com adubação fosfatada, em média, apenas 20% do P fornecido é usado pelas plantas (NEUMANN, 2016). Essa baixa eficiência é um problema, pois caracteriza o mal uso de um recurso finito, visto que as jazidas de P são uma fonte não renovável do mineral e algumas previsões apontam que as reservas poderão se extinguir em 100 anos considerando que o consumo de P no mundo se mantenha nos níveis atuais (COOPER et al., 2011). Além disso, o fosfato presente nesses fertilizante é proveniente da extração dessas jazidas, as quais se concentram em poucos países do mundo, com destaque para o Marrocos (COOPER et al., 2011).

A baixa disponibilidade/eficiência de uso do elemento ocorre porque grande parte do P inorgânico (P_i) é fixado no solo, dada sua alta reatividade com cátions como Ca, em solos alcalinos (TUNESI; POGGI; GESSA, 1999), ou com óxidos/hidróxidos de Fe e Al, em solos ácidos e altamente intemperizados (ALMEIDA; ROSOLEM, 2016; RODRIGUES et al., 2016), como a maioria dos solos brasileiros. Ainda, dependendo do sistema – ecossistemas, agro-ecossistemas, sistemas conservacionistas - o P pode estar na forma orgânica (P_o), representando entre 20 e 80% do P total no solo (NEUMANN, 2016). Nos solos intemperizados, com alto poder de fixação de P, o P_o na forma de ésteres de inositol pode ser ainda mais fortemente adsorvido ao solo que o P_i (GERKE, 2015).

Dependendo do pH do solo, o P_i pode ser encontrado em diferentes formas iônicas, mas como a faixa de pH recomendada para a maioria das culturas agrícolas fica entre 5 e 6, o P_i é encontrado predominantemente como $H_2PO_4^-$ e que também é a forma mais eficientemente absorvida pelas plantas (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998). A forte ligação entre os íons fosfato e os minerais de argila do solo limitam a capacidade de fornecimento de P. A concentração de P_i na solução do solo é normalmente baixa, entre 2 e 10 μM e, como consequência, o suprimento de P_i para a superfície da raiz por difusão é baixo. Como deslocamento do P no solo ocorre por difusão até as raízes, a limitação de água diminui a absorção do nutriente em quantidade adequada (MARSCHNER, 2012).

Na forma orgânica, o P pode ser encontrado em DNA, RNA, fosfolipídios ou inositol (BRADY; WEIL, 2013; GERKE, 2015). Cada uma dessas formas de Po interage de maneira distinta com a fase sólida do solo. Se por um lado, o P contido nos ácidos nucleicos e fosfolipídios é mais lábil, o P-inositol é fortemente adsorvido (GERKE, 2015). Isso limita a ação de enzimas sobre essa fração e por essa razão, o inositol pode representar a maior parte do P do solo em alguns sistemas (GERKE, 2015; TURNER, 2007).

Simplificadamente, o P do solo pode estar sob formas orgânicas e/ou inorgânicas, contidas em frações com maior ou menor labilidade. Estudar essas frações é importante para fins de nutrição de plantas e de eficiência de uso de P. Desta forma, muitas pesquisas têm estudado as frações de P do solo, visando a maximização da eficiência de uso desse nutriente, seja pela solubilização de frações menos lábeis, técnicas de aplicação que promovam maior aproveitamento do fertilizante fosfatado ou mesmo aumento da eficiência de absorção do solo pelas plantas, com uso de culturas mais adaptadas a baixos níveis de P.

O fracionamento de P no solo

O fracionamento químico de P do solo (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982) é uma técnica que pode definir as frações e a labilidade do P; e tem sido bastante utilizada recentemente em publicações brasileiras (ALMEIDA et al., 2018; ALMEIDA; ROSOLEM, 2016; ARRUDA et al., 2019; JANEGITZ; INOUE; ROSOLEM, 2013; RODRIGUES et al., 2016; SOLTANGHEISI et al., 2018).

Simplificadamente, a técnica de fracionamento consiste em submeter, gradativamente, a amostra de solo a extratores de força crescente para estimar as diversas frações de P existentes no solo (RODRIGUES et al., 2016). Segundo a literatura, cada extrator quantifica uma fração de P específica do solo, mas essas frações podem ser agrupadas de acordo com a labilidade do P que as compõem (RODRIGUES et al., 2016). Quando classificado dessa maneira, o P é dividido em três frações: lábil, moderadamente lábil e não lábil. A somatória dessas frações compõe o total de P do solo.

P lábil (P-lábil)

O P prontamente disponível às plantas é extraído pela resina de troca aniônica (RTA); o Pi fracamente adsorvido nas partículas de solo e o P orgânico (Po) com baixa recalcitrância, são extraídos pelo bicarbonato de sódio (NaHCO_3 0,5M). Juntas, essas frações constituem o chamado P lábil do solo (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982; LINQUIST; SINGLETON; CASSMAN, 1997; RODRIGUES et al., 2016).

P moderadamente lábil (P-mod)

O P-mod corresponde às frações de P extraídas com hidróxido de sódio (NaOH 0,1M) e ácido clorídrico (HCl 1M). Com o primeiro, é extraído o Po adsorvido na matéria orgânica do solo, associado aos ácidos fúlvicos e húmicos, além do Pi ligado a Fe, Al e minerais de argila; com o segundo, extrai-se Pi associado ao Ca x (GATIBONI et al., 2007; RODRIGUES et al., 2016).

P não lábil (P-não)

Constitui as formas mais recalcitrantes de P do solo. A extração é feita com NaOH 0.5M, responsável por quantificar o Pi fixado aos minerais de argila, Fe e Al e do Po recalcitrante; e ao P residual, obtido pela digestão ácida da amostra de solo após as outras extrações (CONDRON; GOH; NEWMAN, 1985).

Como se trata de uma divisão operacional das frações, baseada na força do extrator, pode haver sobreposição entre alguma dessas frações extraídas e as formas exatas de P que cada extrator “retira” do solo pode variar de acordo com o solo (RODRIGUES et al., 2016). De qualquer maneira, o fracionamento é importante para que possamos entender a dinâmica do P no solo e a biodisponibilidade de P no sistema (FOLTRAN et al., 2019; MERLIN; HE; ROSOLEM, 2013), informação importante para o manejo de adubação fosfatada e que não seria possível de se obter por análises de solo de rotina.

Mecanismos de adaptação das plantas à baixa disponibilidade de P

As plantas desenvolveram diferentes mecanismos de resposta à baixa disponibilidade de P ao longo de sua evolução. Essas respostas visam manter o crescimento da planta pela maximização da capacidade de absorção do P e da eficiência interna de uso do nutriente (FOLTRAN et al., 2019; HEUER et al., 2016). Dentre elas estão a maior investimento de fotoassimilados em raízes, as alterações na morfologia/anatomia radicular, a liberação de fosfatases, ácidos orgânicos na rizosfera, além da associação com fungos micorrízicos arbusculares (GERKE, 2015).

Alterações no sistema radicular

Em condições de baixa disponibilidade de P, as plantas aumentam a proporção de raiz em relação à parte aérea, indicando maior investimento de fotoassimilados, visando maior absorção do elemento (GERKE, 2015; RAO et al., 1996). Além disso, há maior produção de pelos radiculares – em número e comprimento - o que representa um baixo custo energético

para a planta e aumenta a área superficial do sistema radicular e favorece a absorção de nutrientes, principalmente os pouco móveis como o P (LAMBERS et al., 2006).

Alterações na anatomia radicular, como a formação de aerênquima, são respostas à baixa disponibilidade de P também. Nesse processo, são formados “espaços gasosos” na raiz, o que reduz o custo metabólico para manutenção dessas raízes com aerênquima e conseqüentemente, torna a exploração do solo em busca de nutrientes e água, mais barata (POSTMA; LYNCH, 2011a, 2011b).

Associação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

Nessa simbiose, a planta fornece carboidratos e lipídeos para o fungo se desenvolver; em troca, as hifas extra-radulares que o fungo emite funcionam como um prolongamento do sistema radicular, possibilitando explorar maior volume de solo e obtenção de nutrientes como o P, além de proporcionar benefícios não nutricionais à planta (CLARK; ZETO, 2000; PÉREZ-TIENDA et al., 2012). Essa associação é ainda menos custosa para a planta que a emissão de pelos radulares (LAMBERS; CHAPIN; PONS, 2008).

Ácidos orgânicos

Ácidos orgânicos ou carboxilatos (ânions associados aos ácidos orgânicos) são produto da oxidação incompleta de fotoassimilados e representam uma forma transitória e de acúmulo do carbono fixado na planta (IGAMBERDIEV; EPRINTSEV, 2016). Sua função está mais ligada ao ciclo do ácido tricarboxílico, mas essa natureza transitória dá flexibilidade a esses compostos que podem sofrer oxidação completa, ser utilizados para síntese de aminoácidos, manutenção do equilíbrio redox, produção e consumo de energia, além da acidificação do meio extracelular (IGAMBERDIEV; EPRINTSEV, 2016).

As raízes das plantas podem exsudar ácidos carboxílicos, principalmente malato, citrato e, em alguns casos, oxalato (GERKE, 2015; MEYER et al., 2009). A secreção desses compostos é uma resposta à deficiência de P, tolerância a Al e a outros metais (GERKE, 2015; IGAMBERDIEV; EPRINTSEV, 2016; MERLIN; ROSOLEM; HE, 2016).

A exsudação de ácidos orgânicos na rizosfera mostra ser eficiente na solubilização e aquisição de P para diversas espécies (GERKE, 2015; MERLIN; ROSOLEM; HE, 2016; PLAYSTED et al., 2006). Os ácidos orgânicos podem disponibilizar o P_i que está em frações moderadamente lábeis no solo, como, por exemplo, o P ligado a Ca, Fe e Al; e também o Po, na forma de ésteres de inositol e fitato (GERKE, 2015; LAMBERS; CHAPIN; PONS, 2008). Nesse processo, os ácidos exsudados funcionam como trocadores de ânions, liberando o

ânions fosfato para a solução e complexando seu ligante metálico no caso do P_i ; ou ainda assumindo o lugar do fosfato adsorvido ao solo, tanto para P_i como P_o (LAMBERS; CHAPIN; PONS, 2008). Esse processo de mobilização do P adsorvido é essencial para o funcionamento de outra estratégia de mobilização do elemento, a ação de enzimas sobre o P_o , como a fosfatase ácida (GERKE, 2015).

Fosfatase ácida (APase)

As APases são enzimas e encontradas em todas as espécies e tecidos. Elas podem ser secretadas (extracelulares) ou intracelulares. A principal classe de APases produzidas por indução de baixa disponibilidade de P_i pertencem à família das fosfatases ácidas púrpuras (Purple Acid Phosphatases – PAPs). A maioria das PAPs é induzida pela deficiência de P e constituem uma das estratégias das plantas para se adaptar à baixa disponibilidade desse elemento. As plantas aumentam a atividade de PAPs intra e extracelulares a fim de mobilizar formas solúveis de P no solo ou remobilizar o P internamente na planta (TIAN; LIAO, 2015).

Estudos têm mostrado que a secreção de fosfatases ácidas pode facilitar o acesso de plantas ao P complexado, tornando-o disponível para absorção (TIAN; LIAO, 2015). No solo, o P_o na forma de inositol não está prontamente disponível para as plantas, pois fica adsorvido às cargas positivas do solo ainda mais fortemente que o ortofosfato (GERKE, 2015). O P_o precisa ser solubilizado e, uma vez em solução, poderá sofrer ação de enzimas como fosfatases, fitases ou ribonucleases. Após esse processo o P orgânico torna-se lábil no solo, ficando disponível para absorção pela planta (ZAIA et al., 2008).

O cafeeiro (*Coffea arabica* L.)

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo. Do total produzido e de área cultivada, 80% corresponde ao café arábica (*Coffea arabica* L.) (CONAB, 2017). Na maioria dos casos, o cultivo dessa espécie no Brasil é a pleno sol, com o solo da entrelinha exposto, o que favorece o aparecimento de estresses, principalmente por excesso de radiação solar, altas temperaturas e falta de água, prejudicando seu crescimento e desenvolvimento.

A não cobertura do solo favorece o desenvolvimento de temperaturas altas nas camadas superficiais de solo, o que afeta negativamente o crescimento das raízes e pode causar danos no caule. FRANCO (1961) verificou que dependendo do tipo de solo a temperatura na superfície pode chegar próximo a 50°C, causando escaldadura do colo do caule. Essas altas temperaturas podem favorecer a evaporação de água do solo, aumentando os riscos de estresse hídrico, principalmente na época seca do ano (PEDROSA, 2013). O

impacto negativo especificamente sobre o sistema radicular do cafeeiro, pode afetar o acúmulo de biomassa da planta toda, pois reduz a absorção de água, nutrientes e a produção de fito reguladores (RENA; DAMATTA, 2002).

O sistema radicular do cafeeiro pode ser dividido em raízes grossas ou permanentes, com diâmetro superior a 3 mm, e raízes finas ou absorventes, com diâmetro inferior a esse valor. As raízes permanentes têm função de sustentação da planta, enquanto as raízes absorventes, com destaque para as com diâmetro inferior a 1 mm, são responsáveis pela absorção de água e nutrientes. A profundidade da raiz do cafeeiro pode chegar a 3 m e, lateralmente, as raízes podem se estender por até 2 m. Há controvérsias quanto a profundidade efetiva do sistema radicular e à distribuição das raízes ao longo do perfil do solo, mas de modo geral, ele é superficial, 90% das raízes do cafeeiro estão concentradas nos primeiros 50 cm de profundidade e até 90 cm ao redor do caule (RENA; DAMATTA, 2002).

São vários os fatores que afetam o crescimento, desenvolvimento e distribuição do sistema radicular do cafeeiro, sendo eles genéticos, fisiológicos, climáticos, de condições físico-químicas do solo e/ou resultado do manejo adotado no sistema de produção (RENA; DAMATTA, 2002)

Para o desenvolvimento radicular adequado do cafeeiro, a faixa de temperaturas ideal é entre 13 e 38°C (FRANCO, 1958, 1982). Temperaturas fora desse intervalo diminuem o crescimento, podendo causar danos e até a morte de parte do sistema radicular do cafeeiro. As maiores taxas de evaporação de água do solo como consequência do aumento da temperatura diminuem a disponibilidade hídrica às raízes. Como consequência pode haver estresse hídrico, pois a planta tem limitações para explorar a água de camadas mais profundas do solo, devido ao seu sistema radicular superficial. Tanto o estresse hídrico como o térmico reduzem a proporção de raízes absorventes no sistema radicular do cafeeiro, limitando a absorção de nutrientes do solo, o que leva a menor crescimento e queda na produção (RENA; DAMATTA, 2002).

Pode-se reduzir o estresse do cafeeiro à altas temperaturas e falta de água de diferentes maneiras, tais como o uso de plantio adensado, arborização, irrigação, práticas de adubação verde, consórcios de espécies e cobertura morta sobre o solo (WUTKE; CALEGARI; WILDNER, 2014).

O consórcio café-braquiária

Consórcios de culturas proporcionam maior diversidade e eficiência no sistema de produção, contribuindo com o controle de erosão, agregação e cobertura do solo, proteção

contra radiação solar direta, adição de matéria orgânica, fixação biológica de nitrogênio, reciclagem, extração e mobilização de nutrientes de zonas fora do alcance da cultura principal, redução da toxicidade de Al e incidência de plantas infestantes, além de promover o aumento da diversidade e atividade microbiana no solo (LIMA FILHO et al., 2014a).

