



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM AGRONOMIA**

JULIA ROBERTA SANCHES DE PIERI

**MIX DE PLANTAS DE COBERTURA REDUZEM O ACESSO AO POTÁSSIO NÃO
TROCÁVEL EM SOLOS ARENOSOS**



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
METRADO EM AGRONOMIA**

JULIA ROBERTA SANCHES DE PIERI

**MIX DE PLANTAS DE COBERTURA REDUZEM O ACESSO AO POTÁSSIO NÃO
TROCÁVEL EM SOLOS ARENOSOS**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. - Área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Raphael Volf

Catálogo Internacional de Publicação (CPI)

631.41
P618m

Pieri, Julia Roberta Sanches

Mix de plantas de cobertura reduzem o acesso ao potássio não trocável em solos arenosos / Julia Roberta Sanches Pieri. --
Presidente Prudente, 2025.

52 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2025.

Bibliografia.

Orientadora: Marcelo Rapahel Volf

1. Potássio trocável. 2. Brachiaria. 3. Milheto. 4. Mucuna-preta.
5. Balanço K. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “MIX DE PLANTAS DE COBERTURA REDUZEM O ACESSO AO POTÁSSIO NÃO TROCÁVEL EM SOLOS ARENOSOS”

AUTOR(A): JULIA ROBERTA SANCHES DE PIERI

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. MARCELO RAPHAEL VOLF

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em AGRONOMIA

Área de Concentração PRODUÇÃO VEGETAL, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO RAPHAEL VOLF (orientador)

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. CIRO ANTONIO ROSOLEM

UNOESTE – Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Prof. Dr. GUILHERME ANGHINONI

Pesquisador - Consultor em Solos e Nutrição de Plantas / Rondonópolis (MT)

Data da realização: Presidente Prudente, 14 de novembro de 2025.

Central de Assinaturas Eletrônicas

Sobre o documento

Assunto: Documento eletrônico
Status do documento: Concluído
Data de criação do documento: 17/11/2025 17:17
Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília
Número de assinaturas: 3
Solicitante: KEID RIBEIRO KRUGER (#6327558)

Signatários do documento

MARCELO RAPHAEL VOLF (FUNCIONÁRIO)

marcelovolf@unoeste.br
Recebido em 17/11/2025 17:17
Assinado em 17/11/2025 20:37
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 2803:9810:4202:8710:dd7:9d4e:6b80:d281
ID da assinatura: 5892621

CIRO ANTONIO ROSOLEM (SIGNATÁRIO EXTERNO)

ciro.rosolem@unesp.br
Recebido em 17/11/2025 17:17
Assinado em 17/11/2025 17:20
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 2804:14c:6181:8f40:953b:9555:fd03:f2cd
ID da assinatura: 5892622

GUILHERME ANGHINONI (SIGNATÁRIO EXTERNO)

anghinoni.solo@gmail.com
Recebido em 17/11/2025 17:17
Assinado em 17/11/2025 18:24
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 2804:250c:191c:5d00:8451:8952:1bd2:e637
ID da assinatura: 5892623

URL do documento: <https://www.unoeste.br/ca/e5b19308>

Assinatura digital do documento: 5611809927f9282b7848fa6c8b9448c81a23c3032c780cb4c79f253d4ca4602c

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista

Mantida pela EPEC - Empresa Prudentina de Educação e Cultura SA

Utilize o QRCode abaixo para conferir a autenticidade deste documento:



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pela condução do meu caminho, concedendo-me força, sabedoria e proteção em cada etapa da minha vida, por me mostrar o que é melhor e por me fortalecer diante de cada desafio.

A minha família, pelo incentivo constante, apoio incondicional e por acreditarem em mim mesmo diante das dificuldades, sendo minha maior inspiração para seguir em frente e conquistar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença constante em minha vida, por iluminar meus passos, me dar serenidade nas escolhas e renovar minhas forças diante dos desafios.

À minha família, base de todas as minhas conquistas, em especial aos meus pais, pelo amor, pelo incentivo incansável e pelo exemplo de dedicação e perseverança que sempre me inspiraram.

Ao meu orientador, Marcelo Raphael Volf, pela dedicação e orientação, que ao longo dessa caminhada se tornou também um grande amigo, por quem tenho um enorme carinho. Mesmo não sendo a minha primeira opção, mostrou-se a melhor opção, sendo exatamente a pessoa que eu precisava neste momento. Sua dedicação, paciência e apoio foram fundamentais para a realização deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

À UNOESTE, que sempre me acolheu desde a graduação, proporcionando conhecimento, crescimento pessoal e profissional, além de todo suporte necessário para a concretização deste trabalho.

Aos novos amigos que aqui conquistei e aos velhos amigos que tive a alegria de reencontrar, pelo companheirismo, apoio e pelas palavras de incentivo que tornaram essa caminhada mais leve.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo aqui minha sincera gratidão.

“Isto é uma ordem: sê firme e corajoso. Não te atemorizes, não tenhas medo, porque o Senhor está contigo em qualquer parte para onde fores”.

