

## CAPÍTULO 2

# ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO DE NUTRIENTES POR PLANTAS DE COBERTURA SUBMETIDAS A ADUBAÇÃO FOSFATADA

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Érica de Oliveira Araújo**

Profa. Doutora em Agronomia,  
Departamento de Agropecuária, Instituto  
Federal de Rondônia, Campus de  
Colorado do Oeste, Colorado do Oeste-  
Brasil

### **Vitório Macieski Neto**

Graduando (a) em Engenharia  
Agrônômica, Instituto Federal de  
Rondônia, Campus Colorado do Oeste,  
Colorado do Oeste, Brasil

### **José Vanor Felini Catânio**

Prof. Mestre em Produção Animal,  
Departamento de Agronomia, Instituto  
Federal do Mato Grosso, Campus  
Confresa, Confresa, Brasil

### **Rodrigo Alvarenga da Silva**

Técnico em Agropecuária, Instituto  
Federal de Rondônia, Campus de  
Colorado do Oeste, Colorado do Oeste,  
Brasil

### **Diogo de Souza Freitas**

Graduando (a) em Engenharia  
Agrônômica, Instituto Federal de  
Rondônia, Campus Colorado do Oeste,  
Colorado do Oeste, Brasil

### **Jiovane Anderson da Silva Ribeiro**

Engenheiro Agrônomo, Instituto Federal  
de Rondônia, Campus Colorado do Oeste,  
Colorado do Oeste, Brasil

### **Daniele Jesus Venturim**

Engenheira Agrônoma, Instituto Federal  
de Rondônia, Campus Colorado do Oeste,  
Colorado do Oeste, Brasil

## INTRODUÇÃO

O fornecimento de fósforo (P) representa parte expressiva do custo de produção das culturas, especialmente nas regiões tropicais, pois além de apresentarem baixa disponibilidade de fósforo, os solos quase que na sua totalidade são intemperizados, ácidos, argilosos e oxidícos, características que favorecem a fixação do fósforo pelo solo (SILVA et al., 2011). A implicação prática disso é que, embora a exigência de fósforo pelas plantas não seja elevada, grandes quantidades do nutriente devem ser fornecidas nas adubações para promover alguma saturação do solo e originar um

excedente que atenda aos requerimentos nutricionais das culturas (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A maior parte do custo com a implantação de uma lavoura na região sul do estado de Rondônia está relacionada com a correção da acidez do solo e com a adubação fosfatada. Assim, considerando a essencialidade do fósforo para o desenvolvimento das plantas, e os fosfatos um recurso natural não renovável, deve-se buscar formas de utilizá-lo eficientemente. Uma prática que resulta em aumento na recuperação do P adicionado ao solo é a implantação de práticas conservacionista do solo, incluindo espécies com alta eficiência em extrair e utilizar o P. A partir dessa premissa, plantas que possuem mecanismos estruturais, bioquímicos e fisiológicos, que permitam um maior aproveitamento do fósforo do solo podem ser utilizadas para se alcançar uma alta eficiência agrônômica da adubação fosfatada (FERNANDES; MURAOKA, 2002; SOUSA; LOBATO; REIN, 2004).

Os resíduos das culturas e das plantas de cobertura contêm quantidades consideráveis de P em seus tecidos, que mediante sua mineralização poderão atender boa parte da demanda das culturas. No processo de mineralização dos resíduos orgânicos ocorre a formação de formas orgânicas de P menos suscetíveis às reações de adsorção. O solo pode adsorver ácidos orgânicos com grande energia, competindo com os sítios de adsorção de P e aumentando a disponibilidade desse nutriente para as plantas (OLIVEIRA et al., 2002; ANDRADE et al., 2003).

Estudos têm demonstrado que as plantas com maior capacidade de extrair o fósforo são aquelas que possuem sistema radicular abundante e que produzem exsudatos capazes de acidificar a rizosfera, favorecendo a solubilização dos fosfatos naturais menos reativos, insolúveis em água, que necessitam de acidez para que alguma dissolução se inicie. Outro fator que favorece a solubilidade dos fosfatos naturais é o dreno de P e de Ca pelas plantas. Uma maior remoção de Ca e P faz com que aumente a taxa de dissolução do fosfato natural (SILVA et al., 2011). Assim, condições que favoreçam o aumento da CTC com um maior teor de matéria orgânica e calagem; além da própria cultura podem exercer papel preponderante na eficiência dos fosfatos naturais, uma vez que atuariam como dreno de Ca (SILVA et al., 2009).

Em conjunto, a ciclagem do P pelas plantas ganha importância, pois estas possuem diferentes graus de adaptação para acessar o P do solo (HALL et al., 2010). Como os mecanismos de acesso variam com a espécie vegetal, a fim de otimizar o uso do P do solo pelas plantas em sistemas agrícolas, é fundamental a identificação daquelas com maior potencial de absorver e ciclar o P do solo, principalmente as que podem ser utilizadas comercialmente ou como plantas de cobertura do solo cultivadas em sucessão e/ou rotação com espécies comerciais. A sincronização entre espécies vegetais, solos e o fósforo constituem uma ferramenta indispensável para o melhor aproveitamento desse elemento por diferentes espécies, maximizando a resposta da planta a adubação fosfatada na maioria dos solos tropicais (ANDRADE et al., 2003; SOARES et al., 2007).

Assim, estudar o efeito de diferentes sistemas de culturas e de manejos de solo sobre as formas de acumulação de P no solo é o caminho para selecionar práticas agrícolas com vistas a melhorar a dinâmica desse nutriente no solo e como alternativa de manejo que contribua para a manutenção ou melhoria da qualidade do solo. A indicação de plantas de cobertura diversificadas associada a um sistema de sucessão e ou de rotação de culturas no Bioma Amazônico configura-se relevante para o aprofundamento do conhecimento científico e para um novo processo tecnológico destinado à produção agrícola na região Amazônica, com menores custos pela redução do uso de fertilizantes químicos.