As braquiárias [*Urochloa* (Syn *Brachiaria*) *spp.*] são plantas forrageiras perenes da família Poaceae (gramíneas) utilizadas em consórcios com diversas culturas, inclusive com o cafeeiro. A adoção do consórcio café-braquiária por parte dos produtores mostra inúmeros benefícios, como a diminuição do estresse no cafeeiro, menor ou estresse hídrico quase nulo na seca e ausência de grãos de café chochos. Diferentemente do que ocorre em consórcio com leguminosas, onde a produtividade de café diminui (LIMA FILHO et al., 2014b), o sistema café-braquiária aparenta, ainda que empiricamente, ser mais produtivo que o sistema tradicional. Se manejada à uma distância de 50 cm do cafeeiro, a braquiária não atrapalha as operações na lavoura cafeeira, nem compete por recursos (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013).

Embora não seja um consenso entre os produtores, a espécie de braquiária mais utilizada em consórcio com o cafeeiro é a braquiária decumbens, seguida da braquiária ruziziensis e braquiária brizanta, *Urochloa decumbens*, *U. ruziziensis* e *U. brizantha* respectivamente. Existem diferenças entre essas espécies quanto à produção, exigência nutricional, tolerância a estresses, dentre outras (RAO; KERRIDGE; MACEDO, 1996). Portanto, pode-se esperar respostas distintas entre as espécies de braquiária de acordo com cada sistema produtivo; e uma espécie pode ser mais adequada do que a outra dependendo do sistema adotado.

As informações disponíveis na literatura sobre os efeitos das braquiárias sobre atributos do solo, supressão de daninhas e ciclagem de nutrientes advém principalmente de estudos com pastagens e consórcios com culturas anuais, como o milho. Existe pouca informação disponível especificamente sobre os efeitos da introdução de braquiárias no sistema produtivo do cafeeiro. Desse modo, o consórcio café-braquiária ainda é controverso entre os pesquisadores da área, apesar da adoção pelos produtores; e os possíveis benefícios necessitam ser verificados e quantificados por meio de pesquisas científicas.

Efeitos da introdução de braquiária no sistema de produção de café

No consórcio com café, a braquiária que cresce na entrelinha é roçada e seus resíduos direcionados à saia do cafeeiro, isso proporciona cobertura morta sobre o solo e libera nutrientes para o cafeeiro durante os processos de mineralização/decomposição dos resíduos

(PEDROSA, 2013; RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013). Os resíduos de braquiária depositados sobre o solo protegem contra mudanças bruscas de temperatura (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013) e reduzem evaporação de água, preservando a umidade no solo especialmente nos meses secos do ano (PEDROSA, 2013), além de inibir o aparecimento de plantas daninhas (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013).

O potencial produtivo das braquiárias é elevado, cerca de 5 ton.ha⁻¹ de MS de parte aérea quando consorciada com o cafeeiro (RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013) e 13 ton.ha⁻¹ de MS para o sistema radicular de 0 a 40 cm de profundidade (RAZUK, 2002; VOLPE et al., 2006). As raízes de braquiária são fasciculadas e altamente ramificadas, explorando grande volume de solo e regularmente atingem cerca de 3 m de profundidade (RODRIGUES; MARIOTI; ROOSEVELT JÚNIOR, 2011) muito embora 80% da MS esteja contida nos primeiros 50 cm de solo (FERREIRA et al., 2010).

O grande aporte de resíduos de parte aérea e raízes, além dos exsudatos radiculares das braquiárias, estimulam a atividade de microrganismos que favorecem a formação e estabilidade de agregados, estruturando o solo (SALTON, 2005). Ainda, promove redução na densidade do mesmo (FIDALSKI, 2015) e, a decomposição de suas raízes mortas podem favorecer a infiltração de água por aumentar a porosidade total e macroporosidade (KLUTHCOUSKI; OLIVEIRA; AIDAR, 2009), o que também pode favorecer o movimento de fertilizantes e corretivos pelo perfil do solo, além do crescimento de raízes de culturas subsequentes (BOLLIGER et al., 2006).

Por explorar grande volume de solo, a braquiária é capaz de aumentar a ciclagem de nutrientes no solo (MERCANTE et al., 2004; SALTON et al., 2008). Nesse processo, os nutrientes de zonas fora do alcance do sistema radicular da cultura consorciada e/ou em formas de baixa disponibilidade são absorvidos pelas raízes mais profundas da braquiária e levados à parte aérea. Depois de roçada, esses resíduos serão degradados, disponibilizando os nutrientes para absorção pelas raízes da cultura consorciada.

Ciclagem de fósforo pela braquiária

A braquiária parece ter desenvolvido mecanismos que permitem absorver melhor o P do solo. Cita-se a “solubilização” do elemento fixado à matriz do solo e ligado a cátions como o Al ou ainda associação com microrganismos, como fungos micorrízicos. Os ácidos orgânicos exsudados por suas raízes competem pelo sítio de adsorção de P nos colóides do solo, diminuindo a fixação do mesmo (JIAYIN et al., 2018). SILVA et al (1997), em estudo avaliando o efeito de adubos verdes sobre a adsorção de P no solo, concluíram que entre

várias espécies avaliadas, a área cultivada com braquiária foi a que proporcionou menor adsorção de P ao solo. Da mesma forma, JANEGITZ et al (2017), observaram a redução na capacidade máxima de adsorção de P pelo solo pelo cultivo da braquiária *ruziziensis*. O cultivo da braquiária promove o aumento da atividade da enzima fosfatase ácida no solo (ROSOLEM; MERLIN; BULL, 2014) e por ser ótima hospedeira de fungos micorrízicos, pode favorecer o aumento da absorção de nutrientes, em particular o P (CORDEIRO et al., 2005; RAGASSI; PEDROSA; FAVARIN, 2013).

Dependendo da espécie de braquiária e do manejo adotado, seus resíduos decompostos podem fornecer até 100 kg.ha⁻¹ de N, 15 kg.ha⁻¹ de P e 130 kg.ha⁻¹ de K, além de 40 kg.ha⁻¹ de Ca e de 25 kg.ha⁻¹ de Mg (COSTA et al., 2014; CRUZ et al., 2008; DA COSTA et al., 2016; PACHECO et al., 2011, 2013).

Avaliando especificamente a ciclagem de P em rotação de braquiária *ruziziensis* com soja, ALMEIDA e ROSOLEM (2016) verificaram que a braquiária proporcionou o aumento de frações lábeis e moderadamente lábeis de P e reduziu a fração não lábil do nutriente no solo. Foi observado aumento do P-lábil com o cultivo de braquiária *ruziziensis* após soja, sem, no entanto, haver aumento da produtividade de grãos (MERLIN; HE; ROSOLEM, 2013). Contudo, após cultivo da mesma espécie, ALMEIDA et al. (2018) observaram redução na biodisponibilidade de P, possivelmente pela ligação do mesmo com a matéria orgânica do solo e formação de fitatos. Em estudo mais recente, ALMEIDA et al. (2019) relataram menor disponibilidade de P para a soja após cultivo da braquiária *ruziziensis* pela redução da mobilidade e suprimento de P para a solução do solo. Em rotação dessa mesma espécie com milho (ALMEIDA; PENN; ROSOLEM, 2018), verificou-se menor absorção do nutriente pelo milho. Muito embora as respostas tenham sido diversas, esses estudos foram conduzidos em área semelhantes, comparando o cultivo de braquiária *ruziziensis* e pousio em rotação com a soja. Como a cultura do café é perene, pode-se esperar que a decomposição dos resíduos forneça P suficiente ao longo do ciclo de cultivo. Portanto, ainda existem lacunas sobre o efeito da introdução de braquiária sobre o P em sistemas de produção.

Além disso, deve ser levado em conta que o processo de difusão, que leva o P à raiz para ser absorvido, necessita de água disponível no solo. Como os resíduos de braquiária reduzem a evaporação de água e mantem o solo mais úmido, a difusão e absorção do mesmo podem ser favorecidas. Em sistemas que mantem a cobertura do solo com resíduos, a principal fonte de P pode ser a decomposição/mineralização de resíduos na superfície e das raízes mortas em profundidade, podendo gerar acúmulo de P orgânico no solo (ZAIA et al., 2008). Como no consórcio café-braquiária ambas as plantas são perenes e há sempre resíduo

sobre o solo e grande massa de raízes, provavelmente isso também ocorra. Por explorar o solo em maior profundidade, a braquiária pode se beneficiar da água disponível em subsuperfície e conseguir absorver mais P cuja origem seria exatamente as raízes mortas da braquiária e de outras plantas, que cresceram até camadas mais profundas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Experimento I – Campo

A área experimental localiza-se na cidade de Capetinga – MG, a 830 m de altitude, o solo é um Latossolo Vermelho Amarelo e a o clima Cwa segundo a classificação de Koppen. Nesta o consórcio café-braquiária (*C. arabica* L. cv Arara / *U. decumbens*) foi instalado desde o plantio do café, há dois anos e meio. O espaçamento é o de 3,4 m entrelinhas e 0,6 m entre plantas de café, totalizando cerca de 4900 plantas por hectare.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com 5 repetições. Os tratamentos consistiram no fornecimento de solução nutritiva com mesma quantidade de P em três diferentes profundidades do solo sob cultivo de braquiária na entrelinha do cafezal: P a 30 cm, P a 60 cm e P a 90 cm. Além disso, havia uma testemunha não adubada para fins comparativos.

Instalou-se o experimento I no dia 10 de outubro de 2018. Com auxílio de uma sonda amostradora de raízes, foram realizadas coletas de solo e raízes, além do fornecimento de P nas posições propostas – a 30, 60 e 90 cm de profundidade. As coletas de solo e raiz foram feitas conforme o esquema da Tabela 1.

Tabela 1. Esquema de coletas de solo e raízes na instalação do experimento. As áreas sombreadas representam as camadas coletadas em cada tratamento.

Camada/ Tratamento	P a 30 cm	P a 60 cm	P a 90 cm
0 - 30 cm			
30 - 60 cm			
60 - 90 cm			

Em cada parcela foram realizadas 2 perfurações no solo. Como o diâmetro interno da sonda coletora de raízes é de 5 cm e as camadas eram coletadas a cada de 30 cm, tem-se que o volume de solo (com raízes) equivalente a cada camada coletada pela sonda era de 0.59 dm⁻³. Em cada furo deixado pela sonda, foi introduzido um cano de PVC de 2' com caps em ambas extremidades. Na extremidade inferior, os caps possuíam 6 furos de 3 mm para que a solução nutritiva pudesse ser aplicada na profundidade desejada; na extremidade superior, o cap servia como proteção para evitar a entrada de detritos

Solução nutritiva de P

Com base na análise de solo preliminar da entrelinha (Tabela 2) o objetivou foi fornecer P para elevar o teor em 3 vezes o disponível na análise nos 3 dm⁻³ ao redor de cada tubo.

Tabela 2. Análise preliminar de solo da entrelinha referente à camada 0 a 20 cm.

pH	M.O	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	Sat.	Sat.	S
CaCl ₂										bases	Al	SO ₄
	g dm ⁻³	mg dm ⁻³			----- mmol _c dm ⁻³ -----					V%	m%	mg dm ⁻³
5	21	12	1,3	23	7	34	0	31	65	48	0	3

Considerando-se que o teor inicial de P no solo era de 12 mg.dm⁻³, o objetivo da adubação foi elevar para 36 mg.dm⁻³, ou seja, o “déficit de P” era de 24 mg.dm⁻³. Como havia 2 tubos de PVC e o objetivo era elevar o teor de P nos 3 dm⁻³ ao redor de cada tubo, o cálculo foi o seguinte:

$$24 \text{ mg.dm}^{-3} * 2 (\text{tubos}) * 3 \text{ dm}^{-3} = > 144 \text{ mg de P}$$

Essas 144 mg de P foram fornecidas na forma de Na₂HPO₄, que contém 21.8% de P em sua composição. Assim, seriam necessárias 659.7 mg desse sal para fornecer a dose de P. Considerando um aproveitamento médio de 25% da adubação, forneceu-se a dose de 2.64 g de Na₂HPO₄ solubilizados em 1.5 L de água para as três profundidades.

O experimento foi conduzido por 194 dias. Durante a condução do mesmo foram realizadas três cortes de parte aérea de braquiária – aos 60, 137 e 194 dias após a instalação – conforme o cronograma da fazenda, que segue o manejo padrão das propriedades cafezeiras que utilizam o consórcio café-braquiária. No último dia também foram coletadas amostras de solo e raízes nas 3 profundidades de aplicação, ao lado dos tubos instalados, para verificar o efeito dos tratamentos. Os dados de precipitação e temperatura média, bem como as datas de instalação, coletas e término do experimento estão dispostos na Figura 1.

Figura 1. Dados climatológicos para a cidade de Capetinga-MG. As linhas verticais verdes representam o momento das coletas de parte aérea de braquiária; as vermelhas representam coletas de raízes, o início e o final do experimento. Fonte: Agritempo.

Coletas e processamento

Separação de raízes do solo

Na instalação e ao final do experimento, o solo coletado pela sonda em cada camada foi imediatamente peneirado para a separação das raízes. Ele foi acondicionado em saco plástico identificado e as raízes lavadas. Essas raízes foram colocadas em tubos falcon de 50 ml com etanol a 30% (v/v) e levadas à geladeira para conservação do material, que seria usado para a análise no software WhinRizo.

Coletas de parte aérea de braquiária

As coletas de parte aérea de braquiária simularam o manejo que é feito nas propriedades cafezeiras, tanto na frequência, quanto na altura dos cortes. Em cada uma das três coletas o corte foi realizado com foice a 15 cm do solo. A área ao redor dos dois tubos de PVC (1.5 m²) foi coletada e acondicionada em sacos. O mesmo processo foi feito para os controles que não foram adubadas.

Avaliações

Fertilidade do perfil

Das amostras de solo coletadas na instalação e ao final do experimento, sub amostradas homogêneas foram encaminhadas para análise de rotina de fertilidade do solo em laboratório especializado Pirasolo - Laboratório Agrotécnico Piracicaba Ltda.

Fracionamento do P do perfil do solo

Procedeu-se com o fracionamento do P segundo Hedley et al. (1982) com modificações de Condrón et al. (1985) das amostras de solo coletadas na instalação e ao final do experimento. De forma resumida, 500 mg de cada amostra foram colocadas em tubos de 15 ml e passaram pela seguinte sequência de extratores: resina de troca aniônica (RTA), bicarbonato de sódio (NaHCO_3) $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$, pH 8,5; NaOH $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$; HCl 1 mol.L^{-1} e finalmente NaOH $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$. Entre cada extração os tubos eram centrifugados a 4000 rpm para coleta de sobrenadante cristalino. Depois disso, o solo era então lavado com NaCl $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$. Após essas extrações, o solo foi seco a 50°C por 72h, moído e 100 mg foram digeridas segundo USEPA (1971) para extração do P residual. A determinação do P inorgânico (P_i) foi feita segundo Murphy & Riley (1962) com molibdato de amônio e ácido ascórbico para os extratos ácidos (RTA, HCl e residual). Para os extratos alcalinos de NaHCO_3 e NaOH, o P_i foi determinado pelo método de Dick & Tabatabai (1977) em ambas os extratos. Esses extratos foram posteriormente autoclavados a 121°C por 2h com persulfato de amônio e ácido sulfúrico para determinar o P total de cada extrato. Em todos os extratos alcalinos, calculou-se o P orgânico (P_o) pela subtração da concentração de P_i da de P total. Em todos os casos o método colorimétrico foi utilizado. A soma de todas as frações orgânicas e inorgânicas de P formam o chamado P total do solo.

Para análise, as frações de P foram agrupadas por labilidade segundo RODRIGUES et al. (2016):

- P-lábil: compreende a soma das frações RTA, NaHCO_3 orgânico e inorgânico.
- P-moderadamente lábil (P-mod): compreende as frações orgânicas e inorgânicas de NaOH $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ somadas ao HCl 1 mol.L^{-1} .
- P-não lábil (P-não lábil): dado pela soma das frações extraídas por NaOH $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ e do P residual.
- P-total: soma de P-lábil, P-mod e P-não lábil.