Josué 1:9

RESUMO

Mix de plantas de cobertura reduzem o acesso ao potássio não trocável em solos arenosos

A deficiência de potássio (K) pode ser comum nos solos brasileiros, sobretudo nos de textura arenosa, exigindo estratégias de manejo para melhorar a eficiência de uso do nutriente. Algumas espécies de plantas de cobertura possuem papel central nesse processo, pois, além de absorverem o K das frações trocável e não trocável, promovem sua ciclagem por meio da palhada, aumentando a disponibilidade superficial do nutriente. No solo o K está em diferentes frações (solução, trocável, não-trocável), as quais, em maior ou menor proporção podem regular sua disponibilidade às plantas. Este estudo avaliou o impacto de diferentes associações entre plantas de cobertura na disponibilização e utilização do K trocável (KT) e não trocável (KNT), bem como o efeito rizosférico dessas plantas na biodisponibilidade deste nutriente. Foi conduzido dois experimentos, o experimento realizado a campo na entressafra e safra do algodão em 2023/24, em Presidente Bernardes (SP), sob sistemas de plantas de cobertura na entressafra do algodão: pousio, braquiária, braquiária+milheto, milho+mucuna-preta e mix. As plantas e cobertura foram cultivadas por aproximadamente 150 dias e posteriormente dessecadas para semeadura direta do algodão. O solo foi coletado em dois momentos distintos, antes da semeadura e aos 90 DAE do algodão, nas profundidades de 0-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-80 cm. As plantas de cobertura foram amostradas antes da semeadura do algodão e as plantas de algodão no mesmo momento da segunda coleta de solo (90 DAE). Foi determinado os teores de K trocável e não trocável, balanço de K e contribuição do KNT na quantidade total de K absorvido pelo algodão. Braquiária apresentou maior produção de matéria seca e contribuiu para maiores teores de KT nas camadas superficiais do solo em comparação ao pousio. Quanto ao balanço de K, todos os sistemas usaram das reservas de KNT, sendo a braquiária o com maior aproveitamento. O experimento 2 foi conduzido em casa de vegetação da UNOESTE, em delineamento em blocos casualizados, avaliando quatro sistemas de plantas de cobertura (MIX, Braquiária, Milheto e Mucuna-preta) com e sem adubação potássica (equivalente 150 kg ha⁻¹ KCl). As plantas foram cultivadas em técnica de rizosfera planar, obtida por meio de cultivo das plantas em vasos que proporcionem a formação de tapete radicular. Após

45 dias, o solo foi fatiado em camadas milimétricas de 0-1; 1-2; 2-3; 3-4; 4-5 e 5-10 mm, para análise de K trocável e não trocável, enquanto raízes e parte aérea foram secas para determinação da matéria seca. A braquiária, tanto com ou sem aplicação de K proporcionou os maiores teores de potássio trocável (KT), enquanto o milho somente quando houve aplicação de K, no entanto o Mix gerou os menores valores com e sem aplicação, sobretudo nas camadas mais próximas a rizosfera das plantas. Para o potássio não trocável (KNT), o MIX apresentou os maiores valores em todas as profundidades, enquanto Braquiária e Milho mostraram menores concentrações.

Palavras-chave: Potássio trocável; brachiaria; milho; mucuna-preta; balanço de K.

ABSTRACT

Cover crop mixtures reduce access to non-exchangeable potassium in sandy soils

Potassium (K) deficiency can be common in Brazilian soils, especially in sandy-textured ones, requiring management strategies to improve nutrient use efficiency. Cover crops play a central role in this process, as they not only absorb K from the exchangeable and non-exchangeable fractions but also promote its cycling through straw decomposition, increasing the surface availability of the nutrient and reducing leaching losses. Potassium in the soil is found in different fractions (solution, exchangeable, non-exchangeable, and structural), which, to varying degrees, regulate its availability to plants. This study evaluated the impact of different cover crop associations on the availability and utilization of exchangeable (K_e) and non-exchangeable (K_{ne}) potassium, as well as the rhizospheric effect of these plants on the bioavailability of this nutrient. Two experiments were conducted. Experiment 1 was carried out in the field during the 2023/24 season in Presidente Bernardes (SP), under a randomized block design with five treatments, consisting of different cover crop compositions: fallow, Brachiaria, Brachiaria + millet, millet + velvet bean, and a mixed system. The cover crops were grown during the cotton off-season, fertilized, and subsequently desiccated for direct sowing of the crop. Soil samples were collected at depths of 0–10, 10–20, 20–40, 40–60, and 60–80 cm at two time points: before sowing and 90 days after emergence (DAE). The cover crops were sampled before cotton sowing, and cotton plants were sampled at the same time as the second soil collection (90 DAE). Exchangeable and non-exchangeable K contents, K balance, and the contribution of K_{ne} to the total K absorbed by cotton were determined. Brachiaria showed the highest dry matter production and contributed to higher K_e levels in the upper soil layers compared to fallow. Regarding K balance, all cover crop systems utilized reserves of K_{ne} , with millet + velvet bean showing the highest efficiency. Experiment 2 was conducted in a greenhouse at UNOESTE, under a randomized block design with eight replicates, evaluating four cover crop systems (Mix, Brachiaria, Millet, and Velvet bean) with and without K fertilization (equivalent to $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ KCl}$). Plants were cultivated using the planar rhizosphere technique, obtained by growing them in pots that allowed root mat formation. After 45 days, the soil was sliced into millimetric