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a produção de biomassa, a absorção e utilização de nutrientes por diferentes plantas de cobertura submetidas à adubação fosfatada.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em ambiente protegido no período de agosto a dezembro de 2019, na área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, Campus Colorado do Oeste, no município de Colorado do Oeste, RO, cujas coordenadas geográficas são 13° 06' S e 60° 29' W, com altitude média de 407 metros. O clima segundo a classificação de Köppen é do tipo Awa, tropical quente e úmido com duas estações bem definidas. Dados médios de temperatura e precipitação pluviométrica durante a condução do experimento foram obtidos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A caracterização química do solo foi realizada na camada de 0-20 cm, em amostras coletadas antes da instalação do experimento (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos químicos do solo antes da instalação do experimento.

Profundidade	MO	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V	m
	g/dm <sup>-3</sup>	H <sub>2</sub> O	mg/dm <sup>-3</sup>					-----cmolc/dm <sup>-3</sup> -----			-----%-----	
0-20	20.4	6.0	5	180	6	1.7	4.3	0	8.2	12.5	66	0

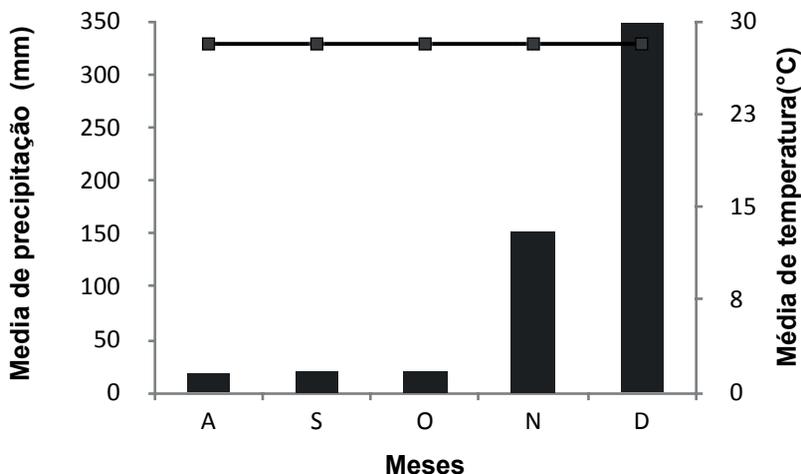


Figura 1. Precipitação (mm) e temperatura (°C) médias mensais, registradas na estação metereológica do Instituto Nacional de Meteorologia, no período de agosto a dezembro do ano agrícola de 2019.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, arranjos em esquema 7x3, sendo constituídos pelo plantio de sete espécies de cobertura (*Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria breviflora*, *Crotalaria ochroleuca*, *Mucuna preta*, *Mucuna cinza*, *Lab-lab* e feijão de porco), três doses de fósforo (0, 80 e 160 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), tendo como fonte solúvel de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (SFT (45% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)), e quatro repetições, perfazendo o total 84 unidades experimentais. A quantidade de cada dose de fósforo aplicada foi calculada para com base no teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total dos fertilizantes fosfatados, e convertidas para condições de vaso.

Tabela 2. Espécies de planta de cobertura (tratamentos das parcelas), relação C/N indicada na literatura.

Espécie	Nome comum	Família	Relação C/N
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	Crotalária ochroleuca	Fabaceae	25-29 <sup>2</sup>
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Crotalaria spectabilis	Fabaceae	10-16 <sup>1</sup>
<i>Crotalaria breviflora</i>	Crotalaria breviflora	Fabaceae	11-18
<i>Mucuna aterima</i>	Mucuna preta	Fabaceae	12-21 <sup>1</sup>
<i>Mucuna pruriens</i>	Mucuna cinza	Fabaceae	12-21 <sup>1</sup>
<i>Dolichos lablab</i>	Lab-lab	Fabaceae	23-28 <sup>3</sup>
<i>Canavalia ensiformis</i>	Feijão de porco	Fabaceae	10-16 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wutke et al. (2014); <sup>2</sup> Fischlerab et al. (1999); <sup>3</sup> Teodoro et al., 2011.

Concomitantemente à aplicação do fósforo, realizou-se a adubação de base com nitrogênio e potássio, na dose de 30 kg ha<sup>-1</sup> de N e 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, utilizando como fonte a uréia (45% de N) e cloreto de potássio (56% de K<sub>2</sub>O), respectivamente, incorporados ao solo para melhor uniformização. As unidades experimentais foram compostas por vasos plásticos com capacidade de 10 dm<sup>-3</sup>, preenchidos com solo seco ao ar, passado em peneira de 4 mm de abertura. As doses de fósforo convertidas para volume de unidade experimental corresponderam a 0.40 e 0.80 mg/dm<sup>-3</sup>, enquanto que as doses de N e K, corresponderam a 0.015 e 0.03 mg/dm<sup>-3</sup>, respectivamente. A umidade dos vasos foi controlada diariamente, sempre visando manter o solo com 60% da capacidade de campo.

As sementes foram postas a germinar diretamente nos vasos, sendo, que aos oito dias após a emergência (DAE), realizou-se o desbaste, deixando-se apenas uma planta por unidade experimental, levando em consideração o vigor e uniformidade das plântulas.

Por ocasião do pleno florescimento das espécies de cobertura realizou-se o corte das diferentes plantas de plantas e divisão em raiz e parte aérea, sendo todo o material vegetal coletado lavado em água corrente e água deionizada, pesados para determinação da massa fresca, e posteriormente levados a secar em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas, sendo, em seguida, determinada a sua massa seca. Após a secagem e pesagem do material vegetal, procedeu-se a moagem da massa seca de parte aérea e da raiz em moinho tipo Wiley, sendo as amostras, submetidas à digestão sulfúrica para determinação dos teores de N, e digestão nitro-perclórica, para determinação dos teores de P e K nas diferentes partes da planta (raiz e parte aérea), de acordo com a metodologia descrita em Embrapa (2009).