Classificação de parâmetros morfológicos do sistema radicular

As amostras de raízes conservadas em geladeira foram escaneadas (Epson XL 1000, 400 dpi) e as imagens obtidas analisadas pelo software Winrhizo® versão 4.1c (REGENT INSTR. INC.). Como se tratava de fragmentos, selecionou-se os parâmetros mais importantes devido a natureza do material: comprimento total e por classe de tamanho de raízes; área superficial total e por classe de tamanho de raízes e diâmetro médio de raízes.

Quantificação da matéria seca e teor de nutrientes na parte aérea de braquiária

Todo o material vegetal coletado (raízes e parte aérea) foi seco em estufa a 65° C até massa constante, obtendo-se, então, a matéria seca desses materiais. A parte aérea seca foi moída finamente e esse material foi enviado ao laboratório Pirasolo para análise do teor de nutrientes nos tecidos. A determinação dos elementos foi feita por solubilização sulfúrica (N – Kjeldahl), solubilização via seca (B e Mo), solubilização nítrico perclórica e quantificação via colorimetria (P), fotometria (K) e ICP (Micro + S, Ca e Mg).

Acúmulo e ciclagem de nutrientes

O cálculo do acúmulo e ciclagem de nutrientes foi realizado considerando a área útil de braquiária em um hectare de lavoura de café. Para isso, considerou-se o espaçamento de 3,4 m entrelinhas de café e o recuo de 0,5 m de ambos os lados das plantas de braquiária e as linhas de café.

Ao dividir a largura nominal de 1 ha (100m) pela largura da entrelinha de braquiária (3,4 m), obtemos o total de entrelinhas possíveis em 1 ha, 29,4. Portanto, a área útil de cada entrelinha seria 2,4 m (3,4 m – 1 m) multiplicado pelo número de entrelinhas (29,4) e pelo comprimento de 1 ha (100 m):

$$\text{Área útil de braquiária.ha}^{-1}(\text{m}^2) = 2,4 * 29,4 * 100 = 7.056 \text{ m}^2$$

O acúmulo de nutrientes por ha foi então obtido, pela multiplicação da área útil de braquiária em 1 ha pelo acúmulo de nutrientes em 1m².

Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística pelo software RBio (BHERING, 2017) para análise de variância (ANOVA) e comparação de média pelo teste de Tukey a 5% de significância para todas as variáveis.

Experimento II – Rizotron

O ensaio foi conduzido em casa de vegetação na ESALQ/USP em Piracicaba - SP e consistiu no fornecimento de P em diferentes camadas no perfil de solo em rizotrons cultivados com braquiária decumbens (Figura 2). Cada rizotron consistia em um tubo de PVC com 20 cm de diâmetro e 2 m de altura, totalizando um volume de 62.8 m^3 .

Figura 2. Tratamentos empregados no experimento II. TC, tratamento controle sem adição de P; T1, P fornecido na camada de 0 a 30 cm; T2, P fornecido na camada de 0 a 80 cm; T3, P fornecido na camada de 0 a 130 cm; T4, P fornecido na camada de 0 a 200 cm; T5, P fornecido na camada de 130 a 200 cm; T6, P fornecido na camada de 80 a 200 cm.

Para o enchimento do rizotron, peneirou-se solo pobre em P (Tabela 3) e forneceu-se todos os nutrientes em níveis adequados para o crescimento e desenvolvimento da planta, com exceção do P.

Tabela 3. Análise química do solo utilizado no experimento II.

pH	M.O	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S -SO ₄	SB	CTC	V	m
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	--- mmol _c dm ⁻³ ---			mg dm ⁻³			--- mmol _c dm ⁻³ ---		%	
5,1	14	6	0,8	10	6	18	0	5	17	35	48	0

Para o fornecimento do P, parte do solo peneirado foi misturado com Superfosfato Triplo em betoneira, a fim de elevar o teor de P disponível para 30 mg.dm^{-3} . Para o cálculo da quantidade a ser adicionada considerou-se uma eficiência de 25%. Logo após este processo o solo foi colocado nos tubos formando as camadas referentes à cada tratamento (Figura 2). Para que se soubesse exatamente o ponto de divisão das camadas adubadas, utilizou-se uma trena e colocou-se uma fina camada de areia dividindo o solo de cada camada. Após uma semana, as parcelas foram semeadas.

A braquiária decumbens foi semeada em 6 de junho de 2018. Essa espécie foi escolhida por ser a mesma do experimento de campo e ser predominante nos sistemas de consórcio com cafeeiro. Após germinação e emergência, foi realizado o desbaste das plântulas, mantendo-se apenas 3 por parcela. Cada parcela foi irrigada individualmente por gotejamento para que não ocorresse deficiência hídrica. Durante a condução do experimento foram realizadas duas coletas de parte aérea de braquiária e 3 adubações nitrogenadas com solução de ureia a 0,5 % (p/v). Ao término de 190 dias, iniciou-se a desmontagem dos rizotron.

Desmontagem dos rizotrons

Os tubos foram cortados ao meio, longitudinalmente, com uma serra circular. Após retirada da parte aérea, o perfil de solo intacto foi então dividido nas quatro camadas de solo: 0 – 30, 30 – 80, 80-130 e 130 – 200 cm – com auxílio de trena e um facão. A fina camada de areia colocada na instalação possibilitou a correta identificação dessas camadas do perfil de solo. O solo de cada camada foi separado das raízes e peneirado, uma amostra desse material (cerca de 500g) foi então coletada para as análises de fracionamento.

Em sequência cada camada foi lavada com água corrente para a separação das raízes. Com as raízes já lavadas, uma subamostra foi retirada e conservada em álcool 50% (v/v) em geladeira para posterior análise no software Winrhizo.

Avaliações

Fracionamento do P do perfil do solo

Procedeu-se com o fracionamento do P das amostras de cada camada de solo do rizotron segundo Hedley et al. (1982) com modificações de Condon et al. (1985) da mesma forma como foi realizado no experimento I.

Classificação de parâmetros morfológicos do sistema radicular

As subamostras de raízes conservadas em etanol na geladeira foram escaneadas uma a uma (Epson XL 1000, 400 dpi) e as imagens obtidas analisadas pelo software Winrhizo® versão 4.1c (REGENT INSTR. INC.). Como se tratava de fragmentos, selecionou-se os parâmetros mais importantes devido à natureza do material: comprimento total e por classe de tamanho de raízes; área superficial total e por classe de tamanho de raízes e diâmetro médio de raízes.

A partir desses dados e da matéria seca do sistema radicular, calculou-se para cada camada:

- **Comprimento específico da raiz (CER) – cm.g^{-1} :** dado pela razão entre o comprimento das raízes (cm) e a matéria seca de raízes (g).
- **Área superficial específica da raiz (ASER) – $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$:** dada pela razão entre a área superficial das raízes (cm^2) e pela matéria seca de raízes (g).

Quantificação da matéria seca e teor de nutrientes na parte aérea de braquiária

Todo o material vegetal coletado (raízes e parte aérea) foi seco em estufa a 65° C até massa constante, obtendo-se, então, a matéria seca desses materiais. A parte aérea seca foi moída finamente e esse material foi enviado ao laboratório para análise do teor de nutrientes nos tecidos (Pirasolo - Laboratório Agrotécnico Piracicaba Ltda) conforme descrito no Experimento I.

Índices de eficiência de uso do P

Com os dados de biomassa e acúmulo de P, foram calculados índices de eficiência de uso do P (EUP).

- i) **Eficiência de absorção do P (EAP):** dada em gP.gMSR^{-1} , foi calculada pela razão entre a quantidade de P acumulada na parte aérea, em gramas, pela matéria seca de raízes, em gramas.
- ii) **Eficiência de uso do P (EUP):** calculou-se dois índices de eficiência de uso do P, para produção de matéria seca de parte aérea (EUPPA) e para produção de matéria seca total (EUPMS). Ambos são dados pela razão entre o total de P acumulado, em gramas, pela MS de parte aérea no primeiro caso; e matéria seca total, no segundo caso.

Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística pelo software RBio (BHERING, 2017) para análise de variância (ANOVA) e comparação de média pelo teste de Tukey a 5% de significância para todas as variáveis. Em seguida, as variáveis MSR, MSPA, acúmulo de P e as frações do fracionamento de P do solo foram submetidas à análise de componentes principais (PCA), correlação de Pearson e análise de rede usando o software RBio e Minitab® 17 para elaboração dos gráficos.

Experimento III – Hidroponia

Instalação e condução do experimento

O ensaio foi instalado no dia 1 outubro de 2018 em casa de vegetação da Esalq-Usp, em Piracicaba, e consistiu no cultivo hidropônico de 3 espécies (braquiária brizanta cv. Marandú, braquiária decumbens cv. Basilisk e braquiária ruziziensis] submetidas a 4 níveis de P em solução – 10; 25; 50; 100 % em relação ao recomendado para solução de Hoagland & Arnon (HOAGLAND; ARNON, 1950), respectivamente a concentração de P na solução era 6,2; 15,5; 31; e 62 mg.L⁻¹.

Na fase preparatória, cultivou-se as espécies de braquiária em vasos de 3 L com vermiculita por 3 semanas para que atingissem tamanho adequado. Nesse período, era fornecido uma solução nutritiva completa e diluída em 30% para evitar deficiências. Após 21 dias da germinação, as plantas apresentavam tamanho apropriado para o transplante para a hidroponia. Os vasos foram desmontados e as raízes das plantas foram lavadas em água, retirando-se todo material aderido ao sistema radicular delas. As plântulas foram então envolvidas com espuma na altura do colo para que fossem fixadas às parcelas.

Embora as plântulas das três espécies estivessem com a mesma fenologia (parte aérea), visualmente as espécies aparentemente diferiam em seu sistema radicular. Mesmo assim escolheu-se as plântulas mais semelhantes e coletou-se 5 de cada espécie para caracterização do sistema radicular no software WinRhizo.

Cada parcela correspondia a um vaso plástico de 2.5 L com sistema de oxigenação contendo solução nutritiva e 3 plantas. Para evitar que as plântulas sofressem com o aumento abrupto do potencial osmótico da solução 100%, fornecemos a solução completa e diluída em 50%. Após 1 semana, os tratamentos foram instalados: solução de Hoagland & Arnon completa, variando-se apenas os níveis de P de acordo com cada tratamento. Ao longo do experimento, a condutividade elétrica da solução era medida com um condutivímetro e

reposta quando estivesse abaixo de $1,5 \text{ dS.cm}^{-3}$. A solução nutritiva era reposta em sua totalidade para todos os tratamentos no mesmo dia. Além disso, adicionamos semanalmente 10 ml de uma solução de antibióticos de amplo espectro (ampicilina + cloranfenicol a 20ppm) a cada vaso com solução nutritiva para evitar contaminações indesejadas.

Um dia antes do término do experimento, o volume restante de solução de cada parcela foi medido e uma amostra de 50 ml foi coletada e congelada para posterior avaliação dos teores de P inorgânico remanescentes. Cada vaso foi então preenchido com água Milli-Q para que as raízes exsudassem ácidos orgânicos. Uma amostra dessa solução contendo ácidos orgânicos foi coletada após 24 h e congelada para posterior análise. Nesse mesmo dia, aproximadamente 1g de raízes frescas foi coletado para análise da atividade da enzima fosfatase ácida. Ao final de cinco semanas, o experimento foi finalizado.

Avaliações

Quantificação da matéria seca de plantas

Ao término do experimento as plantas coletadas foram separadas em parte aérea e raízes. Esse material foi colocado para secagem em estufa a 65°C até obtenção de massa constante, obtendo-se, então a matéria seca das partes e das plantas como um todo.

Quantificação ácidos orgânicos

Coletou-se 10 ml da solução congelada contendo ácidos orgânicos foram liofilizados para a retirada de toda a umidade sem degradar os metabólitos. A extração dos metabólitos foi adaptada de Caldana et al. (2013). Em resumo, adicionou-se 700 μL de metanol em cada amostra liofilizada para extração por 1h em agitador a 70°C . Procedeu-se com centrifugação a $12.000 \times g$ para obtenção do sobrenadante. Devido à existência de moléculas polares e apolares no sobrenadante, adicionou-se clorofórmio e água, ambos no volume de 300 μL , para a separação dessas frações. 1 ml da fração polar foi utilizada para derivatização e análise segundo Lisec et al. (2006). Utilizou-se de cromatografia gasosa acoplada com espectrometria de massa.

Quantificação P inorgânico remanescente (Pi)

A quantificação do Pi remanescente na solução nutritiva foi feita segundo Ames (1966) modificado por (CHIOU et al., 2006). 300 μL da solução nutritiva foram misturados a 700 μL da solução de reação composta por uma parte de ácido ascórbico 10% e seis partes de

0,42% molibdato de amônia em 1N de ácido sulfúrico. Isso foi colocado em banho-maria por 30 min a 42°C e então lido em espectrofotômetro com absorbância a 820 nm.

Atividade de fosfatase ácida secretada (APase)

A atividade de APase foi determinada incubando de 1 g de raízes frescas em tubos falcon com 4ml de tampão MES 100mM, contendo pNPP a 10mM por 1h a 37°C. Ao final desse período adicionou-se 1 ml de NaOH 0.25M para parar a reação. Após agitação, pipetou-se 350µL para leitura em espectrofotômetro a 412 nm em metodologia adaptada de (RICHARDSON; HADOBAS; HAYES, 2000).

Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística pelo software RBio (BHERING, 2017) para análise de variância (ANOVA) e comparação de média pelo teste de Tukey a 5% de significância para todas as variáveis. Em seguida, as variáveis MSR, MSPA, APase e ácidos orgânicos foram submetidas à análise de agrupamento e de componentes principais (PCA) utilizando o software RBio e Minitab® 17 para elaboração dos gráficos.

5. RESULTADOS

Experimento I – Campo

Fertilidade do perfil de solo

Ao analisar a fertilidade do solo da entrelinha na instalação do experimento (Tabela 4), observa-se que o pH e a saturação por bases (V%) decaem com a profundidade, em contrapartida, a saturação por alumínio (m%) e a disponibilidade de enxofre (S) aumentam. Embora o V% na camada 0-30 cm esteja ideal, nas camadas inferiores ele está baixo. Além disso, a disponibilidade de P e K estão muito baixas; e de Mg estão baixas em todas as camadas, segundo os critérios do Boletim 100 para braquiária decumbens (WERNER et al., 1997)

Tabela 4. Análise de fertilidade do solo da entrelinha na instalação do experimento.

Camada (cm)	pH CaCl ₂	M.O g dm ⁻³	P resina mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al mmol _c dm ⁻³	Al	Soma bases	CTC	V %	m	S SO ₄ mg dm ⁻³
0 - 30	5,4	11,6	4,2	0,5	19,4	5,8	22,4	0,0	25,8	48	54	0	3,8
30 - 60	4,8	5,0	3,0	0,3	5,8	2,8	27,4	0,6	8,8	36	25	8	3,8
60 - 90	4,4	5,0	2,0	0,3	2,8	1,4	29,2	1,2	4,4	34	13	22	7,4

O sistema radicular

Para ambas as coletas, a MSR diminui abaixo dos 30 cm, contudo, não há diferença entre as duas camadas mais profundas provavelmente pela limitação química que ambas apresentavam ao crescimento radicular. Na instalação, havia mais raízes que na coleta final (Figura 3). Nenhuma diferença foi observada entre os parâmetros biométricos das raízes de braquiária decumbens ao final do experimento (Tabela 5).

Tabela 5. Parâmetros biométricos do sistema radicular de braquiária decumbens ao final do experimento.