layers (0–1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5, and 5–10 mm) for exchangeable and non-exchangeable K analysis, while roots and shoots were dried to determine dry matter. Brachiaria, both with and without K application, provided the highest exchangeable K (K_e) contents, while millet only showed increased K_e with K fertilization. The Mix treatment resulted in the lowest K_e values, with or without fertilization, especially in the layers closest to the plant rhizosphere. For non-exchangeable K (K_{ne}), the Mix treatment showed the highest values across all depths, whereas Brachiaria and millet exhibited lower concentrations.

Keywords: Exchangeable potassium; Brachiaria; Pearl millet; Velvet bean; potassium balance.

LISTA DE SIGLAS

K	Potássio
KT	Potássio trocável
KNT	Potássio não trocável
HNO ³	Ácido Nítrico
DAE	Dias após a emergência
mg kg ⁻¹	Miligramas por quilo
t ha ⁻¹	Toneladas por hectare
kg ha ⁻¹	Quilos por hectare
g kg ⁻¹	Gramas por quilo
TFSA	Terra fina seca ao ar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 —	Precipitação mensal e temperatura média durante o período experimental (jul/2023 – jun/2024).....	25
Figura 2 —	Balanço hídrico sequencial durante o período experimental (jul/2023 – jun/2024).....	25
Figura 3 —	Produtividade de matéria seca e concentração de potássio (K) em plantas de cobertura (A) e no algodão em sucessão (B), em função dos diferentes tratamentos.....	28
Figura 4 —	Distribuição do potássio trocável- KT (kg ha^{-1}) no perfil do solo (0–80 cm) sob diferentes sistemas de plantas de cobertura em comparação ao pousio.....	29
Figura 5 —	Distribuição do potássio não trocável- KNT (kg ha^{-1}) no perfil do solo (0–80 cm) sob diferentes sistemas de plantas de cobertura em comparação ao pousio.....	30
Figura 6 —	Contribuição de KNT (%) (barras superiores) e balanço de K (kg ha^{-1}) (barras inferiores) em diferentes sistemas de manejo.	33
Figura 7 —	Esquema de caracterização dos recipientes de PVC que receberam os solos e os tapetes de raiz.....	39
Figura 8 —	Teores de potássio trocável (KT) e não trocável (KNT) em diferentes profundidades do solo sob sistemas de plantas de cobertura, na ausência de adubação potássica.....	41
Figura 9 —	Teores de potássio trocável (KT) e não trocável (KNT) em diferentes profundidades do solo sob sistemas de plantas de cobertura, com adubação potássica.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 —	Teores de potássio trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na primeira coleta.....	31
Tabela 2 —	Teores de potássio não trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na primeira coleta.....	31
Tabela 3 —	Teores de potássio trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na segunda coleta.....	32
Tabela 4 —	Teores de potássio não trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na segunda coleta.....	32
Tabela 5 —	Teores de potássio trocável- KT (mg dm^{-3}) em diferentes profundidades do solo, na ausência de adubação potássica (SEM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.....	43
Tabela 6 —	Teores de potássio não trocável- KNT (mg dm^{-3}) em diferentes profundidades do solo, na ausência de adubação potássica (SEM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.....	44
Tabela 7 —	Teores de potássio trocável- KT (mg dm^{-3}) em diferentes profundidades do solo, na presença de adubação potássica (COM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.....	44
Tabela 8 —	Teores de potássio não trocável- KNT (mg dm^{-3}) em diferentes profundidades do solo, na presença de adubação potássica (COM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.....	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	16
2	OBJETIVO GERAL.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	K no solo.....	19
3.1.1	K e suas formas no solo.....	19
3.1.2	Interação do K no solo.....	20
3.2	Interação K solo-planta.....	20
3.2.1	Mecanismos de absorção.....	21
3.2.2	Aumentar a eficiência do uso do K.....	21
3.2.3	Plantas recicladoras de K.....	22
4	SEÇÃO I — EXPERIMENTO DE CAMPO.....	23
4.1	Introdução.....	23
4.2	Objetivo específico.....	23
4.3	Matérias e métodos.....	23
4.3.1	Local do experimento.....	23
4.3.2	Delineamento experimental.....	24
4.3.3	Implantação e manejo da área experimental.....	24
4.3.4	Coletas e análises.....	25
4.3.5	Cálculo de balanço e contribuição do potássio não trocável.....	26
4.3.6	Análises estatísticas.....	27
4.4	Resultados.....	27
4.5	Discussão.....	34
4.6	Conclusão parcial.....	36
5	SEÇÃO II — EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO.....	37
5.1	Introdução.....	37
5.2	Objetivo específico.....	38
5.3	Materiais e métodos.....	38
5.3.1	Local e delineamento experimental.....	38
5.3.2	Implantação e manejo do experimento.....	38
5.3.4	Coletas e análises.....	39
5.4	Resultados.....	40