Os índices de eficiência de absorção dos nutrientes, razão entre o conteúdo total de nutriente na planta e a massa seca das raízes, foi calculado de acordo com Swiader et al. (1994), enquanto que os índices de utilização de nutrientes, razão entre a massa seca total produzida e o conteúdo total de nutriente na planta, foram calculados de acordo com Siddiqi e Glass (1981).

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro Wilk) e análise de variância, sendo os efeitos entre plantas de cobertura e doses de fósforo avaliados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, e as correlações entre as variáveis determinadas utilizando-se o programa estatístico Sisvar.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados evidenciaram efeitos significativos ( $p \leq 0.05$ ) da interação dupla entre plantas de cobertura e dose de fósforo para teor de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea (Tabela 6), teor de nitrogênio, fósforo e potássio na raiz (Tabela 7) e eficiência de utilização de nitrogênio, fósforo e potássio (Tabela 8); enquanto que os demais resultados não apresentaram efeito significativo da interação e são apresentados independentes para as diferentes plantas de cobertura (Tabela 3, 4 e 5) e doses de fósforo (Figura 2, 3, 4 e 5).

O feijão de porco foi estatisticamente superior ( $p \leq 0.05$ ) as demais plantas de cobertura quanto a produção de massa fresca e massa seca da parte aérea, enquanto que produção de massa seca da raiz esteve entre os menores valores registrados dentre as diferentes plantas de cobertura (Tabela 3). Observa-se que mesmo com baixa produção de massa seca da raiz, o que pode estar estreitamente relacionado ao volume de solo disponível para desenvolvimento das raízes, o feijão de porco foi capaz de absorver a maior quantidade de nitrogênio pela raiz, na ordem de  $16.52 \text{ g/kg}^{-1}$  (Tabela 4), em contrapartida, menores quantidades de nitrogênio foram acumuladas na parte aérea (Tabela 4), configurando relação inversa entre as variáveis. Pereira et al., (2017) estudando a ciclagem de nutrientes por diferentes plantas de cobertura constataram que o feijão de porco proporcionou melhores resultados quanto a produção de massa fresca e massa seca da parte aérea em estágio fenológico de florescimento; enquanto que Bortoluzzi et al., (2019) verificaram que o feijão de porco apresenta alto potencial para aporte de biomassa em diferentes épocas de semeadura. Barros et al., (2017) e Teodoro et al., (2011) indicam o feijão de porco como excelente espécie de cobertura por apresentar rápido crescimento inicial, amplas folhas cotiledonares, bom recobrimento do solo, elevada capacidade de produção de massa seca e por realizar a fixação biológica de nitrogênio.

As menores produções de massa fresca e massa seca da parte aérea foram verificadas para a planta de cobertura Lab-lab (Tabela 3), sendo observada a correlação direta da produção de massa fresca e seca da parte aérea com o menor acúmulo de nitrogênio na parte aérea ( $17.72 \text{ g/kg}^{-1}$ ) (Tabela 4). Todavia, a espécie apresentou os maiores índices de fósforo na parte aérea ( $1.66 \text{ g/kg}^{-1}$ ), não diferindo estatisticamente das espécies *Crotalaria breviflora* e *Crotalaria spectabilis* (Tabela 4). Os teores de nitrogênio e fósforo nas raízes de Lab-lab foram significativamente superiores as demais plantas de cobertura estudadas, o que permite inferir a capacidade dessa espécie em acumular N e P em seus tecidos radiculares, sem estreita relação com o aporte de massa seca da parte aérea.

Dentre as plantas de cobertura com destaque para produção de massa seca da raiz e massa seca total as espécies de mucuna preta, mucuna cinza e *Crotalaria ochroleuca* destacaram-se não diferindo estatisticamente entre si (Tabela 3).

Quanto aos teores de potássio na parte aérea e raiz, a espécie *Crotalaria spectabilis* foi superior às demais plantas de cobertura, enquanto que os menores teores de K na parte aérea e raiz foram acumulados pela espécie feijão de porco (Tabela 4). A absorção de K pelas respectivas plantas de cobertura variaram entre  $17.18 \text{ g kg}^{-1}$  para *Crotalaria spectabilis* e  $10.57 \text{ g kg}^{-1}$  para feijão de porco. Esses teores significativos de K na parte aérea de *Crotalaria spectabilis* corroboram aos encontrados por Pereira et al., (2017) e Mauad et al., (2019). Em áreas com níveis baixos de potássio é importante o uso de plantas de cobertura do solo pela capacidade de ciclagem, acúmulo e disponibilização de nutrientes para as culturas sucessoras, beneficiando todo o sistema agrícola (Teodoro et al., 2011). A distinção de resposta entre espécies quanto à produção e absorção de nutrientes é fato confirmado na literatura, em virtude da existência de comportamento nutricional diferenciados por fatores genéticos de adaptabilidade.

Tabela 3. Massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massas seca total (MST) de diferentes plantas de cobertura cultivadas em ambiente protegido.

Planta de cobertura	MFPA	MSPA	MSR	MST
	(g.vaso <sup>-1</sup> )			
Feijão de porco	310.26 a	77.05 a	32.06 c	109.11 bc
Lab-lab	219.53 c	45.59 d	43.95 b	93.54 cd
Mucuna cinza	223.29 c	57.97 b	83.80 a	141.78 a
Mucuna preta	236.91 bc	59.59 b	74.27 a	133.86 ab
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	256.25 bc	51.65 d	66.44 a	118.10 abc
<i>Crotalaria breviflora</i>	249.30 bc	45.48 d	25.44 c	70.92 d
<i>Crotalaria spectabilis</i>	271.38 b	49.60 d	28.11 c	75.72 d
CV (%)	12.53	13.38	29.93	21.52

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (Coeficiente de variação).

Tabela 4. Teor de nitrogênio na parte aérea (N), teor de fósforo na parte aérea (P), teor de potássio na parte aérea (K), teor de nitrogênio na raiz (NR), teor de fósforo na raiz (PR) e teor de potássio na raiz (KR) de diferentes plantas de cobertura cultivadas em ambiente protegido.