Camada (cm)	Comprimento (C) cm	Área Superficial (AS) cm ²	Diâmetro Médio (DM) mm
0 - 30	1112	207	0,66
30 - 60	1567	294	0,61
60 - 90	1588	295	0,49

Figura 3. Matéria seca de raízes de braquiária (MSR) na instalação e na coleta final, em g.m^{-2} . As letras maiúsculas comparam entre as duas coletas de raízes e as minúsculas comparam a profundidade de amostragem dentro de cada coleta. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Matéria seca de parte aérea e total

A produção acumulada de MSPA de braquiária foi cerca de 7.000 kg.ha^{-1} e não diferiu entre os tratamentos (Figura 4). A coleta aos 194 dias após a implantação foi a que produziu

Figura 4. Produção acumulada de matéria seca de parte aérea de braquiária decumbens. maior quantidade de MSPA, embora não haja diferença entre tratamentos dentro de cada coleta (Figura 5).

Figura 5. Produção de matéria seca de parte aérea de braquiária decumbens aos 60, 137 e 194 dias após a instalação do experimento. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$) entre os tratamentos em uma determinada data de coleta.

Acúmulo e ciclagem de nutrientes

Analogamente à MSPA não houve diferença no total de nutrientes acumulados no período do experimento ou entre as três coletas (Tabela 6). Na média, a braquiária acumulou 127 kg de N, 11 kg de P, 143 kg de K, 32 kg de Ca, 33 kg de Mg e 8 kg de S por hectare ao longo de 194 dias de experimento. No entanto, o acúmulo de P na coleta de 60 dias e de K na coleta de 137 dias foram diferentes entre os tratamentos (Tabela 6).

Tabela 6. Acúmulo de nutrientes na parte aérea de braquiária nas coletas referentes aos dias 60, 137 e 194 após instalação e o acúmulo total ao final do ciclo.

Nutriente	Acúmulo de macronutrientes - kg de nutriente.ha ⁻¹															
	Testemunha				30 cm				60 cm				90 cm			
	60d	137d	194d	Total	60d	137d	194d	Total	60d	137d	194d	Total	60d	137d	194d	Total
N	24.4	28.1	47.6	100	37.9	28.3	59.9	126	30.1	26.7	94.0	151	38.2	32.4	59.8	130
P *	2.4	3.8	4.8	11.0	4.1	3.1	2.6	9.79	3.4	2.5	7.7	13.63	3.6	2.9	5.1	11.56
K *	44.2	65.6	66.2	176	44.8	28.8	26.8	100	33.9	28.2	87.1	149.1	54.6	33.9	58.9	147
Ca	9.5	24.1	14.7	48	8.0	5.8	6.1	20	6.1	6.5	18.5	31.1	9.3	7.8	11.9	29
Mg	7.6	20.4	12.4	40	8.6	7.0	9.5	25	7.0	7.8	22.2	37.0	9.3	7.9	11.9	29
S	1.6	3.4	3.2	8.2	3.0	2.0	2.0	6.9	2.7	1.9	5.7	10.2	2.2	1.8	3.8	7.8
Acúmulo de micronutrientes - g de nutriente.ha ⁻¹																
Cu	14.6	32.3	24.3	71	15.2	12.0	8.5	36	11.7	9.7	28.5	50	12.8	11.2	23.6	48
Fe	432	971	552	1956	219	166	273	657	153	203	963	1318	194	310	555	1060
Zn	65	144	123	332	77	72	77	226	59	71	224	353	82	88	134	305
Mn	84	137	107	328	58	36	36	131	49	44	140	233	72	54	88	214
B	13	84	24	121	20	14	8	42	18	7	27	52	21	29	22	72
Asteriscos	indicam	que	houve	diferença	significativa	nas	médias	pelo	teste	de	Tukey	(p	<	0.05).		

Aos 60 dias, a Testemunha acumulou menos P, enquanto o tratamento com P fornecido a 30 cm foi o que mais acumulou o nutriente (Figura 6P). Para o K, a testemunha acumulou maior quantidade do nutriente aos 137 dias (Figura 6K).

Figura 6. Acúmulo de fósforo (P) e potássio (K) em parte aérea de braquiária decumbens nas coletas aos 60, 137 e 194 dias após a instalação do experimento. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$) entre os tratamentos em uma determinada data de coleta.

Fracionamento do P do solo

Como esperado, observa-se uma clara redução nos teores de P com o aumento da profundidade (Tabela 7 e Suplementar 1). Para o tratamento com P aplicado a 30 cm, não foi verificado efeito residual da adubação entre a coleta inicial e final, já que, de modo geral, os teores de P diminuíram (Tabela 7). Não houve diferença estatística entre as coletas para cada fração isoladamente (Tabela S1). Se considerarmos os tratamentos onde aplicação de P foi feita a 60 cm e a 90 cm, observa-se aumento no P total entre a coleta inicial e final na camada

de aplicação (Tabela 7), fruto principalmente de um aumento na fração residual de P nessas camadas (Tabela Suplementar 1). Provavelmente esse resultado é devido ao efeito residual do fertilizante, já que nas camadas superiores (onde não foi aplicado P) isso não ocorreu. Embora tenha ocorrido aumento no P total, o P-lábil diminuiu no tratamento com P aplicado a 60 cm nessa camada (Tabela 7).

Tabela 7. Fracionamento de acordo com a labilidade do P do solo.

Camada	Coleta	Lábil	Mod. Lábil	Não lábil	Total
		P (mg.kg ⁻¹)			
P aplicado a 30 cm					
0 - 30 cm	Inicial	22.1 a	47.4 a	121.7 a	191.2 a
	Final	17.1 b	47.8 a	103.3 b	168.2 b
P aplicado a 60 cm					
0 - 30 cm	Inicial	19.4 a	57.6 a	106.5 b	183.6 a
	Final	16.8 b	53.3 a	112.6 a	182.7 a
30 - 60 cm	Inicial	18.9 a	38.0 a	93.5 b	150.4 b
	Final	15.6 b	38.7 a	106.4 a	160.8 a
P aplicado a 90 cm					
0 - 30 cm	Inicial	22.2 a	58.8 a	114.0 b	195.0 a
	Final	17.7 b	49.6 b	120.5 a	187.8 b
30 - 60 cm	Inicial	13.6 b	34.9 a	97.0 b	145.4 b
	Final	16.1 a	33.4 a	108.2 a	157.7 a
60 - 90 cm	Inicial	13.2 b	31.5 a	99.8 b	144.5 b
	Final	14.7 a	29.7 a	122.1 a	166.5 a

Letras diferentes representam diferenças significativas nas frações do P do solo pelo teste Tukey (p < 0.05) entre as coletas inicial e final de um dado tratamento.

Experimento II – Rizotron

A Figura 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos com o experimento II para a partição de biomassa da planta e acúmulo de P. Houve diferença entre os tratamentos no acúmulo de P e na produção de MSPA e total. É interessante notar que em todos os tratamentos, a primeira camada (0 – 30 cm) foi a que conteve a maior parte do sistema radicular das plantas, com destaque para a testemunha sem P. Além disso, a profundidade máxima do sistema radicular no tratamento onde havia P disponível em todo o perfil (T4) foi reduzida em relação aos outros tratamentos com P.

Figura 7. Esquema resumo dos principais resultados obtidos com o experimento II. Onde: MSPA, matéria seca de parte aérea; MSR, matéria seca de raízes. As áreas em cinza representam a presença de P na camada; os valores internos aos tubos, mostram a porcentagem de raízes em cada camada. O desenho das raízes representa a profundidade em que foram encontradas as raízes de cada tratamento na desmontagem do experimento. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Maiúsculas indicam diferenças entre camadas de um mesmo tratamento; minúsculas indicam diferenças entre a mesma camada de diferentes tratamentos; ns, não significativo.

Não houve diferença estatística entre os tratamentos na produção de MSR (Figura 8), mas houve diferença os parâmetros morfológicos comprimento específico, área superficial específica e diâmetro médio (Tabela 8). De modo geral, o DM das raízes foi constante ao longo do perfil e tanto CER como ASER não tiveram um padrão de resposta claro.

Tabela 8. Parâmetros biométricos médios de raízes de braquiária decumbens analisados pelo software WinRhizo.

Tratamento	Camada cm	CER cm.g ⁻¹		ASER cm ² .g ⁻¹		DM mm	
Controle	0 - 30	718	Aa	83	A	0.38	A
	30 - 80	1128	Aa	117	A	0.36	A
	80 - 130	-	Bc	-	Bc	-	B
	130 - 200	-	Bc	-	Bc	-	Bb
T1	0 - 30	502	Ba	54	B	0.36	A
	30 - 80	421	Bb	44	B	0.34	A
	80 - 130	830	Aa	90	A	0.34	A
	130 - 200	-	Cc	-	Cc	-	Bb
T2	0 - 30	536	a	72		0.40	
	30 - 80	579	ab	64		0.35	
	80 - 130	570	a	71		0.42	
	130 - 200	691	b	90	ab	0.43	a
T3	0 - 30	408	a	46		0.36	
	30 - 80	435	b	48		0.37	
	80 - 130	641	a	73		0.37	
	130 - 200	731	abc	85	ac	0.37	a
T4	0 - 30	219	Ba	26	B	0.37	A
	30 - 80	853	Aab	85	A	0.34	A
	80 - 130	753	Aa	89	A	0.39	A
	130 - 200	-	Cc	-	Cc	-	Bb
T5	0 - 30	554	Ba	57	B	0.33	
	30 - 80	799	Bab	75	B	0.31	
	80 - 130	528	Ba	57	B	0.36	
	130 - 200	1622	Aa	168	Aa	0.34	a
T6	0 - 30	623	Ba	59	A	0.30	A
	30 - 80	749	Aab	74	A	0.32	A
	80 - 130	738	Aa	82	A	0.37	A
	130 - 200	-	Cc	-	Bc	-	Bb

Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Maiúsculas indicam diferenças entre camadas de um mesmo tratamento; minúsculas indicam diferenças entre a mesma camada de diferentes tratamentos.

Figura 8. Produção de matéria seca de raízes (MSR) de braquiária decumbens.

A produção de MSPA foi menor na testemunha sem P e nos tratamentos T5 e T6 (Figura 9 MSPA), onde o nutriente estava somente em camadas mais profundas. A MS total seguiu padrão semelhante (Figura 9 MS total). Em ambos os casos, o tratamento 3 se destacou como o mais produtivo, com cerca de 55% mais biomassa que o tratamento controle.

Figura 9. Produção de matéria seca de parte aérea (MSPA) e matéria seca total (MS total) de braquiária decumbens. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Teor e acúmulo de nutrientes

Os teores de P, K e Ca e Mg nas folhas diferiram quanto aos tratamentos (Tabela 9). Para o P, os teores eram maiores nos tratamentos com fornecimento de P superficialmente (T1 a T4). No caso do K, o controle tinha maior concentração. Para Ca e Mg, T1 possuía maior teor.

Tabela 9. Teor de nutrientes na parte aérea de braquiária decumbens.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	g.g ⁻¹						mg.g ⁻¹				
Controle	8.1	0.8 b	17.6 a	3.7 ab	2.2 ab	1.0	3.0	186	26.3	88	14.0
T1	8.1	1.3 a	12.0 b	4.6 a	2.7 a	1.1	2.5	206	29.3	103	11.2
T2	8.4	1.4 a	17.1 a	3.7 ab	2.3 ab	1.1	3.0	219	28.8	101	8.8
T3	6.8	1.4 a	14.9 b	3.4 b	1.8 b	1.0	2.0	188	23.3	84	6.3
T4	7.4	1.5 a	14.4 b	3.7 ab	2.0 ab	0.9	3.5	196	26.8	98	11.2
T5	7.5	1.0 b	14.8 b	3.1 b	2.1 ab	1.1	3.3	192	27.3	74	7.0
T6	7.5	1.0 b	16.4 b	3.2 b	2.0 ab	1.2	3.3	185	27.3	73	10.3

Letras diferentes representam diferenças significativas no acúmulo dos nutrientes pelo teste Tukey ($p < 0.05$).

O acúmulo de nutrientes foi semelhante para os tratamentos, com exceção do P e K (Tabela 10). O acúmulo de P, foco deste projeto, foi maior nos tratamentos onde havia maior disponibilidade do elemento no perfil de solo (Figura 10P). É interessante notar que os tratamentos com maior disponibilidade P ao longo do perfil (T2, T3 e T4), acumularam mais P se comparados ao tratamento em que há mais P superficialmente (T1), embora este se aproxime mais da realidade encontrada no campo. Para o K, a tendência é similar (Figura 10K).

Tabela 10. Acúmulo de nutrientes na parte aérea de braquiária decumbens.

Tratamento	N	P*	K*	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	g.parcela ⁻¹						mg.parcela ⁻¹				
Controle	0,8	0,08	1,8	0,4	0,2	0,1	0,3	18,9	2,7	9,0	1,4
T1	1,1	0,17	1,5	0,6	0,4	0,1	0,3	27,2	4,0	14,1	1,3
T2	1,3	0,21	2,6	0,6	0,4	0,2	0,5	33,2	4,4	15,2	1,3
T3	1,2	0,25	2,7	0,6	0,3	0,2	0,4	33,9	4,3	15,5	1,2
T4	1,1	0,21	2,1	0,5	0,3	0,1	0,5	29,0	3,9	14,3	1,6
T5	0,8	0,11	1,6	0,3	0,2	0,1	0,4	21,0	3,0	8,0	0,8
T6	0,8	0,10	1,7	0,3	0,2	0,1	0,4	19,4	2,8	7,6	1,1

Asteriscos indicam que houve diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Figura 10. Acúmulo de fósforo (P) e potássio (K) na parte aérea de braquiária decumbens. Letras diferentes representam diferenças significativas no acúmulo dos nutrientes pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Índices de eficiência de absorção e uso do P

A eficiência de absorção do P (EAP) foi maior nos tratamentos em que havia P já nas

Figura 11. Eficiência de absorção de P (EAP) em gP.gMSR^{-1} . Letras diferentes representam diferenças significativas no acúmulo dos nutrientes pelo teste Tukey ($p < 0.05$).

primeiras camadas do perfil (Figura 11).

Quanto a eficiência de uso de P (EUP), ela foi maior nos tratamentos em que havia menos P disponível (Testemunha, T5 e T6), tanto para a produção de parte aérea como de MS total (Figura 12).

Figura 12. Eficiência de uso do P para a produção de matéria seca de parte aérea (EUPPA) e matéria seca total (EUPMS). Letras diferentes representam diferenças significativas no acúmulo dos nutrientes pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fracionamento do P do solo e ciclagem de P

De modo geral, os teores de P-lábil e P-mod aumentaram onde foi aplicado P, seja em relação ao tratamento controle ou às mesmas camadas dos tratamentos que não receberam P (Figuras 13 e 14). O mesmo é válido para o P-total (Figura 16). O aumento na RTA e bicarbonato inorgânico contribuíram para o aumento do P-lábil; enquanto o NaOH 0,1M foi responsável pela diferença no P-mod (Tabela Suplementar 2). Embora o P-não lábil não tenha variado entre os tratamentos nas duas camadas mais inferiores, os tratamentos que receberam P nas duas camadas mais superficiais (T1, T2, T3 e T4) obtiveram maiores teores dessa fração nessas camadas (Figura 15).

Figura13. Acúmulo de P e P-lábil do solo. As áreas em cinza representam a presença de P na camada. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Maiúsculas indicam diferenças entre camadas de um mesmo tratamento; minúsculas indicam diferenças entre a mesma camada de diferentes tratamentos.

Figura 14. Acúmulo de P e P-moderadamente lábil do solo. As áreas em cinza representam a presença de P na camada. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Maiúsculas indicam diferenças entre camadas de um mesmo tratamento; minúsculas indicam diferenças entre a mesma camada de diferentes tratamentos.

Figura 15. Acúmulo de P e P-não lábil do solo. As áreas em cinza representam a presença de P na camada. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Maiúsculas indicam diferenças entre camadas de um mesmo tratamento; minúsculas indicam diferenças entre a mesma camada de diferentes tratamentos.

Figura 16. Acúmulo de P e P-total do solo. As áreas em cinza representam a presença de P na camada. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Maiúsculas indicam diferenças entre camadas de um mesmo tratamento; minúsculas indicam diferenças entre a mesma camada de diferentes tratamentos.