5.5	Discussão.....	45
5.6	Conclusão parcial.....	46
6	CONCLUSÃO GERAL.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

No solo o K encontra-se em diferentes frações: solução do solo, trocável, não trocável e estrutural. O suprimento de K para as plantas ocorre sempre a partir da solução do solo, recarregada pelo K trocável, em equilíbrio com as frações não trocável e estrutural (Sparks; Huang, 1985). Solos arenosos em ambientes tropicais apresentam menores quantidades de K nas frações minerais, embora estas possam constituir fonte importante para a nutrição das plantas (Volf *et al.*, 2018, 2021, 2023).

Plantas de cobertura são de grande importância para agricultura brasileira, dado que promovem a ciclagem de nutrientes e favorecem a cultura subsequente (Rodrigues *et al.*, 2012). A utilização de leguminosas como mucuna-preta, adaptada às condições de baixa fertilidade, atua na fixação biológica de nitrogênio, fornece proteção ao solo, aumenta o teor de matéria orgânica, e acumula expressivas quantidades de NPK (Espíndola *et al.*, 2005; Rodrigues *et al.*, 2012).

O milheto e a braquiária tem como característica a rusticidade e a elevada produção de matéria seca, e por isso são comumente utilizadas para cobertura de solo (Algeri *et al.*, 2018). Possui vasta ocupação do solo devido ao sistema radicular agressivo, portanto auxilia na estruturação e aeração do solo, absorve nutrientes de camadas mais profundas e acumula no tecido vegetal, princípio básico para ciclagem dos nutrientes (Algeri *et al.*, 2018). O elevado conteúdo de carbono nos tecidos, resulta em decomposição mais lenta e maior persistentes dos resíduos no solo (Andrade *et al.*, 2022).

O manejo eficiente do K requer compreensão detalhada da sua dinâmica e do balanço no solo (Calonego; Rosolem, 2013), considerando a exportação de nutrientes pela colheita, a ciclagem promovida pelas plantas de cobertura e a utilização das frações menos solúveis como fontes para as culturas (Volf *et al.*, 2023). Diante da elevada demanda brasileira por fertilizantes potássicos e das frequentes oscilações de preço, estratégias de manejo são essenciais aumentar a eficiência do uso do nutriente (Rawashdeh; Maxwell, 2014).

Em solos arenosos, a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) favorece a lixiviação de K para camadas mais profundas, tornando necessárias práticas que aumentem a eficiência dos fertilizantes e do K oriundo do solo (Villa; Fernandes; Faquin, 2004). Plantas de cobertura, como *Urochloa ruziziensis* e milheto (*Pennisetum americanum*), absorvem K tanto da fração trocável quanto da não trocável (Benites *et*

al., 2010), possivelmente devido à ação da rizosfera, que, por meio da exsudação de ácidos orgânicos, solubiliza K não trocável, tornando-o disponível para a planta (Barré; Berger; Velde, 2009; Marschner, 2011).

A rápida liberação de K a partir de resíduos vegetais, na forma iônica, promove elevada taxa de ciclagem, aumentando a eficiência do uso do nutriente (Echer *et al.*, 2023; Garcia *et al.*, 2008). A adoção de plantas de cobertura em rotação ou sucessão com culturas agrícolas contribui para a reposição de K na camada superficial do solo, especialmente após a lixiviação do K presente nos resíduos vegetais (Echer *et al.*, 2023).

Diferentes espécies de plantas de cobertura apresentam variações na eficiência de absorção de potássio não trocável, e a combinação de espécies com distintas morfologias radiculares e padrões de exsudação ácida pode potencializar essa absorção (Costa, 2025). O manejo de plantas de cobertura em solos tropicais, com tendência de baixa capacidade de fornece K, constitui uma estratégia eficiente para aumentar a biodisponibilidade do nutriente, melhorar a fertilidade do solo e a produtividade agrícola. Nesse contexto, compreender e otimizar o manejo das plantas de cobertura, combinando espécies como braquiária, milho e mucuna-preta, pode potencializar a absorção de K não trocável, visto que diferentes morfologias radiculares e exsudação de ácidos podem promover maior ciclagem de K para a fração trocável.