Planta de cobertura	N	P	K
	g/kg <sup>-1</sup>		
Feijão de porco	19.15 c	1.16 c	10.57 e
Lab-lab	17.72 c	1.66 a	13.72 b
Mucuna cinza	21.65 b	1.19 c	11.43 e
Mucuna preta	22.69 b	1.28 c	12.63 d
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	26.64 a	1.46 b	15.29 b
<i>Crotalaria breviflora</i>	22.62 b	1.57 a	14.08 b
<i>Crotalaria spectabilis</i>	21.46 b	1.62 a	17.18 a
CV (%)	8.21	9.74	9.75
Planta de cobertura	NR	PR	KR
	g/kg <sup>-1</sup>		
Feijão de porco	16.52 a	1.32 bc	7.15 c
Lab-lab	14.07 ab	1.54 a	7.75 c
Mucuna cinza	15.24 ab	1.27 bc	7.28 c
Mucuna preta	15.11 a	1.26 c	8.80 b
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	14.14 ab	1.15 d	4.88 d
<i>Crotalaria breviflora</i>	13.02 b	1.34 bc	11.18 a
<i>Crotalaria spectabilis</i>	15.25 ab	1.37 b	11.79 a
CV (%)	12.22	6.37	21.22

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (Coeficiente de variação).

Quanto a eficiência de absorção de N e P, o feijão de porco destacou-se, cujos valores de absorção de N foi 65.45 e de P na ordem 4.43 mg de peso seco por g de N e P absorvido, não diferindo estatisticamente das espécies *Crotalaria breviflora* e *Crotalaria spectabilis* (Tabela 5). Essa maior eficiência de absorção de N e P pela espécie feijão de porco tendeu a acompanhar a produção de massa seca da parte aérea, no entanto não se correlacionou com os maiores teores de nitrogênio na parte aérea (Tabela 3 e 4). As espécies de *Crotalaria breviflora* e *Crotalaria spectabilis* além de eficientes na absorção de N e P foram significativamente eficientes quanto à absorção de K (Tabela 5), e esses dados corroboram aos teores de K encontrados nas raízes de ambas as espécies (Tabela 4). É importante ressaltar que além da capacidade das espécies enquanto leguminosa em fixar o nitrogênio atmosférico pela associação simbiótica com bactérias do gênero *Rhizobium* apresentam elevada eficiência para ciclagem e imobilização dos nutrientes.

Na mesma premissa da eficiência de absorção de nutrientes, o feijão de porco apresentou a maior eficiência de utilização de nutrientes, tais como P e K (Tabela 5). Assim é possível afirmar que a eficiência de absorção de P pela espécie correlaciona-se diretamente com a eficiência de utilização do P, no entanto, a eficiência de utilização de K não corrobora com a eficiência de absorção de K. Essas informações credenciam o feijão de porco como alternativa para adaptação a diferentes condições edafoclimáticas e solos de baixa fertilidade, visto que consegue absorver os nutrientes de camadas mais profundas e utilizá-los na parte aérea vegetal.

As espécies de mucuna cinza e mucuna preta foram significativamente eficientes quanto à utilização de N, P e K (Tabela 5). O sistema radicular ramificado e profundo dessas leguminosas proporciona aumento na eficiência de utilização dos adubos, uma vez que traz às camadas superficiais do solo nutrientes perdidos por lixiviação, principalmente potássio, cálcio, magnésio e nitrato, funcionando, também, como “agente minerador” de nutrientes de pouca disponibilidade como o fósforo, tornando-os mais disponíveis às culturas subsequentes (Padovam et al., 2011). Além da morfologia do sistema radicular, a eficiência de utilização de P por unidade de raiz, a atividade de fosfatase ácida e a concentração de fósforo nas raízes e na parte aérea explica a dinâmica de absorção e aquisição de P pelas diferentes espécies de cobertura. Barros et al., (2017) avaliando a extração de nutrientes e o potencial de diferentes espécies vegetais, visando o fornecimento de nutrientes à cultura sucessora, verificaram que a mucuna preta apresentou os maiores acúmulos de todos os macronutrientes, com destaque para o N, P, K e Mg, o que configura a elevada capacidade da espécie na absorção e utilização dos nutrientes.

Tabela 5. Eficiência de absorção e utilização de macronutrientes por diferentes plantas de cobertura cultivadas em ambiente protegido.

Planta de cobertura	Eficiência de absorção mg g <sup>-1</sup>		
	N	P	K
Feijão de porco	65.45 a	4.43 a	28.49 bc
Lab-lab	36.08 cd	3.59 b	24.23 bc
Mucuna cinza	33.36 d	2.27 c	16.46 c
Mucuna preta	36.17 cd	2.44 bc	20.18 c
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	44.02 cd	2.82 bc	24.39 bc
<i>Crotalaria breviflora</i>	57.44 ab	4.47 a	39.01 a
<i>Crotalaria spectabilis</i>	53.77 ab	4.37 a	42.29 a
CV (%)	30.76	28.63	30.80
Planta de cobertura	Eficiência de utilização g <sup>2</sup> .mg <sup>-1</sup>		
	N	P	K
Feijão de porco	6.11 b	92.00 a	11.04 a
Lab-lab	5.81 b	57.56 b	6.64 b
Mucuna cinza	8.20 a	114.75 a	10.79 a
Mucuna preta	7.14 a	106.26 a	14.35 a
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	5.87 b	92.26 a	5.09 b
<i>Crotalaria breviflora</i>	3.80 c	48.22 b	4.22 b
<i>Crotalaria spectabilis</i>	3.98 c	49.37 b	4.10 b
CV (%)	26.48	23.49	38.76

Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (Coeficiente de variação).