Ao submeter as variáveis do fracionamento (P-lábil, P-mod, P-não lábil e P-total) e a MSR à análise de agrupamento, observamos que, as camadas que receberam P tiveram comportamento semelhante, independente do tratamento. O mesmo é válido para as camadas que não receberam P (Figura 17).

Figura 17. Análise de agrupamento, ligação por médias e distância de Pearson. Cores distintas indicam agrupamentos diferentes.

Análise de componentes principais (PCA)

A PCA para MSR, MSPA, acúmulo de P e fracionamento do P do solo estão apresentadas na Figura 18. O primeiro (PC1) e segundo (PC2) componentes explicaram 47.0% e 27.2% da variação total, respectivamente (Figura 18 A e B).

Os tratamentos e distribuição das variáveis ao longo do PC1 revelam uma separação entre os tratamentos T2, T3 e T4 do tratamento controle (Figura 18A). No caso dos tratamentos, essa separação foi determinada principalmente pela MSPA e acúmulo de P, além frações lábeis e moderadamente lábeis de P nas camadas 0-30 cm e 30-80 cm (Figura 18B). Essas correlações positivas evidenciam a maior ciclagem de P via maior MSPA e acúmulo do elemento, de acordo com a disponibilidade de P até 80 cm de profundidade. Por sua vez, o controle diferiu pela fração P-não lábil das últimas duas camadas (Figura 18B).

Figura 18. Análise de componentes principais (PCA) para os 7 tratamentos (controle + seis). A análise foi feita pela matriz de correlação das médias das variáveis dos tratamentos. Números em parêntesis indicam a porcentagem de variação explicada pelo primeiro (PC1) e segundo (PC2) componentes principais. A, refere-se ao score plot da distribuição dos 7 tratamentos analisados; B, refere-se ao loading plot dos parâmetros analisados (MSR, MSPA, acúmulo de P, P-lábil, P-mod, P-não lábil e P-total).

Quanto ao PC2, T4 e T6 foram alocados em direção oposta aos demais tratamentos (Figura 18A), devido as variações nas frações de P-lábil e P-mod das duas últimas camadas desses dois tratamentos. Os demais foram dispostos opostamente a T4 e T6 graças à fração não lábil das camadas de 0-30 cm e 30-80 cm.

Correlação de Pearson e integração de parâmetros via análise de rede

Os coeficientes (r) da correlação de Pearson foram calculados para verificar o grau de associação das variáveis relacionadas à ciclagem de P (Figura Suplementar 1). Esses coeficientes foram então integrados em uma rede de correlações (Figura 19).

Figura 19. Rede de correlações baseadas no coeficiente de Pearson das médias das variáveis analisadas dos 7 tratamentos (controle + seis). As variáveis relacionadas à produção de biomassa estão na cor verde. O acúmulo de P na cor laranja. As frações de P do solo em tons de azul.

O acúmulo de P e a produção de MSPA correlacionaram positivamente com a disponibilidade de P até 80 cm de profundidade (Figura 19; Figura Suplementar 1). Houve uma alta correlação ($r = 0.97$) entre MSPA e acúmulo de P (Figura Suplementar 1). Por sua vez, essas duas variáveis apresentaram alta correlação ($r > 0.8$) com as frações lábeis e moderadamente lábeis de P nas camadas de 0-30 cm e 30-80 cm (Figura Suplementar 1), demonstrando que a ciclagem de P é dependente de uma maior disponibilidade de P no solo.

É interessante notar que em todas as quatro camadas - 0-30 cm, 30-80 cm, 80-130 cm e 130-200 cm – o P-lábil sempre apresentou alta correlação com o P-mod e vice-versa (Figura 19; Figura Suplementar 1). Isso demonstra a dinâmica de equilíbrio entre essas duas frações

de P, quando há mais P-lábil, a fração moderadamente lábil é “alimentada” com P e também aumenta.

Experimento III - Hidroponia

As plântulas de braquiária ruziziensis tinham maior comprimento total de raízes na instalação do experimento III (Tabela 11).

Tabela 11. Parâmetros biométricos do sistema radicular das plântulas utilizadas no experimento.

Espécie	Comprimento (C)	Área Superficial (AS)	Diâmetro Médio
	cm	cm ²	mm
Braquiária brizanta	55,7 b	6,5	0,36
Braquiária decumbens	58,4 b	5,7	0,32
Braquiária ruziziensis	80,2 a	9,5	0,37

Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A produção de MS total e de PA não diferiram quanto ao nível de P, apenas entre as espécies de braquiária, sendo a braquiária ruziziensis a que apresentou maior massa. Por outro lado, a MSR foi diferente para cada espécie e nível de P. Observa-se que nos níveis mais baixos de P (10 e 25%) a braquiária ruziziensis apresentava maior produção de MSR, mas conforme os P disponível aumentou, a braquiária brizanta apresentou maior MSR (Figura 20).

Figura 20. Produção de matéria seca total, de parte aérea e de raízes das braquiárias brizanta, decumbens e ruziziensis. As letras maiúsculas comparam os níveis de fósforo na solução e as minúsculas as espécies de braquiária. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A concentração de Pi remanescente na solução aumentou conforme os níveis de P e os maiores valores foram obtidos nas parcelas cultivadas com braquiária brizanta (Figura 21).

Figura 21. Concentração de fósforo inorgânico (Pi) remanescente na solução ao término do experimento. As letras maiúsculas comparam os níveis de fósforo na solução e as minúsculas as espécies de braquiária. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A atividade de fosfatase ácida nas raízes (APase) variou de acordo com a espécie e o nível de P, a braquiária decumbens foi a espécie que propiciou maior atividade de APase (Figura 22).

Figura 22. Atividade da enzima fosfatase ácida nas raízes da braquiárias. As letras maiúsculas comparam os níveis de fósforo na solução e as minúsculas as espécies de braquiária. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

O perfil de distribuição de ácidos orgânicos exsudados pelas raízes é diverso e varia em intensidade de acordo com a espécie de braquiária e o nível de P. Só foram encontradas diferenças significativas entre médias para os ácidos fumárico, glutâmico, nicotínico e succínico. Embora não tenha apresentado diferença estatística entre espécies ou níveis de P, o ácido piroglutâmico foi o mais exsudado pelas três espécies de braquiária (Tabela 12).

Tabela 12. Ácidos orgânicos exsudados pelas raízes de braquiária em equivalente de ribitol por ml.

Ácidos - (e.r/ml) x 1000	B. brizanta				B. decumbens				B. ruzizensis			
	10	25	50	100	10	25	50	100	10	25	50	100
4-hidroxi-benzóico	29	37	40	14	8	4	5	5	9	43	5	3
Aspártico	81	121	319	42	20	18	28	46	76	75	87	n.d
Benzóico	61	79	98	22	16	13	17	15	18	88	14	31
Fumárico *	60	43	57	13	7	5	5	7	9	35	4	4
Glutâmico *	493	746	1700	276	4	n.d.	4	2	n.d	n.d	3	1
Glicólico	63	79	94	24	26	13	15	15	20	84	13	n.d
Málico	19	28	144	7	4	4	4	93	7	39	3	n.d
Nicotínico *	20	22	26	6	5	3	n.d	6	6	23	2	n.d
Fosfórico	65	86	124	46	25	22	24	48	49	151	28	1170
Piroglutâmico	671	1193	1846	199	128	62	144	149	401	549	642	n.d
Pirúvico	81	126	167	16	18	9	13	24	12	76	20	5
Succínico *	22	33	34	14	12	8	11	11	24	99	14	2

Asteriscos indicam diferença significativa entre médias pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

De modo geral, a braquiária brizanta exsudou mais os ácidos fumárico, glutâmico e nicotínico nos três níveis de baixo P (10, 25 e 50%), sendo superior às outras duas espécies nesse parâmetro. No entanto, a braquiária ruzizensis sob 25% de disponibilidade de P apresentou grande exsudação dos ácidos fumárico, nicotínico e succínico (Figura 23).

Figura 23. Concentração de ácidos orgânicos na solução aquosa, em equivalente de ribitol. ml^{-1} . As letras maiúsculas comparam os níveis de fósforo na solução e as minúsculas as espécies de braquiária. Letras diferentes representam diferenças significativas pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Análise de agrupamento e componentes principais

De maneira geral, a PCA permitiu observar quais tratamentos apresentaram características similares em função das variáveis analisadas, enquanto a análise de agrupamento possibilitou a formação de grupos com base na similaridade dos tratamentos. Essas duas análises multivariadas apresentaram resultados similares.

A análise de agrupamento revela que dentre as espécies avaliadas, a braquiária brizanta apresenta comportamento distinto das outras duas, sendo agrupada separadamente das demais (Figura 24). 4 grupos com 70% de similaridade foram formados: (i) um grupo contendo braquiária brizanta nos níveis de 10% e 25% de P; (ii) um grande grupo com braquiária decumbens e ruziziensis nos 4 níveis de P; e mais dois grupos contendo, individualmente, braquiária brizanta sob (iii) 50% e (iv) 100% de P (Figura 24).

Figura 24. Dendrograma da análise de agrupamento considerando as médias variáveis MSR, MSPA, P inorgânico remanescente, APase e ácidos orgânicos. A linha vermelha representa o grau de similaridade utilizado para definir os grupos (70%). Abreviações: B, braquiária brizanta; D, braquiária decumbens; R, braquiária. ruzizensis; os números que seguem as letras representam a porcentagem de P disponível – 10%, 25%, 50% e 100%.

Os componentes 1 e 2 da análise de PCA explicaram 47.6% e 23.8% da variância total, respectivamente (Figura 25 A e B). Ao longo do PC1 verifica-se que a exsudação dos ácidos nicotínico, fumárico e glutâmico, tiveram maior peso para a separação das de braquiária brizanta a 10%, 25% e 50% do grupo representado por braquiária decumbens e braquiária ruzizensis, cuja disposição ao longo do PC1 foi correlacionada com a atividade de APase (Figura 25 A e B). Isso evidencia os resultados mostrados anteriormente em que a espécie de braquiária brizanta foi a que menos produziu APase (Figura 22) e a que mais exsudou ácidos orgânicos (Figura 23).

Observa-se a separação entre braquiária brizanta a 100% de P e braquiária ruzizensis a 25% de P ao longo do componente 2 (Figura 25A). Enquanto a primeira se correlacionou positivamente com o P inorgânico remanescente na solução ao término do experimento, a disposição da segunda correlacionou com a MSPA e exsudação de ácido succínico (Figura 25B).

Figura 25. Análise de componentes principais (PCA) para as 3 espécies de braquiária e 4 níveis de disponibilidade de P. A análise foi feita pela matriz de correlação das médias das variáveis dos tratamentos. Números em parêntesis indicam a porcentagem de variação explicada pelo primeiro (PC1) e segundo (PC2) componentes principais. II, refere-se ao score plot da distribuição dos 7 tratamentos analisados; III, refere-se ao loading plot dos parâmetros analisados (MSR, MSPA, P inorgânico remanescente, APase e ácidos orgânicos).

6. DISCUSSÃO

Experimento I – Campo

A redução na biomassa de raízes em profundidade (Figura 3) pode ser resultado, dentre outros fatores, da menor disponibilidade de nutrientes e maior saturação por Al (m%) nas camadas inferiores do perfil do solo (Tabela 4). Os níveis de m% encontrados são elevados, o que causa dano ao desenvolvimento radicular (MAGALHAES et al., 2018). Mesmo sendo tolerante ao Al (ARROYAVE et al., 2013), a exposição ao mesmo reduz a MSR de braquiária decumbens em relação ao controle sem Al (FURLAN et al., 2018). A frequência dos cortes de parte aérea pode ter influenciado nas diferenças encontrada entre a coleta inicial e final, pois o último corte havia sido feito cerca de 90 dias antes da instalação do experimento e, durante a condução do ensaio, foram realizados três cortes com a frequência média de 64 dias. Essa frequência mais alta representa menor área fotossinteticamente ativa e maior estresse à planta, por consequência, menos fotoassimilados são direcionados à raiz, levando a redução de biomassa da mesma (DA CUNHA et al., 2010). Outro fator a se considerar é a época do ano da realização das coletas. Enquanto a coleta inicial foi realizada na primavera, com crescente temperatura; a coleta final foi realizada no outono, onde as temperaturas já estavam menores (Figura 1) e isso poderia reduzir a MSR.

O acúmulo de MSPA, cerca de $7.000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, está em conformidade com os valores disponíveis na literatura para braquiária decumbens (DO VALLE et al., 2011) e outras braquiárias (BERNARDES et al., 2010; DA COSTA et al., 2016; MIGUEL et al., 2018). A precipitação crescente próxima a 2ª coleta e a precipitação acumulada de 330 mm entre a 2ª e 3ª coleta (Figura 1) podem ter contribuído para a maior produção de MSPA na coleta final, pois havia água em abundância no solo para o desenvolvimento da planta.

Como a braquiária decumbens é eficiente no uso do P (KANNO; MACEDO; BONO, 1999; RAO; AYARZA; GARCIA, 1995), a dose aplicada pode não ter sido suficiente para causar efeito sobre os tratamentos ao longo do experimento, o que pode ser verificado pela uniformidade da MSPA acumulada entre os tratamentos (Figura 4) e pela redução, em geral, do P-lábil (Tabela 7). Era esperado algum aumento nas frações que compõe o P-lábil (RTA, e bicarbonato) caso a dose fosse superior a demanda, mas isso não ocorreu (Tabela Suplementar 1). Uma possível explicação é o tempo de avaliação do fracionamento do P do solo, visto que no presente experimento o intervalo entre as coletas para avaliação foi de 194 dias, impossibilitando a verificação de efeitos mais imediatos no fracionamento de P. Isso fica mais evidente, pelo fato de o acúmulo de P ter sido alterado apenas na primeira coleta (Figura 6P),

não havendo diferenças no acúmulo total de P ao longo do experimento (Tabela 6). FOLTRAN et al. (2019) estudando a dinâmica das frações de P do solo em plantações de eucalipto, verificaram aumento nas frações mais lábeis nos primeiros 30 dias de experimento, com aplicação de P; contudo, nas avaliações seguintes até 180 dias os autores observaram reduções nessas frações. O mesmo pode ter ocorrido nesse ensaio. O Al, abundante em subsuperfície, também pode ter diminuído a biodisponibilidade de parte do P fornecido, como pode ser verificado pela elevação dos teores de P não lábil nos tratamentos com fornecimento a 60 e 90 cm (Tabela 7), o que também reduziria seu efeito sobre os tratamentos, pois ao ligar-se com Al o P fica indisponível à planta (RODRIGUES et al., 2016).

Além disso, o solo da entrelinha do cafezal é limitado quimicamente (Tabela 4), fazendo com que outros nutrientes além do P e o já citado m% possam limitar o desenvolvimento da braquiária. Segundo as recomendações para adubação e correção de solo para braquiária decumbens do Boletim 100-IAC (WERNER et al., 1997) os teores de P e K disponíveis em todas as camadas podem ser considerados “muito baixos” e os de Mg, “baixos”; embora o V% na camada 0-30 cm e o S na camada 60-90 cm estejam em teores médios (Tabela 4). Ressalta-se que todo manejo de adubação e correção das lavouras cafeeiras é direcionado às linhas de café, poucas são as intervenções na entrelinha após a instalação da lavoura. Portanto, a análise química da Tabela 4 representa – salvo alguns sistemas de manejo específicos - a fertilidade disponível para o desenvolvimento da braquiária consorciada com o cafeeiro. SERRÃO & SIMÃO-NETO (1971) observaram redução significativa na biomassa de braquiária decumbens com disponibilidade muito baixa de K e P, embora Mg e S em teor baixo não tenham diferido do tratamento completo. Os mesmos autores verificaram redução de mais de quatro vezes quando a disponibilidade de todos os nutrientes (com exceção do Ca) era baixa.