2 OBJETIVO

Analisar os efeitos de diferentes combinações de plantas de cobertura do solo na disponibilidade e eficiência de utilização do potássio não trocável em solos tropicais, avaliando o potencial de biodisponibilidade de K, visando otimizar a fertilidade do solo e a produtividade das culturas agrícolas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 K no solo

3.1.1 K e suas formas no solo

O potássio no solo ocorre em diferentes frações: solução, trocável, não-trocável e estrutural (Sparks, 1987). A fração em solução, a mais solúvel, corresponde a apenas 0,1–0,2% do K total na camada arável (0–20 cm) (Villa; Fernandes; Faquin, 2004). Esse K é facilmente absorvido pelas plantas, mas pode ser lixiviado ou transferido para as frações sólidas, aumentando os estoques de K trocável e não-trocável (Volf *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2018)

O K trocável encontra-se adsorvido às cargas negativas das bordas das argilas, representando 1–2% do K total na camada arável (Sparks, 1987), e é a fração utilizada para a calibração das recomendações de fertilizantes (Garcia *et al.*, 2008). Seus teores variam com a textura do solo, sendo baixos em solos arenosos devido à reduzida matéria orgânica e baixa capacidade de troca catiônica (CTC). A ciclagem do K pelas plantas também contribui para esse estoque (Echer *et al.*, 2023; Garcia *et al.*, 2008).

O K não-trocável está fortemente ligado às argilas em diferentes posições, como bordas desgastadas ou minerais primários intercalados (Nachtigall; Raij, 2005), representando uma reserva de médio prazo (Villa; Fernandes; Faquin, 2004). Feldspatos potássicos e argilas do tipo illita, vermiculita e montmorilonita são fontes importantes dessa fração (Nachtigall; Raij, 2005; Volf *et al.*, 2021). A depleção de K nas camadas intermediárias pode ser revertida com a aplicação de fertilizantes, elevando o K não-trocável (Volf *et al.*, 2023).

Em regiões semiáridas, como em Argissolos Vermelhos estrófico e solos menos desenvolvidos, existem reservas significativas de K não-trocável (Medeiros *et al.*, 2014). Já em regiões mais intemperizadas, como o Vale do Araguaia (MT), feldspatos e minerais 2:1 são fontes relevantes dessa fração (Volf *et al.*, 2023). O manejo sustentável do potássio no solo é fundamental para otimizar sua utilização no sistema solo-planta (Calonego; Rosolem, 2013), especialmente em sistemas de plantio direto, nos quais a ciclagem de nutrientes representa um benefício adicional (Garcia *et al.*, 2008).

3.1.2 Interação do k no solo

Os minerais sólidos do solo desempenham papel fundamental na disponibilidade e ciclagem do potássio (K). Minerais como a esmectita, ricos em K, influenciam não apenas a cor do solo, mas também sua capacidade de retenção e fornecimento de nutrientes às plantas (Bortoluzzi *et al.*, 2005). Durante o intemperismo, minerais primários, como as micas, são gradualmente decompostos, liberando potássio que pode ser adsorvido pelas raízes. Esse processo gera minerais secundários, como illita e vermiculita, que continuam a fornecer K trocável e não-trocável ao longo do tempo (Nachtigall; Raij, 2005).

O K trocável, geralmente associado às cargas negativas das bordas da argila, representa a fração prontamente disponível para as plantas. Ele pode ser facilmente trocado por outros cátions na solução do solo e é utilizado como base para recomendações de fertilizantes (Moterle *et al.*, 2016). Em contraste, o K não-trocável está mais firmemente ligado à estrutura dos minerais primários ou às camadas intermediárias de argilas silicatadas, sendo liberado para a solução do solo em ritmo mais lento, dependente de processos de intemperismo mais profundos (Volf *et al.*, 2021).

A distribuição e disponibilidade do K no solo resultam da interação entre minerais, condições de intemperismo e práticas de manejo agrícola. Em solos tropicais, como os do Brasil central, onde o clima favorece elevado intemperismo, minerais primários ricos em K podem constituir uma reserva significativa de K não-trocável (Volf *et al.*, 2022, 2023). Essa fração, embora menos acessível de imediato, desempenha papel crucial na nutrição das culturas ao longo do tempo, especialmente em solos arenosos, onde outras formas de K podem ser limitadas (Echer *et al.*, 2023).

3.2 Interação potássio-solo-planta

A dinâmica do potássio no perfil do solo reflete a interação constante entre suas formas trocáveis e não-trocáveis. O K trocável é rapidamente disponibilizado às plantas por meio de processos de troca iônica na superfície das argilas, enquanto o K não-trocável passa por um processo mais gradual de liberação para a solução do solo (Nachtigall; Raij, 2005). Esse fenômeno é condicionado pela estrutura mineral e pela taxa de intemperismo, determinando a disponibilidade de potássio ao longo do tempo.

A liberação de K não-trocável ou estrutural ocorre em resposta à demanda das plantas ou à diminuição dos níveis de K na solução do solo (Volf *et al.*, 2018), sendo fundamental para garantir um suprimento contínuo do nutriente ao longo do ciclo de crescimento. À medida que as raízes absorvem K da solução do solo, estabelece-se um equilíbrio dinâmico entre as frações trocáveis e não-trocáveis, influenciando diretamente a disponibilidade do nutriente em diferentes estágios do desenvolvimento das culturas (Thompson e Ukrainczyk, 2002; Volf *et al.*, 2018).