As doses de P exerceram efeito crescente e significativo ( $p \leq 0.05$ ) sobre a produção de massa fresca da parte aérea (Figura 2A), massa seca da parte aérea (Figura 2B), massa seca da raiz (Figura 2C) e massa seca total (Figura 2D) das diferentes plantas de cobertura. As maiores produtividades foram obtidas na dose de 160 kg ha<sup>-1</sup> de P, o que revela efeito positivo da adubação fosfatada sobre o crescimento e desenvolvimento de plantas de cobertura, demonstrando que estas culturas são muito eficientes na utilização do P no solo, oriundo da adubação fosfatada mineral. No presente estudo foi utilizado como fonte de fósforo o superfosfato triplo, e sabe-se que as características de reatividade das fontes de P são de grande importância em relação à sua eficiência em curto prazo. Os fosfatos de maior reatividade, sendo mais prontamente disponíveis, favoreceram a absorção e o aproveitamento do nutriente pelas plantas (Silva et al., 2011).

Outro aspecto, é que a maior disponibilidade de P pode desencadear mudanças na fotossíntese, pela maior captação da radiação solar e incremento na produção de fotoassimilados, pois o P atua como agente formador da molécula de ATP e em condição de

baixa produção de ATP o crescimento das plantas é diretamente afetado (Rocha, 2016). No presente estudo o teor de fósforo no solo considerando o percentual de argila encontrava-se com  $5 \text{ mg dm}^{-3}$ , teor considerado muito baixo, o que justifica a resposta crescente das variáveis produção de massa seca da parte aérea e total em função de doses crescentes de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicados na semeadura.

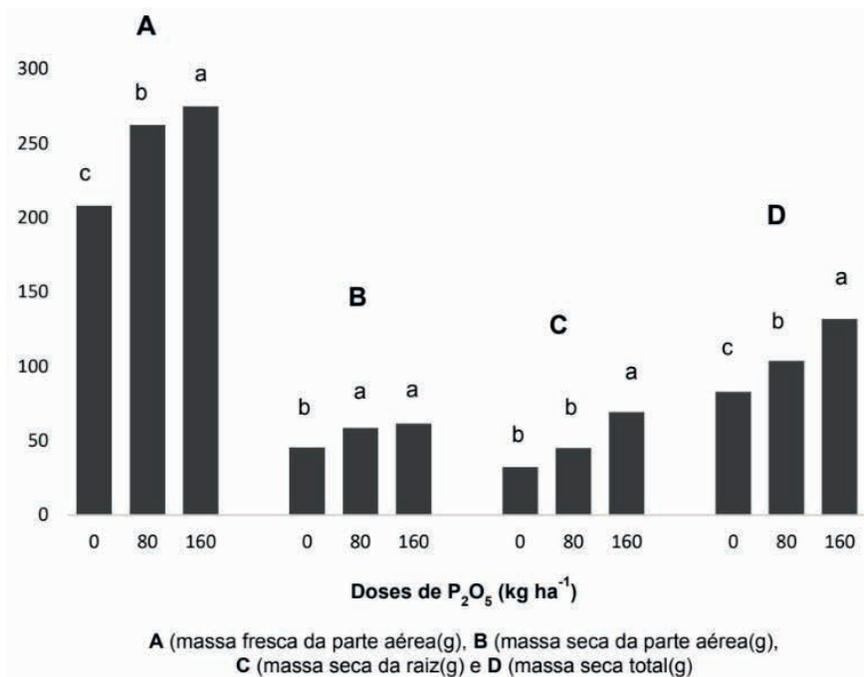


Figura 2. Produção de massa fresca da parte aérea (A), massa seca da parte aérea (B), massa seca da raiz (C) e massa seca total (D) de plantas de cobertura em resposta a adubação fosfatada. Médias seguidas da mesma letra nas barras, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O teor de N na parte aérea (Figura 3A) e o teor de nitrogênio na raiz (Figura 4A), responderam significativamente ( $p \leq 0.05$ ) ao incremento das doses de P, sendo a máxima concentração de N nas folhas e raízes de  $22.90 \text{ g.kg}^{-1}$  e  $12.55 \text{ g.kg}^{-1}$ , respectivamente, obtida na dose  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, diferindo estatisticamente do tratamento controle e da dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de P. Esse aumento nos teores foliares e radiculares de N com a aplicação da adubação fosfatada corroboram a maior eficiência de utilização do N pelas plantas de cobertura, na ordem de  $7.03 \text{ g}^2.\text{mg}^{-1}$  (Figura 5A). O nitrogênio é um dos nutrientes que mais limitam o crescimento das plantas nos trópicos. Portanto, o uso de adubos verdes capazes de realizar a fixação biológica de nitrogênio eficientemente, pode representar contribuições consideráveis na viabilidade econômica e sustentabilidade dos sistemas de produção (BODDEY et al., 1997), a partir da substituição total ou parcial da adubação nitrogenada da cultura sucessora.

Quando observados os teores de P e K na parte aérea e nas raízes, não houve diferença significativa entre as doses de 80 e 160 kg ha<sup>-1</sup> de P aplicadas na sementeira (Figura 3B, 3C, 4B, 4C), no entanto a eficiência de utilização do P e do K foram superiores na dose de 160 kg ha<sup>-1</sup> de P, cujos valores foram de 94.3 g<sup>2</sup>.mg<sup>-1</sup> e 16.55 g<sup>2</sup>.mg<sup>-1</sup> g.kg<sup>-1</sup>, respectivamente, diferindo estatisticamente do tratamento controle e da dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> de P (Figura 5B e 5C). A partir dos dados, é possível inferir que houve um aumento na eficiência de utilização do P e do K na ordem de 31% e 106%, respectivamente, em relação ao controle (0 kg ha<sup>-1</sup> de P), quando aplicado a dose de 160 kg ha<sup>-1</sup> de P.