Segundo ALMEIDA & ROSOLEM (2016) a braquiária consegue absorver P de frações moderadamente lábeis, aumentando as frações lábeis do solo após seu cultivo, o que não foi observado no presente estudo. A análise do fracionamento do P indica que ocorreu aumento do P total quando o elemento foi aplicado a 60 cm e 90 cm, o que não refletiu em aumento das frações lábeis (Tabela 7 e Suplementar 1), outro indicativo que a quantidade de P adicionada não supriu a demanda da planta e, portanto, mais P teve que ser absorvido do solo, o que reduziria a fração lábil. É possível também, que devido a menor massa de raízes em profundidade, menos P tenha sido absorvido inicialmente, enquanto na forma lábil e tenha, gradativamente, tornando-se indisponível, já que a fração moderadamente lábil permaneceu sem alterações (Tabela 7). ALMEIDA et al., (2018) relataram redução na disponibilidade de P

após cultivo de braquiária *ruziziensis* em rotação com soja, independentemente da dose de P aplicada inicialmente.

A redução dos teores de P em profundidade está em conformidade com a literatura (BRADY; WEIL, 2013; OBERSON et al., 1999). Ao avaliar o P-total até 1 m de profundidade, OBERSON et al. (1999) relataram valores semelhantes aos obtidos no presente estudo quanto à redução da quantidade de P, em áreas de savana, de pastagem de gramíneas e em pastagens consorciadas entre gramíneas e leguminosas.

As etapas aqui discutidas são relacionadas à mobilização e absorção do P do solo e acúmulo pela planta, mas a ciclagem de P compreende, ainda, o retorno desse elemento ao sistema, via decomposição e mineralização dos resíduos de braquiária. Nem todo o P acumulado na parte aérea de braquiária ficaria disponível em curto prazo ou coincidiria com os estágios de maior demanda do cafeeiro. O tempo de meia vida, ou seja, o tempo, em dias, que leva para metade do P ser liberado dos resíduos é uma forma de se avaliar a liberação do nutriente. Isso depende dos teores de lignina e relação C/N do material (CARDOSO; ANDREOTE, 2016), mas segundo (DA COSTA et al., 2016), em 20 dias metade do P é liberado dos resíduos e dentro de seis meses 90% de todo o elemento é liberado (COSTA et al., 2014). Assim, se levados em conta esses valores e a Tabela 10, na média, entre 1 e 2 kg.ha⁻¹ de P seriam liberados nos primeiros seis meses após cada ceifa de braquiária e estaria disponível para absorção pelo cafeeiro.

Conclusões do experimento

O maior acúmulo de P na primeira coleta de todas as parcelas adubadas em relação ao tratamento controle mostra que a ciclagem de P em profundidade de fato ocorreu, mas aparentemente não houve efeito de solubilização de frações menos lábeis do nutriente pela braquiária decumbens ao longo do período do experimento.

Isso pode ser resultado do intervalo de tempo entre avaliações (muito longo no caso do fracionamento do P) ou fruto de uma quantidade insuficiente de P fornecida, de interações do P com outros elementos e com a própria matriz do solo. Além disso, embora a braquiária decumbens seja tolerante a solos ácidos e teores elevados de Al, a baixa disponibilidade de nutrientes (K e Mg) e alta saturação por Al no solo da entrelinha podem ter sido limitantes ao seu desenvolvimento e acúmulo de biomassa e isso limitou a ciclagem de P também.

Experimento II – Rizotron

A maior concentração de raízes na camada mais superficial e a distribuição decrescente com a profundidade para todos os tratamentos (Figura 7) é bem relatada na literatura (DA CUNHA et al., 2010; KANNO et al., 1999; SHIRAISHI et al., 2007). Isso é resultado de uma soma de fatores, desde a baixa disponibilidade de P nos tratamentos em que o elemento não foi adicionado nas camadas superficiais (TC, T5 e T6); até uma menor disponibilidade de oxigênio em profundidade para todos os tratamentos. A alta disponibilidade de P em todo o perfil (T4) fez com que a braquiária explorasse menos o perfil do solo em busca do elemento, reduzindo sua profundidade máxima (Figura 7). Entretanto, isso não se refletiu em diferenças na biomassa de raízes, nem nos parâmetros biométricos das raízes (Figura 7, 8 e Tabela 8). Isso pode ser resultado de uma maior variabilidade dos dados de MSR, como já observado por DA CUNHA et al. (2010) ou ainda da manutenção do crescimento de raízes de braquiária mesmo em baixa fertilidade (RAO; KERRIDGE; MACEDO, 1996). Visualmente e numericamente as diferenças são grandes, principalmente em relação ao tratamento controle, que além da menor MSR, atingiu a menor profundidade do sistema radicular pela limitação de P (Figura 7, 8). Não houve um padrão claro de resposta dos parâmetros morfológicos do sistema radicular quanto à disponibilidade de P ou a profundidade no perfil (Tabela 8). Eram esperados maiores valores de CER em condições de menor fertilidade (OSTONEN et al., 2007), contudo, o mesmo não foi verificado. Da mesma maneira, uma maior ASER era esperada nas camadas com baixa disponibilidade de P, fruto de uma maior produção de pelos radiculares na falta de P (LAMBERS et al., 2006), o que não se confirmou. A variabilidade dos dados de morfologia radicular é alta, ainda mais por se basear em uma sub-amostra, portanto, isso deve ter contribuído para a ausência dessas respostas.

A maior disponibilidade de P superficialmente proporcionou uma maior absorção do elemento, o que se refletiu em um maior teor de P na parte aérea e maior produção de MSPA e MS (Figuras 7 e 9). Como consequência dessa maior produção de biomassa, os tratamentos de 1 a 4 foram os que acumularam mais P e K na parte aérea (Figura 10). Como o fornecimento de K foi igual para todos os tratamentos, isso é resultado de um efeito positivo da disponibilidade de P sobre a produção de biomassa e o acúmulo desse elemento, como relatado por Fageria et al. (1995) para diversas culturas. Contudo, a maior produção de biomassa pode ter causado o efeito da diluição dos teores de Ca e Mg, pois a disponibilidade dos mesmos era igual para todos os tratamentos.

Esses mesmos tratamentos (1 a 4) foram ao menos 50% mais eficientes na absorção de P (Figura 11). Analogamente, braquiária decumbens e brizanta apresentaram cerca de 30%

mais EAP recebendo 200 kg.ha^{-1} de P em relação às parcelas que receberam 25 kg.ha^{-1} (KANNO; MACEDO; BONO, 1999). Entretanto, isso refletiu em menor eficiência de uso do P, índices EUPPA e EUPMS (Figura 12). Nesse caso, o tratamento controle, seguido de T5 e T6 foram os mais eficientes no uso de P. Esse comportamento é comumente encontrado na literatura (KANNO et al., 1999; KANNO; MACEDO; BONO, 1999; NANAMORI et al., 2004; SYERS; JOHNSTON; CURTIN, 2008). Desde que não haja deficiência, as plantas são mais eficientes em utilizar nutrientes quando há menor disponibilidade deles. Em outras palavras: fazem mais biomassa, com a mesma quantidade de P absorvido.

O fracionamento do P (Figuras 13 a 16) e a análise de agrupamento para as frações de P e MSR (Figura 17) indicaram que, considerando uma mesma profundidade, as camadas que receberam P se comportaram de maneira semelhante independentemente do tratamento. O mesmo comportamento é válido para onde não foi aplicado P. Portanto, o efeito predominante sobre cada camada é resultado do fornecimento do nutriente em si e não da presença da braquiária.

É interessante notar que a alta correlação positiva existente entre o P lábil e moderadamente lábil em todas as camadas (Figura 19 e Suplementar 1) é fruto de uma adsorção preferencial do P do fertilizante e de uma dinâmica temporal existente entre essas duas frações. O P adicionado via fertilizante fosfatado solúvel (como o superfosfato triplo) é preferencialmente adsorvido à fração lábil e moderadamente lábil, sendo que ao longo do tempo, o P-mod alimenta lentamente a fração lábil (FOLTRAN et al., 2019). Isso fica evidente quando se observa que a adição de P alterou as frações lábeis e moderadamente lábeis, sem variação no P-não lábil (Figuras 13 a 16; Tabela Suplementar 2). O mesmo efeito foi observado por FOLTRAN et al. (2019) em experimento com fontes de fosfato em eucalipto.

A análise de rede e PCA (Figuras 18 e 19 e Figura Suplementar 1) revelam uma alta correlação positiva entre produção de MSPA e acúmulo de P com as frações lábeis e moderadamente lábeis do elemento até 80 cm de profundidade. Os tratamentos mais produtivos e com maior acúmulo de P (T2, T3 e T4) tinham mais P disponível até os 80 cm de profundidade. O aumento na produção de biomassa com a disponibilidade de P é bem relatado (CAMACHO; SILVEIRA; SILVEIRA, 2015; LOUW-GAUME et al., 2010; MERLIN; ROSOLEM; HE, 2016). Como geralmente a maior disponibilidade de P resulta em mais MSPA e aumento na concentração de P nos tecidos (LOUW-GAUME et al., 2010; MERLIN; ROSOLEM; HE, 2016), a ciclagem de P também foi maior. Também, maiores valores de P-lábil e P-mod nas camadas de 80-130cm e 130-200 cm e ausência de raízes na última camada, separaram os tratamentos 4 e 6 dos demais ao longo do PC2 (Figura 18).

Ambos foram os únicos tratamentos com P nas duas últimas camadas, o que explicaria o aumento relativo das frações de P. Quanto às raízes, se no primeiro caso, T4, a abundância de P superficialmente pode ter reduzido a exploração do perfil; no T6, a ausência de P superficialmente pode ter feito o mesmo, como aconteceu com o controle.

Conclusões do experimento

Os resultados do experimento II mostram a correlação positiva entre a maior disponibilidade de P superficialmente - mais especificamente as frações lábeis e moderadamente lábeis - sobre a produção de biomassa vegetal e a ciclagem de P. Contudo, eficiência de uso de nutrientes, menores níveis de P proporcionaram uso mais eficiente. Embora, a absorção fosse mais eficiente conforme maior disponibilidade.

Ressalta-se que o comportamento das frações de P em cada camada do perfil do solo em relação ao tratamento controle foram resultado do fornecimento do P e não do efeito das raízes de braquiária sobre elas. Ao adicionar P na forma de fertilizantes solúveis, há aumento nas frações lábeis e moderadamente lábeis, sendo que essas duas tem forte correlação positiva entre si.

Como consequência prática, os resultados indicam que a adição de P em profundidade, embora possa reduzir a eficiência de uso do P, pode ser benéfica à produção de biomassa vegetal (parte aérea e raízes) e à ciclagem de P até certo ponto, pois esses parâmetros tiveram alta correlação com a disponibilidade de P somente até 80 cm e não houve diferença entre os tratamentos que receberam P até 80 cm (T2), 130 cm (T3) e 200 cm (T4) de profundidade para esses parâmetros.

Experimento III – Hidroponia

Embora possam haver diferenças interespecíficas e entre cultivares de uma mesma espécie, as braquiárias têm baixa exigência interna de P se comparadas com outras gramíneas (NANAMORI et al., 2004). De modo geral, essa alta eficiência das braquiárias em utilizar o P, proporcionou que não houvesse diferenças entre os níveis do elemento no acúmulo de MS total. Isso pode estar ligada à reciclagem interna de compostos orgânicos de P pelas braquiárias (NANAMORI et al., 2004).

Dentre as espécies avaliadas, a braquiária brizanta cv. Marandú é a mais exigente em fertilidade (DO VALLE et al., 2011; MILES et al., 1996, 2004) e necessita de mais P disponível para seu desenvolvimento (RAO; KERRIDGE; MACEDO, 1996). Por esse motivo ela foi mais responsiva ao aumento da concentração de P, aumentando sua biomassa de raízes

(Figura 17). Esse comportamento também foi observado por Kanno et al. (1999) ao comparar a braquiária brizanta e braquiária decumbens em dois níveis de fertilidade. Por outro lado, a braquiária decumbens cv. Basilisk é conhecidamente adaptada às condições de baixa fertilidade (DO VALLE et al., 2011; RAO; KERRIDGE; MACEDO, 1996) e foi pouco responsiva ao aumento da disponibilidade de P na produção de biomassa (Figura 20).

A braquiária ruziziensis foi a mais produtiva nos 4 níveis de P, destacando-se nos níveis mais baixos de disponibilidade do elemento, 10 e 25% (Figura 20). SERRÃO & SIMÃO-NETO (1971) observaram comportamento semelhante ao comparar a resposta de braquiária decumbens e braquiária ruziziensis à adição de fertilizantes e correção de solo. Os autores verificaram maior produção de MSPA de braquiária ruziziensis no tratamento sem P. Embora se trate de um experimento de campo, as condições de fertilidade testadas são semelhantes às do presente estudo: havia disponibilidade de todos os nutrientes em níveis adequados, com exceção do P. HAEUSSLER et al. (2006) relataram que braquiária ruziziensis se desenvolveu melhor que braquiária dictyoneura (*U. dictyoneura*) tanto em condições de baixa, como de alta fertilidade. Os autores atribuem tal fato a uma maior eficiência de uso de nutrientes pela espécie, o que garantiria seu rápido estabelecimento. No presente estudo, o melhor desempenho geral de braquiária ruziziensis pode estar relacionado ao seu maior comprimento de raízes no momento da instalação, que teria propiciado um desenvolvimento mais acelerado e maior absorção de P, além de uma produção intermediária de ácidos orgânicos e APase se comparadas às outras duas espécies (Figura 19 e Tabela 11).

O aumento da atividade de APase e exsudação de ácidos orgânicos é uma resposta de plantas à baixa disponibilidade de P (NANAMORI et al., 2004). Embora não tenha sido observada a tendência geral de aumento na atividade de APase ou exsudação de ácidos orgânicos conforme se diminuía a disponibilidade de P, diferenças no comportamento das espécies foi observada (Figura e 23; Tabela 12). Esses dois grupos de variáveis – APase e ácidos orgânicos – também foram determinantes na PCA pois definiram a disposição das espécies braquiária decumbens e braquiária ruziziensis separadas da braquiária brizanta ao longo do componente 1 (Figuras 24 e 25).

Os grupos formados pela análise de agrupamento (Figura 24) e PCA (Figura 25) são condizentes, pois dentre as espécies avaliadas, a braquiária brizanta cv. Marandú seria distinta das outras duas por sua maior exigência em disponibilidade de P para seu desenvolvimento (RAO; KERRIDGE; MACEDO, 1996). Braquiária decumbens e ruziziensis ocupam nichos semelhantes em sua origem, sendo que a segunda ocupa preferencialmente áreas mais férteis

(DO VALLE et al., 2011) e tem baixa tolerância à solos ácidos e com saturação por Al (DO VALLE et al., 2011; MILES et al., 2004).

A maior atividade de APase foi encontrada nas parcelas com braquiária decumbens, seguida de braquiária ruziziensis (Figura 22). Em comparação com braquiária brizanta, braquiária decumbens foi a que exsudou mais APase em suas raízes, mesmo em níveis de maior disponibilidade de P (LI et al., 1997). Isso se deve ao fato de essa espécie ser mais adaptada às condições de baixa fertilidade (DO VALLE et al., 2011; LI et al., 1997; RAO; KERRIDGE; MACEDO, 1996).