3.2.1 Mecanismo de absorção

A absorção de potássio pelas plantas envolve mecanismos complexos que asseguram a captação eficiente desse nutriente essencial. A difusão predomina em condições de baixa concentração de K na solução do solo, enquanto o fluxo de massa torna-se mais relevante em solos com alta disponibilidade do nutriente (Johnson *et al.*, 2022; Volf *et al.*, 2018).

A capacidade de absorção de K está diretamente relacionada à demanda fisiológica das plantas e à concentração do nutriente na rizosfera. (Oliveira; Rosolem; Trigueiro, 2004). Compreender esses mecanismos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo que maximizem a eficiência de absorção de potássio pelas culturas.

3.2.2 Aumentar a eficiência do uso do k

A eficiência de absorção de potássio pelas raízes das plantas é influenciada por diversos fatores, incluindo a concentração de K no solo, a idade da planta e interações iônicas. Ácidos orgânicos liberados na rizosfera desempenham papel importante na solubilização do potássio presente em minerais não-trocáveis, facilitando sua absorção pelas raízes (Melo *et al.*, 2005). Além disso, a morfologia radicular, a interação com micorrizas e a exsudação de ácidos orgânicos são determinantes para a eficiência na utilização do K (Khanghahi *et al.*, 2018; Rengel; Damon, 2008).

A ciclagem de K por meio da decomposição da palhada de plantas de cobertura, como o milho em condições de cerrado, é fundamental para aumentar os teores de K no solo, especialmente sob a ação da água das chuvas (Calonego *et al.*, 2005). Essa prática eleva a disponibilidade de nutrientes para a cultura principal, reduzindo perdas por lixiviação e melhorando a eficiência global do uso de K no sistema agrícola.

A sincronização entre a liberação de nutrientes pelas plantas de cobertura e a demanda das culturas subsequentes é essencial para maximizar a eficácia da ciclagem de K, como observado em diversas espécies empregadas nesse manejo (Braz *et al.*, 2004; Echer *et al.*, 2023; Rocha; Silva; Echer, 2023)

3.2.3 Plantas cicladoras de K

As plantas de cobertura desempenham papel fundamental na ciclagem de K no solo, principalmente por meio da lixiviação induzida pela água das chuvas (Calonego *et al.*, 2005). Em sistemas de rotação de culturas, observa-se variação significativa na liberação de K entre as espécies, com algumas disponibilizando o nutriente imediatamente e outras de forma mais gradual (Rosolem; Calonego; Foloni, 2003).

O cultivo consorciado de leguminosas e gramíneas potencializa os benefícios das plantas de cobertura, explorando camadas mais profundas do solo graças a sistemas radiculares diversificados (Silveira, 2021). A eficiência na absorção de K está diretamente relacionada à morfologia das raízes, incluindo sua arquitetura, capacidade de absorção e interações com micorrizas e bactérias que solubilizam K (Figueiredo, 2023).

Gramíneas como *Urochloa* spp. e milho demonstram elevada eficácia na extração e ciclagem de K, absorvendo a fração adsorvida (Garcia *et al.*, 2008; Rosolem; Calonego; Foloni, 2003). A composição química e morfológica das plantas de cobertura influencia diretamente a liberação de K, especialmente durante a decomposição da palhada (Calonego *et al.*, 2005).

4 SEÇÃO I — EXPERIMENTO DE CAMPO

4.1 Introdução

O K encontra-se em diferentes frações — solução, trocável, não-trocável e estrutural — existindo uma dinâmica de interligação entre tais frações, ou seja, todas podem, mesmo que em proporções diferentes, receber e ceder K entre elas, sendo o K da solução prontamente disponível para a absorção e o K não-trocável liberado gradualmente por intemperismo ou ação da rizosfera (Nachtigall; Raij, 2005; Volf *et al.*, 2018)

Plantas de cobertura influenciam diretamente a ciclagem de K, absorvendo, armazenando e liberando o nutriente. Gramíneas e leguminosas, como *Urochloa* spp., milho e mucuna, possuem raízes com morfologia e potencial de volume diferente, contudo todas com capacidade de exsudar ácidos orgânicos, podendo aumentando a solubilização do K não-trocável e favorecendo a disponibilidade para culturas subsequentes (Calonego *et al.*, 2005; Figueiredo, 2023).

Portanto, o manejo de diferentes espécies de plantas de cobertura, isoladas ou em consórcio, pode representar uma estratégia eficaz para aumentar a eficiência de absorção de K e otimizar a fertilidade do solo. Compreender a interação entre espécies, morfologia radicular e dinâmica de K é fundamental para maximizar a produtividade agrícola em sistemas tropicais (Silveira, 2021; Volf *et al.*, 2023).

4.2 Objetivo específico

Avaliar os efeitos de diferentes espécies e combinações de plantas de cobertura na entressafra do algodão, para biodisponibilidade e eficiência de absorção do potássio não trocável em solos tropicais, visando otimizar a fertilidade do solo e a produtividade das culturas subsequentes.