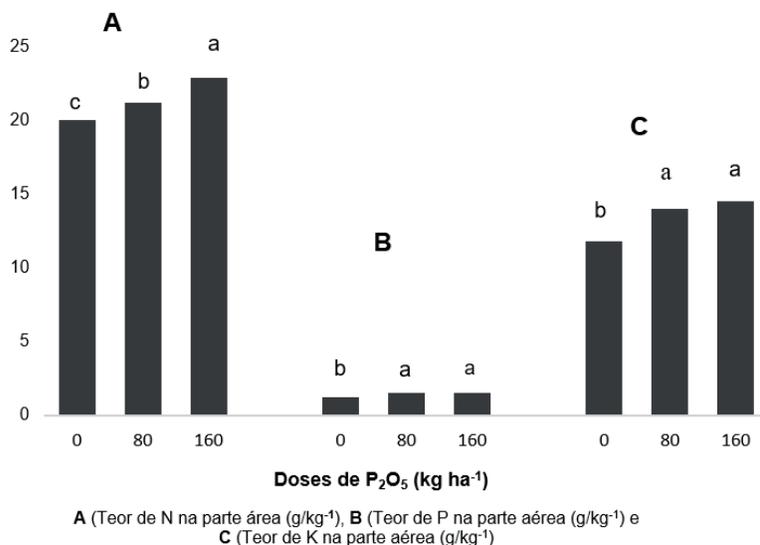
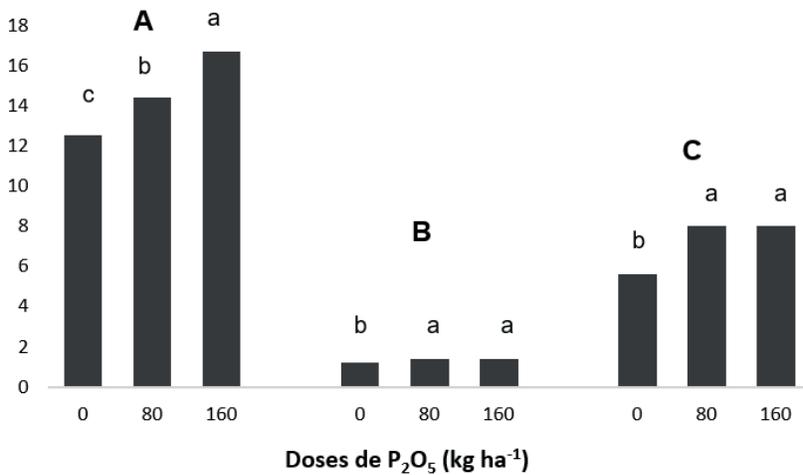
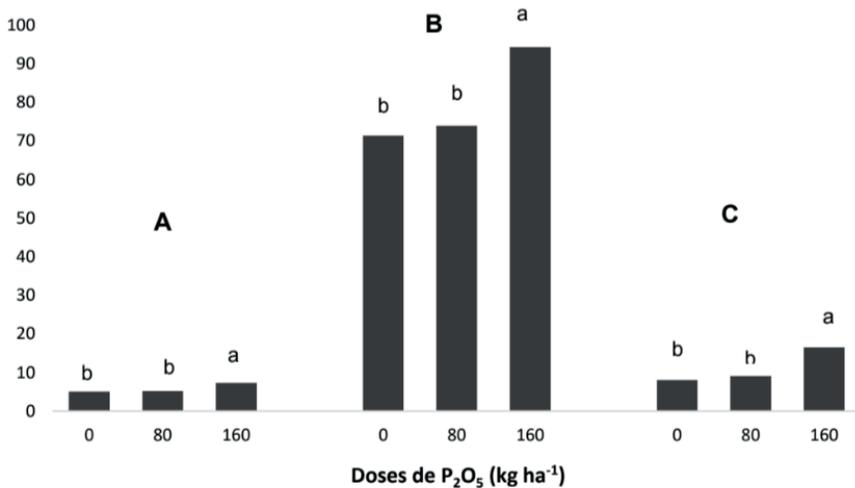


Figura 3. Teor de N na parte aérea (A), teor de P na parte aérea (B) e teor de K na parte aérea (C) de plantas de cobertura em resposta a adubação fosfatada. Médias seguidas da mesma letra nas barras, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



A (Teor de N na raiz (g/kg<sup>-1</sup>), B (Teor de P na raiz (g/kg<sup>-1</sup>) e C (Teor de K na raiz (g/kg<sup>-1</sup>))

Figura 4. Teor de N na raiz (A), teor de P na raiz (B) e teor de K na raiz (C) de plantas de cobertura em resposta a adubação fosfatada. Médias seguidas da mesma letra nas barras, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



A (Eficiência de utilização do N (g<sup>2</sup>.mg<sup>-1</sup>), B (Eficiência de utilização do P (g<sup>2</sup>.mg<sup>-1</sup>) e C (Eficiência de utilização do K (g<sup>2</sup>.mg<sup>-1</sup>))

Figura 5. Eficiência de utilização do N (A), eficiência de utilização do P (B) e eficiência de utilização do K (C) por plantas de cobertura em resposta a adubação fosfatada. Médias seguidas da mesma letra nas barras, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No desdobramento da interação dupla, sem utilizar adubação fosfatada ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de P), apenas com o objetivo de quantificar os nutrientes reciclados pelas espécies de cobertura, constatou-se que as *Crotalaria ochroleuca*, *breviflora* e *spectabilis* foram estatisticamente superiores às demais plantas de cobertura no acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea, conferindo potencial de retorno dos nutrientes ao solo, via mineralização da biomassa (Tabela 6). Na dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, as espécies supracitadas continuaram a responder positivamente a adubação fosfatada aumentando os teores de N, P e K em seus tecidos e diferindo estatisticamente ( $p < 0.05$ ) do controle ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de P); e em doses mais elevadas de fósforo, houve redução no acúmulo de nutrientes na parte aérea, mesmo não apresentando diferença estatística significativa entre as doses de  $80$  e  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de P (Tabela 6). O incremento médio nos teores de N, P e K na parte aérea para espécies de *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria breviflora* e *Crotalaria spectabilis* foram na ordem de 18.50%, 16.55% e 12.63%, respectivamente, quando comparado ao tratamento controle e adubado com  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de P. Assim, o efeito positivo da adubação fosfatada é evidente em doses moderadas de fósforo, e as espécies de crotalaria apresentam tolerância significativa a solos de baixa fertilidade e com níveis baixos de P.