A braquiária ruziziensis apresentou maior exsudação dos ácidos orgânicos fumárico, nicotínico e succínico nos 3 níveis de menor disponibilidade de P em relação ao 100% (Figura 23). Na escala de exigência de fertilidade ela seria a segunda entre as três espécies avaliadas, portanto, essa exsudação seria a resposta à baixa disponibilidade do P. Além da maior exsudação de ácidos orgânicos, a espécie de braquiária brizanta aparenta exsudar mais ácidos nos níveis de menor disponibilidade de P (10%, 25% e 50%) (Figura 23), contudo, a grande variabilidade dos dados de exsudação de ácidos orgânicos não permitiu verificar diferenças significativas nessa variável. Essa maior exsudação por parte da braquiária brizanta pode estar relacionada à maior exigência em disponibilidade de P dessa espécie, o que faria com que ela exsudasse mais ácidos frente à baixa disponibilidade do elemento em solução. Desse modo, as outras duas espécies, menos exigentes, exsudariam menos compostos em suas raízes, pois tem menor exigência de P disponível.

De qualquer maneira, se sabe que existem diferenças inter e intraespecíficas, além de diferenças entre cultivares de uma mesma espécie quanto às características agronômicas e resposta ao baixo P (MILES et al., 2004; NGUYEN et al., 2019). Isso pode contribuir para os padrões de resposta encontrados no presente trabalho. NGUYEN et al. (2019) estudando as respostas de genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtiveram resposta parecidas quanto a exsudação de ácidos orgânicos. Os autores relataram que não houve um padrão de exsudação em relação à disponibilidade de P e que embora diferenças visuais e numéricas tenham sido obtidas entre genótipos, estatisticamente não houve significância. Em experimento com chá (*Camellia sinensis* L.), LIN et al. (2011) verificaram redução na exsudação dos ácidos orgânicos málico e cítrico com maior disponibilidade de P. Ainda, em condições sem estresse, havia maior concentração de ácidos orgânicos nos ápices radiculares de braquiária braquiária ruziziensis em comparação com braquiária decumbens (WENZL et al., 2002). De qualquer maneira, o ácido fumárico foi o mais exsudado pelas raízes de braquiária brizanta, a espécie que mais produziu ácidos (Figura 23). Embora quantificado em folhas de braquiária,

NANAMORI et al. (2004) relataram que o ácido orgânico presente em maior quantidade foi o fumárico, aumentando conforme aumentava a disponibilidade de P em solução.

De qualquer maneira, há uma estreita correlação entre os compostos exsudados nas raízes, o estágio de desenvolvimento da planta e a microbiota da rizosférica (ZHALNINA et al., 2018). Na gramínea *Avena barbata* foi verificado um consumo preferencial de ácidos orgânicos aromáticos, como o ácido nicotínico (ZHALNINA et al., 2018). Os autores demonstraram que a exsudação desses compostos era correlacionada positivamente com o crescimento do sistema radicular, ou seja, eram mais exsudados conforme a planta se desenvolvia e isso era uma forma de selecionar uma microbiota específica que se alimentava desses ácidos aromáticos. O mesmo pode ter ocorrido no presente estudo. Embora tenha sido aplicado antibiótico para evitar contaminações microbianas na coleta de ácidos orgânicos, é possível que alguma forma de contaminação tenha ocorrido, portanto, os dados de exsudação devem ser vistos com cautela.

Conclusões do experimento

Os resultados indicam que existem diferenças no comportamento das espécies de braquiária em relação à disponibilidade de P.

A braquiária *ruzizensis* produziu mais biomassa em todos os níveis de P, possivelmente devido a uma maior eficiência de uso do nutriente e maior enraizamento inicial. A mais utilizada em consórcios com o cafeeiro, braquiária *decumbens*, teve desempenho intermediário e pouco respondeu aos tratamentos, mas destacou-se por proporcionar maior atividade de fosfatase ácida. Essas duas espécies exibiram comportamentos semelhantes frente a disponibilidade de P e foram agrupadas juntas.

A maior exigência em P por parte da braquiária *brizanta* fez com que ela fosse menos produtiva e exsudasse mais ácidos orgânicos, além de responder de forma acentuada ao aumento da disponibilidade do nutriente, aumentando principalmente sua biomassa de raízes. Por essa razão essa espécie foi agrupada separadamente.

Os dois grupos formados entre as espécies mostram que o critério para a escolha da espécie de braquiária a ser utilizada em consórcio com o cafeeiro deve levar em conta a disponibilidade de P para o crescimento da forrageira. Em condições normais, de reduzida disponibilidade do elemento, as braquiárias *ruzizensis* e *decumbens* serão mais produtivas; em contra partida, em sistemas de alta fertilidade, a braquiária *brizanta* pode ser mais uma opção à disposição.

7. CONCLUSÕES

Juntos, os resultados dos experimentos indicam a eficiência das braquiárias na utilização do P, crescendo e se desenvolvendo mesmo em condições de baixas disponibilidade do nutriente.

A ciclagem de P de camadas profundas pela braquiária de fato ocorre, desde que haja disponibilidade do nutriente e não existam outras limitações ao desenvolvimento radicular, como alta saturação por Al, nessas camadas.

A magnitude da ciclagem, ou seja, a quantidade de P ciclada é diretamente proporcional à produção de biomassa de parte aérea e a disponibilidade de P no solo até certa profundidade. A adição de P até 80 cm aumentou a produção de biomassa e ciclagem de P da braquiária. Muito embora a eficiência de uso do nutriente tenha sido inversamente proporcional à disponibilidade do mesmo.

Entre as espécies de braquiária avaliadas, a que apresentou maior produção sob todos os níveis de disponibilidade de P foi a braquiária *ruzizensis*, seguida da braquiária *decumbens*. Em maiores níveis de disponibilidade de P a mais responsiva foi a braquiária *brizanta*.

Isso indica que dependendo da fertilidade e do manejo do sistema, a produção de biomassa de braquiária será diferente e determinada espécie de braquiária pode ser mais adequada que outra.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. S. et al. Soil phosphorus bioavailability and soybean grain yield impaired by Ruzigrass. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 110, n. 2, p. 654–663, 2018.
- ALMEIDA, D. S. et al. Phosphorus availability and dynamics in soil affected by long-term ruzigrass cover crop. **Geoderma**, [s. l.], v. 337, n. September 2018, p. 434–443, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.056>>
- ALMEIDA, D. S.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A. Assessment of phosphorus availability in soil cultivated with ruzigrass. **Geoderma**, [s. l.], v. 312, n. October 2017, p. 64–73, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.003>>
- ALMEIDA, D. S.; ROSOLEM, C. A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 108, n. 6, p. 2444–2452, 2016.
- AMES, B. N. [10] Assay of inorganic phosphate, total phosphate and phosphatases. **Methods in Enzymology**, [s. l.], v. 8, p. 115–118, 1966. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0076687966080145>>. Acesso em: 31 jul. 2019.
- ARROYAVE, C. et al. Differential aluminum resistance in *Brachiaria* species. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 89, p. 11–18, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847213000142>>. Acesso em: 1 ago. 2019.
- ARRUDA, B. et al. The impact of sugarcane filter cake on the availability of P in the rhizosphere and associated microbial community structure. **Soil Use and Management**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 334–345, 2019.
- BERNARDES, T. G. et al. Decomposição da biomassa e liberação de nutrientes dos capins braquiária e mombaça em condições de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 370–377, 2010.
- BHERING, L. L. Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 187–190, 2017.
- BOLLIGER, A. et al. Taking stock of the Brazilian “zero-till revolution”: a review of landmark research and farmers’ practice. In: **Advances in agronomy**. [s.l.] : Academic Press, 2006. v. 91p. 47–110.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. **The Nature and Properties of Soil**. [s.l.: s.n.].
- CALDANA, C. et al. Systemic analysis of inducible target of rapamycin mutants reveal a general metabolic switch controlling growth in *Arabidopsis thaliana*. **The Plant Journal**, [s. l.], v. 73, n. 6, p. 897–909, 2013. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23173928>>. Acesso em: 31 jul. 2019.
- CAMACHO, M. A.; SILVEIRA, L. P. O.; SILVEIRA, M. V. Eficiência de genótipos de *Brachiaria brizantha* Stapf. (Syn: *Urochloa brizantha*) na produção de biomassa sob aplicação de fósforo. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, [s. l.], v. 67, n. 4, p. 1133–1140, 2015.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. Microbiologia do solo. [s. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/109>>

CHIOU, T.-J. et al. Regulation of Phosphate Homeostasis by MicroRNA in *Arabidopsis*. **The Plant Cell**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 412–421, 2006. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16387831>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

CLARK, R. B.; ZETO, S. K. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 867–902, 2000.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: café. **Monitoramento agrícola- Safra 2017**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1–98, 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 199–207, 1985. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1985.tb00324.x>>

COOPER, J. et al. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 57, p. 78–86, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001807>>. Acesso em: 17 maio. 2018.

CORDEIRO, S. M. A. et al. Colonização E Densidade De Esporos De Fungos Micorrízicos Em Dois Solos Do Cerrado Sob Diferentes Sistemas De Manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 147–153, 2005. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/pat35\(3\)-03ID-2proJ4IUot.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/pat35(3)-03ID-2proJ4IUot.pdf)>

COSTA, N. R. et al. Acúmulo de macronutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em razão da adubação nitrogenada durante e após o consórcio com a cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 38, n. 4, p. 1223–1233, 2014.

CRUZ, S. C. S. et al. Nutrição do milho e da *Brachiaria decumbens* cultivados em consórcio em diferentes preparos do solo. **Acta Scientiarum - Agronomy**, [s. l.], v. 30, n. 5 SUPPL, p. 733–739, 2008.

DA COSTA, C. H. M. et al. Taxas de decomposição e liberação de nutrientes da fitomassa de milheto, capim colômbio e capim-braquiária. **Bioscience Journal**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 1191–1203, 2016.

DA CUNHA, F. F. et al. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum - Agronomy**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 351–357, 2010.

DO VALLE, C. B. . et al. Gênero *Brachiaria*. In: DA FONSECA, D. M. .; MARTUSCELLO, J. A. . (Eds.). **Plantas Forrageiras**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011. p. 30–77.

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P.; BALIGAR, V. C. Lime and phosphorus interactions on growth and nutrient uptake by upland rice, wheat, common bean, and corn in an Oxisol. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 18, n. 11, p. 2519–2532, 1995. Disponível em: <<http://10.0.4.56/01904169509365081>>

FERREIRA, A. C. de B. et al. Produção de biomassa por cultivos de cobertura do solo e produtividade do algodoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 45, n. 6, p. 546–553, 2010.

FIDALSKI, J. Qualidade física de Latossolo Vermelho em sistema de integração lavoura - pecuária após cultivo de soja e pastejo em braquiária. [s. l.], n. 1, p. 1097–1104, 2015.

FOLTRAN, E. C. et al. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 435, n. January, p. 170–179, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053>>

FRANCO, C. M. Influencia da temperatura no crescimento do cafeeiro (com referencia especial a temperatura das raizes). **IBEC - Research Institute**, [s. l.], n. 16, p. 27, 1958.

FRANCO, C. M. Lesão do colo do cafeeiro, causada pelo calor. **Bragantia**, [s. l.], v. 20, n. unico, p. 645–652, 1961. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87051961000100024&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 6 dez. 2019.

FRANCO, C. M. **Efeito de temperaturas supraótimas no sistema radicular, no crescimento e na absorcao e translocacao de nutrientes, em cafeeiros cultivados em solucao nutritiva Turrialba (IICA)**. [s.l: s.n.].

FURLAN, F. et al. Aluminum-induced stress differently modifies Urochloa genotypes responses on growth and regrowth: root-to-shoot Al-translocation and oxidative stress. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 141–152, 2018.

GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 691–699, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000400010&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 12 nov. 2019.

GERKE, J. The acquisition of phosphate by higher plants: Effect of carboxylate release by the roots. A critical review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [s. l.], v. 178, n. 3, p. 351–364, 2015.

HAEUSSLER, K. et al. Shoot and root growth of two tropical grasses, *Brachiaria rudziensis* and *B-dictyoneura*, as influenced by aluminium toxicity and phosphorus deficiency in a sandy loam Oxisol of the eastern plains of Colombia. **Tropical Grasslands**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 213–221, 2006.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations1. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 46, n. 5, p. 970, 1982. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/46/5/SS0460050970>>

HEUER, S. et al. Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. **Plant Journal**, [s. l.], v. 90, n. 5, p. 868–885, 2016.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water-culture method for growing plants without soil**. Berkeley, Calif.: College of Agriculture, University of California, 1950.

IGAMBERDIEV, A. U.; EPRINTSEV, A. T. Organic Acids: The Pools of Fixed Carbon Involved in Redox Regulation and Energy Balance in Higher Plants. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 7, n. July, p. 1–15, 2016.

JANEGITZ, M. C.; INOUE, B. S.; ROSOLEM, C. A. Formas de fósforo no solo após o cultivo de braquiária e tremoço branco. **Ciênc. rural**, [s. l.], v. 43, n. 8, p. 1381–1386, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&%5Cnpid=S0103-84782013000800007>

JANEGITZ, M. C.; MARTINS, A. R. H.; ROSOLEM, C. A. Cover Crops and Soil Phosphorus Availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 48, n. 10, p. 1240–1246, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1341918>>

JIA YIN, P. et al. The carboxylate-releasing phosphorus-mobilizing strategy can be proxied by foliar manganese concentration in a large set of chickpea germplasm under low phosphorus supply. **New Phytologist**, [s. l.], v. 0, n. 0, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/nph.15200>>

JOHNSTON, A. E. et al. Chapter Five - Phosphorus: Its Efficient Use in Agriculture. In: SPARKS, D. L. B. T.-A. in A. (Ed.). [s.l.] : Academic Press, 2014. v. 123p. 177–228.

KANNO, T. et al. Root Biomass of Five Tropical Grass Pastures under Continuous Grazing in Brazilian Savannas. **Japanese Journal of Grassland Science**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 9–14, 1999.

KANNO, T.; MACEDO, M. C.; BONO, J. A. Growth Responses of *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk and *Brachiaria brizantha* cv. Marandu to Phosphorus Supply. **Japanese Journal of Grassland Science**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 1–8, 1999.

KLUTHCOUSKI, J.; OLIVEIRA, P. De; AIDAR, H. Rotação com pastagens é alternativa para o Sistema Plantio Direto. **Revista Visão Agrícola**, [s. l.], v. 9, p. 21–24, 2009.

LAMBERS, H. et al. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: Matching morphological and physiological traits. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 98, n. 4, p. 693–713, 2006.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. [s.l: s.n.]. v. 53 Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-78341-3>>

LI, M. et al. Secretion of phytase from the roots of several plant species under phosphorus-deficient conditions. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 195, n. 1, p. 161–169, 1997. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/A:1004264002524>>. Acesso em: 1 ago. 2019.

LIMA FILHO, O. F. De et al. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática v.1**. [s.l.] : Embrapa, 2014. a.

LIMA FILHO, O. F. De et al. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática v.2**. [s.l.] : Embrapa, 2014. b.

LIN, Z.-H. et al. Root release and metabolism of organic acids in tea plants in response to phosphorus supply. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 168, n. 7, p. 644–652, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161711000174>>. Acesso em: 1 ago. 2019.

LINQUIST, B. A.; SINGLETON, P. W.; CASSMAN, K. G. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an ultisol. **Soil Science**, [s. l.], v. 162, n. 4, p. 254–264, 1997.

LISEC, J. et al. Gas chromatography mass spectrometry–based metabolite profiling in plants. **Nature Protocols**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 387–396, 2006. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17406261>>. Acesso em: 31 jul. 2019.

LOUW-GAUME, A. E. et al. A comparative study on plant growth and root plasticity responses of two *Brachiaria* forage grasses grown in nutrient solution at low and high phosphorus supply. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 328, n. 1, p. 155–164, 2010.

MAGALHAES, J. V. et al. Emerging pleiotropic mechanisms underlying aluminum resistance and phosphorus acquisition on acidic soils. [s. l.], v. 9, n. September, p. 1–12, 2018.

MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)**. Third Edit ed. San Diego: Academic Press, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123849052000297>>

MERCANTE, F. M. et al. **Parâmetros microbiológicos como indicadores da qualidade do solo sob sistemas integrados de produção agropecuária**. [s.l: s.n.].