4.3. Matérias e métodos

4.3.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido na safra 2023/2024, na Fazenda Experimental da Universidade do Oeste Paulista (Unoeste), em Presidente Bernardes, SP (22°07'32" S, 51°23'20" W; 475 m de altitude). O solo da área é classificado como Latossolo de textura arenosa (EMBRAPA, 2006). O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de aproximadamente 25 °C e regime pluviométrico caracterizado por estação chuvosa de outubro a março e seca de abril a setembro.

4.3.2 Delineamento experimental

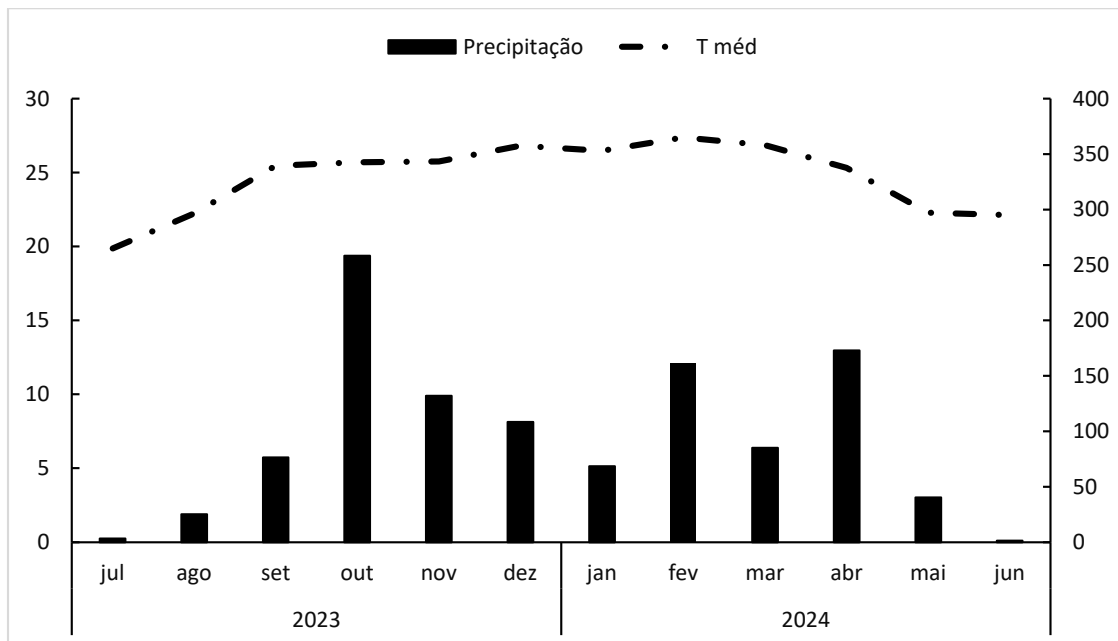
O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com cinco repetições. Os tratamentos consistiram em plantas de cobertura na entressafra do algodoeiro: i) Pousio (área mantida sem plantas, com controle químico de plantas daninhas); ii) Braquiária; iii) Braquiária + Milheto; iv) Milheto+ Mucuna-preta; e v) MIX (braquiária+ Milheto+ Mucuna-preta).

4.3.3 Implantação e manejo da área experimental

As culturas de cobertura foram semeadas na segunda quinzena de junho, após a colheita do algodão e a ocorrência da primeira chuva. A semeadura foi realizada mecanicamente, no espaçamento de 0,22 m entre linhas e profundidade de 1 cm, utilizando-se 7 kg ha⁻¹ de braquiária (*Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás), 15 kg ha⁻¹ de milho (*Pennisetum americanum*) e 21 kg ha⁻¹ de mucuna-preta (*Mucuna pruriens*). As densidades de semeadura foram mantidas tanto para cultivos individuais quanto para consórcios.