Observa-se que as espécies Lab-lab, mucuna cinza, mucuna preta, *Crotalaria breviflora* e *Crotalaria spectabilis* foram estatisticamente superiores às demais plantas de cobertura no acúmulo de nitrogênio na raiz, na ausência de adubação fosfatada (Tabela 7). Quando adubado com  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de P, as espécies mucuna cinza, mucuna preta responderam a adubação fosfatada aumentando os teores de N na raiz na ordem de 36% e 32%, respectivamente, quando comparado ao controle não adubado, e diferindo estatisticamente ( $p < 0.05$ ) da dose de  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de P; enquanto que o maior incremento no teor de K na raiz foi observado para mucuna preta, *Crotalaria breviflora* e *Crotalaria spectabilis* na dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de P (Tabela 7). Quanto aos teores de P na raiz, as espécies Lab-lab apresentou os maiores incrementos do nutriente relação ao controle, na dose mais elevada de P ( $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de P) (Tabela 7), corroborando aos resultados encontrado individualmente para as espécies, conforme mostra tabela 4.

As espécies de mucuna cinza e mucuna preta foram significativamente eficientes quanto à utilização de N, P e K na dose de  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de P (Tabela 8), corroborando os resultados encontrados e apresentados na Tabela 5 e Figura 5, além de apresentarem a maior produção de massa seca da raiz, o que confere as espécies maior volume radicular.

Tabela 6. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e doses de fósforo para teores de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea.

Planta de cobertura	Teor de N na parte aérea (g/kg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	17.53 cdA	19.55 bA	20.36 bcA
Lab-lab	16.78 dA	18.12 bA	18.26 cA
Mucuna cinza	18.36 cdB	23.63 abA	22.97 bA
Mucuna preta	21.84 abB	25.22 aA	21.02 bcB
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	23.70 aB	26.77 aA	29.43 aA
<i>Crotalaria breviflora</i>	21.18 abB	25.62 aA	21.08 bcB
<i>Crotalaria spectabilis</i>	20.62 abcB	25.41 aA	22.36 bB

Planta de cobertura	Teor de P na parte aérea (g/kg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	0.90 bB	1.26 dA	1.32 cA
Lab-lab	1.49 aB	1.66 abAB	1.84 aA
Mucuna cinza	0.98 bB	1.31 cdA	1.28 cA
Mucuna preta	0.96 bB	1.41 cdA	1.48 bcA
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	1.35 aB	1.61 abA	1.51 bcA
<i>Crotalaria breviflora</i>	1.62 aA	1.60 abA	1.48 bcB
<i>Crotalaria spectabilis</i>	1.39 aB	1.86 aA	1.61 abB

Planta de cobertura	Teor de K na parte aérea (g/kg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	10.75 cA	12.65 cA	11.33 bcA
Lab-lab	11.93 cC	15.64 abA	13.59 bB
Mucuna cinza	9.98 cB	12.45 cA	8.86 cB
Mucuna preta	12.21 bcA	13.61 bcA	12.05 bA
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	18.80 aA	15.56 abB	11.49 bcC
<i>Crotalaria breviflora</i>	15.05 aA	14.35 abA	12.83 bB
<i>Crotalaria spectabilis</i>	19.12 aA	17.12 aAB	15.31 aB

As letras minúsculas separam as médias dentro de cada coluna e as maiúsculas separam as médias dentro da linha. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 7. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e doses de fósforo para teores de nitrogênio, fósforo e potássio na raiz.

Planta de cobertura	Teor de N raiz (g/kg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	10.23 bB	18.02 aA	18.32 aA
Lab-lab	13.66 aA	14.18 bA	14.38 bA
Mucuna cinza	13.61 aB	18.51 aA	13.59 bcB
Mucuna preta	13.82 aC	18.25 aA	16.27 abB
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	9.53 bC	17.14 abA	15.74 abB
<i>Crotalaria breviflora</i>	13.17 aAB	15.55 abA	10.33 cB
<i>Crotalaria spectabilis</i>	13.87 aB	16.36 abA	15.53 abA

Planta de cobertura	Teor de P na raiz (g/kg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	1.09 cB	1.39 bA	1.48 abA
Lab-lab	1.36 aB	1.63 aA	1.64 aA
Mucuna cinza	1.22 bA	1.34 bA	1.25 cdA
Mucuna preta	1.05 cB	1.34 bA	1.38 bcA
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	1.18 bA	1.10 cA	1.16 dA
<i>Crotalaria breviflora</i>	1.34 aA	1.29 bA	1.39 bcA
<i>Crotalaria spectabilis</i>	1.22 cB	1.41 bA	1.49 abA

Planta de cobertura	Teor de K na raiz (g/kg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	6.48 cA	8.87 bA	7.17 abA
Lab-lab	7.91 bcA	8.00 bA	5.53 bcA
Mucuna cinza	7.77 bcAB	9.11 bA	4.96 bcB
Mucuna preta	6.69 bcB	11.32 aA	8.39 abB
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	7.49 bcA	4.27 cB	2.87 cB
<i>Crotalaria breviflora</i>	12.87 aA	10.86 aB	9.81 aB
<i>Crotalaria spectabilis</i>	10.36 abA	10.70 aA	8.32 abB

As letras minúsculas separam as médias dentro de cada coluna e as maiúsculas separam as médias dentro da linha. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 8. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e doses de fósforo para eficiência de utilização de nitrogênio, fósforo e potássio.