MERLIN, A.; HE, Z. L.; ROSOLEM, C. A. Ruzigrass affecting soil-phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 48, n. 12, p. 1583–1588, 2013.

MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A.; HE, Z. L. Non-labile phosphorus acquisition by *Brachiaria*. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 39, n. 9, p. 1319–1327, 2016. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2015.1109117>>. Acesso em: 1 ago. 2019.

MEYER, S. et al. Intra- and extra-cellular excretion of carboxylates. [s. l.], n. November, 2009.

MIGUEL, A. S. D. C. S. et al. Phytomass and nutrient release in soybean cultivation systems under no-tillage | Fitomassa e liberação de nutrientes em sistemas de cultivo de soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 53, n. 10, p. 1119–1131, 2018.

MILES, J. W. et al. **Brachiaria: Biology, agronomy and improvement**, Centro Internacional de Agricultura Tropical ; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte, 1996.

MILES, J. W. et al. *Brachiariagrasses*. In: **Warm-Season (C4) Grasses**. Agronomy Monographs[s.l: s.n.]. p. 745–783.

NANAMORI, M. et al. Low phosphorus tolerance mechanisms: Phosphorus recycling and photosynthate partitioning in the tropical forage grass, *Brachiaria* hybrid cultivar mulato compared with rice. **Plant and Cell Physiology**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 460–469, 2004.

NEUMANN, G. The Role of Ethylene in Plant Adaptations for Phosphate Acquisition in Soils - A Review. **Frontiers in plant science**, [s. l.], v. 6, p. 1224, 2016. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26834759>>

NGUYEN, V. L. et al. Genotypic Variation in the Root and Shoot Metabolite Profiles of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Indicate Sustained, Preferential Carbon Allocation as a Potential Mechanism in Phosphorus Efficiency. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 10, n. August, p. 1–14, 2019.

OBERSON, A. et al. Phosphorus status and cycling in native savanna and improved pastures on an acid low-P Colombian Oxisol. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 77–88, 1999.

OSTONEN, I. et al. Specific root length as an indicator of environmental change. **Plant Biosystems**, [s. l.], v. 141, n. 3, p. 426–442, 2007.

PACHECO, L. P. et al. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 46, n. 1, p. 17–25, 2011.

PACHECO, L. P. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 48, n. 9, p. 1228–1236, 2013.

PEDROSA, A. W. **Eficiência da adubação nitrogenada no consórcio entre cafeeiro e *Brachiaria brizantha***. 2013. [s. l.], 2013.

PÉREZ-TIENDA, J. et al. Kinetics of NH_4^+ uptake by the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis*. **Mycorrhiza**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 485–491, 2012.

PLAYSTED, C. W. S. et al. Functional significance of dauciform roots: Exudation of carboxylates and acid phosphatase under phosphorus deficiency in *Caustis blakei* (Cyperaceae). **New Phytologist**, [s. l.], v. 170, n. 3, p. 491–500, 2006.

POSTMA, J. A.; LYNCH, J. P. Theoretical evidence for the functional benefit of root cortical aerenchyma in soils with low phosphorus availability. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 107, n. 5, p. 829–841, 2011. a.

POSTMA, J. A.; LYNCH, J. P. Root cortical aerenchyma enhances the growth of maize on soils with suboptimal availability of nitrogen, phosphorus, and potassium. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 156, n. 3, p. 1190–1201, 2011. b.

RAGASSI, C. F.; PEDROSA, A. W.; FAVARIN, J. L. Aspectos positivos e riscos no consórcio cafeeiro e braquiária. **Revista Visão Agrícola**, [s. l.], v. 12, p. 29–32, 2013.

RAO, I. M. et al. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils II. Differences in shoot and root growth responses to varying phosphorus supply and soil type. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 323–352, 1996.

RAO, I. M.; AYARZA, M. A.; GARCIA, R. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils I. Differences in plant growth, nutrient acquisition and nutrient utilization among C4 grasses and C3 legumes. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 18, n. 10, p. 2135–2155, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01904169509365052>>

RAO, I. M.; KERRIDGE, P. C.; MACEDO, M. Nutritional Requirements of Brachiaria spp. and Adaptation to Acid Soils. In: **Brachiaria spp.: Biology, Agronomy and Improvement**. [s.l.] : Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Campo Grande, BR : Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (CNPGC), 1996. p. 53 – 71.

RAZUK, R. B. **Avaliação do sistema radicular de acessos de <i>Brachiaria brizantha <i> e suas relações com atributos químicos e físicos do solo**. 2002. [s. l.], 2002.

RENA, A. B.; DAMATTA, F. M. O sistema radicular do cafeeiro: estrutura e ecofisiologia. In: ZAMBOLIN, L. (Ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. [s.l.] : Universidade Federal de Viçosa Viçosa, 2002. p. 11–92.

RICHARDSON, A. E.; HADOBAS, P. A.; HAYES, J. E. Acid phosphomonoesterase and phytase activities of wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and utilization of organic phosphorus substrates by seedlings grown in sterile culture. **Plant, Cell and Environment**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 397–405, 2000.

RODRIGUES, L. N.; MARIOTI, J.; ROOSEVELT JÚNIOR, A. Índice de área foliar e profundidade radicular máxima das principais coberturas vegetais de uma bacia hidrográfica do bioma Cerrado. In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA 2011, Cuiabá - MT. **Anais...** Cuiabá - MT

RODRIGUES, M. et al. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 542, p. 1050–1061, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>>

ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A.; BULL, J. C. L. Soil phosphorus dynamics as affected by Congo grass and P fertilizer. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 71, n. 4, p. 309–315, 2014.

SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. [s. l.], 2005.

SALTON, J. C. et al. Soil aggregation and aggregate stability under crop-pasture systems in Mato Grosso do Sul state, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 11–21, 2008.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 116, n. 2, p. 447 LP – 453, 1998. Disponível em: <<http://www.plantphysiol.org/content/116/2/447.abstract>>

SERRÃO, E. A. S. .; SIMÃO-NETO, M. Informações sobre duas espécies de gramíneas forrageiras do gênero *Brachiaria* na Amazônia: *B. decumbens* Stapf e *B. ruziziensis* Germain et Everard. **IPEAN - Estudos sobre forrageiras na Amazônia**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 31, 1971.

SHIRAISHI, F. A. et al. Distribuição do sistema radicular das gramíneas *Panicum maximum* cv . Tanzânia , *Brachiaria brizantha* cv . Marandu e Milho (*Zea mays* L .) em preparo profundo de solo 1 Objetivos 2 Material e Métodos 3 Resultados e discussão. [s. l.], p. 1999, 2007.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P.; LIMA, J.M. DE; CARVALHO, A. . Rotação adubo verde - milho e adsorção de fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [s. l.], v. 32, p. 649–654, 1997.

SOLTANGHEISI, A. et al. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 179, p. 20–28, 2018.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. **FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin**, [s. l.], v. 18, n. 108, 2008.

TIAN, J.; LIAO, H. The Role of Intracellular and Secreted Purple Acid Phosphatases in Plant Phosphorus Scavenging and Recycling. In: **Annual Plant Reviews Volume 48**. [s.l.] : John Wiley & Sons, Inc., 2015. p. 265–287.

TUNESI, S.; POGGI, V.; GESSA, C. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: the role of calcium ions in solution and carbonate minerals. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 219–227, 1999. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/A:1009709005147>>. Acesso em: 17 maio. 2018.

TURNER, B. L. Inositol phosphates in soil: amounts, forms and significance of the phosphorylated inositol stereoisomers. In: TURNER, B. L. .; RICHARDSON, A. E. .; MULLANEY, E. J. (Eds.). **Inositol phosphates: linking agriculture and the environment**. 1. ed. Wallingford: CAB INTERNATIONAL, 2007. p. 186–206.

VOLPE, E. et al. Métodos de recuperação direta de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk em Latossolo vermelho distrófico de cerrado. In: IX SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA O EQUILBRIO ENTRE SOCIEDADE, AGRONEGÓCIO E RECURSOS NATURAIS 2006, **Anais...** [s.l: s.n.]

WENZL, P. et al. Aluminum stress stimulates the accumulation of organic acids in root apices of *Brachiaria* species. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [s. l.], v. 165, n. 5, p. 582–588, 2002.

WERNER, J. C. et al. Forrageiras. In: VAN, R. B. et al. (Eds.). **Boletim Técnico 100 - Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC/Fundag, 1997. p. 261–276.

WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. do P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e práticas**. [s.l: s.n.]. p. 59–168.

ZAIA, F. C. et al. Fósforo orgânico em solos sob agrossistemas de cacau. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 1987–1995, 2008.

ZHALNINA, K. et al. Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patters in rhizosphere microbial community assembly. [s. l.], v. 3, n. April, 2018.

8. MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela Suplementar 1. Fracionamento do P do solo.

Camada	Coleta	P (mg.kg ⁻¹)																	
		RTA		NaHCO ₃ inorg		NaHCO ₃ org		NaOH 0.1M inorg		NaOH 0.1M org		HCl 1M		NaOH 0.5M inorg		NaOH 0.5M org		Residual	
P aplicado a 30 cm																			
0 - 30 cm	Inicial	2.2	a	10.6	a	9.2	a	21.9	a	24.1	a	1.4	a	12.9	a	30.3	a	78.4	a
	Final	1.6	a	9.7	a	5.7	a	21.5	a	25.1	a	1.2	a	9.7	a	13.5	a	80.2	a
P aplicado a 60 cm																			
0 - 30 cm	Inicial	2.24	a	11.1	a	7.6	a	27.2	a	29.4	a	1.0	a	10.1	a	22.0	a	87.3	a
	Final	1.66	b	10.7	a	4.5	b	25.6	a	26.9	a	0.8	b	10.0	a	18.0	a	84.7	a
30 - 60 cm	Inicial	1.45	a	8.6	a	8.8	a	18.6	a	18.1	a	1.4	a	8.4	a	10.0	a	75.1	b
	Final	1.37	a	9.2	a	5.1	a	19.5	a	18.7	a	0.5	a	8.2	a	8.8	a	89.5	a
P aplicado a 90 cm																			
0 - 30 cm	Inicial	2.36	a	10.8	a	9.1	a	24.9	a	32.1	a	1.8	a	12.6	a	19.1	a	82.4	b
	Final	1.70	b	10.0	b	6.0	b	24.7	a	24.2	b	0.6	b	10.2	a	15.5	a	94.8	a
30 - 60 cm	Inicial	1.48	a	8.9	a	3.2	b	17.2	a	16.9	a	0.8	a	7.5	a	16.3	a	73.2	b
	Final	1.18	a	8.2	b	6.7	a	18.3	a	14.4	a	0.7	b	8.3	a	13.9	a	86.1	a
60 - 90 cm	Inicial	0.79	a	8.1	a	4.4	b	14.3	a	16.2	a	0.9	a	8.7	a	8.1	a	83.0	b
	Final	0.70	a	7.1	b	6.0	a	9.8	a	19.8	a	0.3	b	10.7	a	8.2	a	108.2	a

Letras diferentes representam diferenças significativas nas frações do P do solo pelo teste Tukey ($p < 0.05$) entre as coletas inicial e final de um dado tratamento.

Tabela Suplementar 2. Fracionamento do P do solo.

Tratamento	Camada	P (mg.kg ⁻¹)																
		RTA		NaHCO ₃ inorg		NaHCO ₃ org		NaOH 0.1M inorg		NaOH 0.1M org		HCl 1M		NaOH 0.5M inorg		NaOH 0.5M org		Residual
TC	0 - 30	2.35	Ac	12.5	Ac	14.6		31.7	c	41.6	B	6.2		16.4	BC	9.3		61
	30 - 80	2.70	Ab	13.2	Ac	14.0	B	32.4	c	42.1	Bab	6.1		12.7	C	12.5		66
	80 - 130	2.75	Ad	12.9	Ac	32.1		28.4	d	83.9	ABa	8.0		22.2	BC	27.8	ab	64
	130 - 200	2.68	Ad	14.8	Ab	32.3		24.6	d	84.4	Aa	8.8	c	30.4	Aab	40.3	b	75 b
T1	0 - 30	9.27	Ab	23.0	Aab	14.8		45.7	ac	45.9		14.2		14.2	AB	15.0		61
	30 - 80	4.44	Bb	14.4	Bbc	16.5	ab	36.1	ac	46.7	ab	7.9		13.1	BC	13.6		68
	80 - 130	2.87	Bcd	12.5	Bc	30.0		36.0	cd	45.7	ab	8.0		20.5	AB	12.5	ab	75
	130 - 200	3.05	Bd	13.2	Bb	22.0		40.5	cd	43.7	ab	8.2	c	21.5	Abc	13.3	b	79 b
T2	0 - 30	9.88	Bb	22.1	Aab	17.2		49.5	ab	46.5	AB	12.5		16.2		16.6		76
	30 - 80	12.13	Aa	25.6	Aa	14.3	b	53.0	a	54.0	Aab	16.5		17.0		13.5		68
	80 - 130	5.11	Cc	15.5	Bbc	19.4		42.4	cd	51.1	ABa	9.7		19.8		8.6	ab	67
	130 - 200	3.48	Ccd	14.8	Bb	15.6		44.9	bc	38.4	Bb	10.6	ac	17.1	c	10.5	b	64 b
T3	0 - 30	10.21	Bab	26.1	Aa	14.7	B	59.3	Ba	44.2		16.0		17.6		13.4		68
	30 - 80	12.30	Aa	21.4	Abab	26.8	Aa	51.5	Bab	57.0	a	11.4		18.9		12.1		77
	80 - 130	12.92	Aa	22.7	ABab	23.8	AB	53.9	Abc	50.6	a	13.8		15.4		16.4	a	63
	130 - 200	5.45	Cc	16.7	Bb	25.2	AB	44.9	Abbc	48.9	ab	10.1	c	17.4	c	12.9	b	65 b

Tabela Suplementar 2. Continuação.

T4	0 - 30	12.10	Aa	21.4	Bab	22.7	50.2	ab	51.4	13.6	16.7	B	13.8	57	B
	30 - 80	11.95	Aa	22.4	Bab	19.0	47.7	ab	50.5	11.4	16.3	B	11.9	58	B
	80 - 130	12.03	Aa	27.4	ABb	18.8	66.9	ab	47.7	17.9	16.3	B	14.0	62	B
	130 - 200	11.77	Aa	29.6	Aa	52.0	61.0	ab	119.8	16.4	35.8	Aa	43.7	248	Aa
T5	0 - 30	3.45	Bc	12.9	Bc	17.9	35.6	Bbc	48.0	8.6	19.7	AB	7.9	73	
	30 - 80	2.95	Bb	12.8	Bc	16.0	34.8	Bc	40.0	7.6	13.6	B	10.2	72	
	80 - 130	3.00	Bcd	14.6	Bbc	15.9	38.7	Bcd	41.7	7.1	21.2	AB	3.3	72	
	130 - 200	8.47	Ba	34.4	Aa	15.0	67.1	Aa	45.1	21.7	23.2	Ab	13.4	76	b
T6	0 - 30	4.38	Cc	15.8	Bbc	20.5	39.2	Cbc	52.2	8.0	15.5		13.1	53	
	30 - 80	3.24	Cb	14.2	Bbc	18.5	37.5	Bac	49.3	8.9	18.9		6.9	50	
	80 - 130	8.45	Bb	29.4	Aa	20.0	82.5	Aa	30.8	32.9	18.6		15.2	59	
	130 - 200	10.74	Aa	32.4	Aa	51.9	63.1	Bab	121.9	20.8	24.3	A	52.0	55	b

Letras diferentes representam diferenças significativas nas frações do P do solo pelo teste Tukey ($p < 0.05$). Maiúsculas indicam diferenças entre camadas de um mesmo tratamento; minúsculas indicam diferenças entre a mesma camada de diferentes tratamentos.

[illegible]