Planta de cobertura	Eficiência de utilização do N (g <sup>2</sup> .mg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	6.76 abA	5.72 aA	6.86 bcA
Lab-lab	4.30 bcB	6.00 aAB	7.14 bA
Mucuna cinza	6.18 abB	5.85 aB	12.57 aA
Mucuna preta	7.47 aA	6.47 aA	7.50 bA
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	3.86 cC	5.29 aB	8.46 bA
<i>Crotalaria breviflora</i>	3.25 cA	3.36 bA	4.79 cA
<i>Crotalaria spectabilis</i>	3.65 cA	3.53 bA	4.76 cA

Planta de cobertura	Eficiência de utilização de P (g <sup>2</sup> .mg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	105.11 aA	85.54 abB	85.35 cB
Lab-lab	46.45 cA	59.12 cdA	67.11 dA
Mucuna cinza	91.55 abB	92.08 abB	160.61 aA
Mucuna preta	95.57 abA	101.15 aA	122.06 aA
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	51.38 bcC	89.50 abB	135.92 bA
<i>Crotalaria breviflora</i>	39.29 cA	49.54 dA	55.83 dA
<i>Crotalaria spectabilis</i>	48.04 cA	40.38 dA	59.70 dA

Planta de cobertura	Eficiência de utilização do K (g <sup>2</sup> .mg <sup>-1</sup> )		
	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	80	160
Feijão de porco	11.04 abA	9.46 aA	11.65 bA
Lab-lab	6.64 abA	7.91aA	12.39 bA
Mucuna cinza	10.79 abB	12.27 aB	33.41 aA
Mucuna preta	14.35 aA	11.50 aA	13.70 bA
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	5.09 abB	11.75 aB	30.22 aA
<i>Crotalaria breviflora</i>	4.22 bA	5.67 aA	7.01 bA
<i>Crotalaria spectabilis</i>	4.10 bA	4.72 aA	7.47 bA

As letras minúsculas separam as médias dentro de cada coluna e as maiúsculas separam as médias dentro da linha. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Contudo, a utilização dessas plantas de cobertura de solo para adubação verde em sistemas de sucessão ou rotação de culturas tem grande capacidade de depositar quantidades expressivas de massa seca ao solo, e a ciclagem e o acúmulo de nutrientes na parte aérea podem reduzir a utilização de fertilizantes químicos aplicados na cultura subsequente e contribuir para o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável na região amazônica, com a premissa de preservação do meio produtivo.

## CONCLUSÕES

O feijão de porco proporcionou maior produtividade de massa fresca, massa seca da parte aérea, teor de P na parte aérea e maior eficiência de absorção de N e P.

Os teores de N e P nas raízes de Lab-lab foram superiores na dose mais elevada de P (160 kg ha<sup>-1</sup> de P), sem estreita relação com o aporte de massa seca da parte aérea.

A dose de 160 kg ha<sup>-1</sup> de P exerceram efeito crescente e significativo sobre a produção de massa fresca e massa seca da parte aérea, teor de N, P e K na parte aérea, teor de N, P e K na raiz e eficiência de utilização de N, P e K pelas diferentes plantas de cobertura.

A dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> de P aumentou os teores de N, P e K na parte aérea de *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria breviflora* e *Crotalaria spectabilis*; e em doses mais elevadas de fósforo, houve redução no acúmulo de nutrientes.

As espécies de mucuna cinza e mucuna preta foram eficientes quanto à utilização de N, P e K na dose de 160 kg ha<sup>-1</sup> de P.

O uso dessas plantas de cobertura configura potencial para a melhoria da dinâmica de nutrientes no solo e alternativa de manejo que contribui para a manutenção e melhoria da qualidade do solo em bioma amazônico.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 22, n. 6, p.1003-1011, 2003.

BARROS, D.L.; GOMIDE, P.H.O.; CARVALHO, G.J. Plantas de cobertura e seus efeitos na cultura em sucessão. Bioscience Journal, v.29, n.2, p. 308-318, 2013.

BODDEY, R. M. et al. The contribution of biological nitrogen fixation for sustainable agricultural systems in the tropics. Soil Biology and Biochemistry, v. 29, n. 5/6, p. 787-799, 1997.

BORTOLUZZI, M.P.; HELDWEIN, A.B.; LEONARDI, M.; HINNAH, F.D.; LOOSE, L.H. Crescimento, acúmulo de fitomassa e produtividade do feijão de porco em diferentes datas de semeadura. Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences. v.62, n.1, p. 1-7, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA – EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.- 2. Ed, Brasília., Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

FISCHLERAB, M.; WORTMANN, C. S.; FEIL, B. *Crotalaria* (*C.ochroleuca* G Don.) as a green manure in maize-bean cropping systems in Uganda. Field Crops Research, Amsterdam, v. 61, n. 2, p. 97-107, 1999.

FERNANDES, C.; MURAOKA, T. Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solos de cerrado. Scientia Agrícola, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 781-787, 2002.

HALL, H. et al. Cover crops alter phosphorus soil fractions and organic matter accumulation in a Peruvian cacao agroforestry system. *Agroforestry Systems*, v. 80, n. 3, p. 447–455, 6 jul. 2010.

MAUAD, M.; SANTANA, R. S.; CARLI, T. H.; CARLI, F.; VITORINO, A.C.T.; MUSSURY, M.; RECH, J. Dry matter production and nutrient accumulation in *Crotalaria spectabilis* shoots. *Journal of Plant Nutrition*, n.42, v.6, p.615-625, 2019.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG: UFV, DPS, 1999. 399 p.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa, v. 2, p. 393-486. 2002.

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

PEREIRA, A.P.; SCHOFFEL, A.; KOEFENDER, J.; CAMERA, J.N.; GOLLE, D.P.; HORN, R.C. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. *Revista de Ciências Agrárias*, n.40, v. 4, p. 799-807, 2017.

ROCHA, W. S. Inoculação e doses de fósforo em feijão-caupi no sul do Estado do Tocantins. Gurupi: UFT, 2016. 56 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2016.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimations and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SILVA, T.O.; FURTINI NETO, A.E.; CARNEIRO, L.F.; PALUDO, V. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 32, n. 4, p. 1315-1326, 2011.

SILVA, F. N.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; MAGALHÃES, C. A. S.; CARNEIRO, D. N. M. Crescimento e produção de grãos da soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1220-1227, 2009.

SOARES, I.; LIMA, S. C.; CRISÓSTOMO, L. A. Crescimento e composição mineral de mudas de gravioleira em resposta a doses de fósforo. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 38, n. 4, p. 343-349, 2007.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.147-168.

SWIADER, J. M. CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. *Journal of Plant Nutrition*, v.17, n.10, p.1687-1699, 1994.

WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Ed.). *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 59-168.