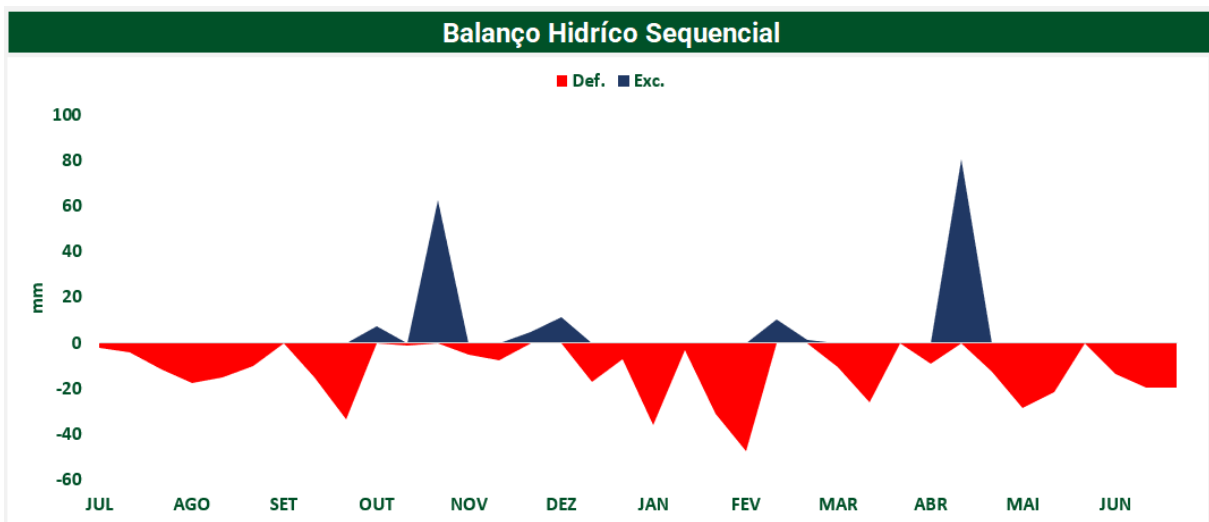
As culturas de cobertura foram dessecadas em novembro de 2023, com aplicação de glifosato na dose de 1,92 kg ha⁻¹ de ingrediente ativo (i.a.), visando à posterior semeadura direta do algodoeiro. A semeadura do algodão (cultivar precoce FM 911GLTP) ocorreu na segunda quinzena de dezembro de 2023, em espaçamento de 0,90 m entre linhas, utilizando oito sementes por metro linear. A adubação consistiu em 250 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP), fornecendo 25 e 102 kg ha⁻¹ de N e P₂O₅, respectivamente. A adubação de cobertura incluiu boro (2 kg ha⁻¹, fonte ulexita) aos 30 dias após a emergência (DAE) e cloreto de potássio, aplicado em duas parcelas: 150 kg ha⁻¹ cinco dias antes da semeadura e 150 kg ha⁻¹ aos 46 DAE.

Figura 1 — Precipitação mensal e temperatura média durante o período experimental (jul/2023 – jun/2024).



Fonte: A autora.

Figura 2 — Balanço hídrico sequencial calculado a partir dos dados da estação meteorológica da Fazenda Experimental da UNOESTE.



Fonte: A autora.

Nota: O cálculo foi realizado utilizando o método de Hoagland para estimar deficiência e excedente hídrico ao longo do período experimental (jul/2023 – jun/2024)

4.3.4 Coletas e análises

O teor de K trocável e não trocável do solo foi determinado em amostras coletadas nas profundidades de 0–10, 10–20, 20–40, 40–60 e 60–80 cm, em dois

períodos distintos. A primeira coleta ocorreu na primeira quinzena de dezembro de 2023, antes da semeadura do algodão, com as plantas de cobertura totalmente secas, quando também foi realizada a coleta da palhada em uma área de 1 m² no mesmo ponto de amostragem. A segunda coleta ocorreu aos 90 dias após a emergência das plantas de algodão, no pico de absorção de nutrientes, ocasião em que também foram coletadas plantas de algodão para análise do teor de K na planta inteira. Três subamostras por parcela foram combinadas para compor uma amostra composta.

As amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). O K trocável foi determinado pelo método da resina de troca iônica (Andrade *et al.*, 2001), enquanto o K não trocável foi obtido conforme Knudsen *et al.* (1982), utilizando 2,5 g de TFSA em 25 mL de HNO₃ 1,0 mol L⁻¹ em erlenmeyers de 125 mL, aquecidos a 110 °C por 10 min a partir do início da fervura. O extrato foi filtrado, lavado quatro vezes com 15 mL de HNO₃ 0,1 mol L⁻¹, transferido para balão volumétrico de 100 mL e completado com HNO₃ 0,1 mol L⁻¹. O teor de K foi quantificado por espectrofotometria de chama, sendo o K não trocável calculado pela diferença entre o K extraído em HNO₃ a quente e o K trocável. As plantas coletadas foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 h para determinação da matéria seca e, posteriormente, moídas para análise química de K (Malavolta *et al.*, 1997).

4.3.5 Cálculo de balanço e contribuição do potássio não trocável

O cálculo da quantidade de K removida pelos sistemas, do equilíbrio de K no solo e da contribuição do K não trocável para absorção pelas plantas de cobertura foi realizado utilizando as equações propostas por Rosolem *et al.* (2012, 2017), Volf *et al.* (2021, 2023) e Echer *et al.* (2023):

$$\Delta Ke = Ke_{final} - Ke_{inicial}$$

$$\Delta Kne = Kne_{final} - Kne_{inicial}$$

Onde *Ke* representa o K trocável e *Kne* o K não trocável; ΔK indica a variação de cada fração de K no solo; *K_{final}* corresponde ao valor de *Ke* ou *Kne* após o cultivo do algodão, e *K_{inicial}* corresponde ao valor antes do início do experimento.

O balanço de K no sistema solo-planta foi estimado pela equação:

$$K_{bal} = K_{fert} - K_{abs} - \Delta ke$$

Onde K_{bal} é o balanço de K, K_{fert} a quantidade de fertilizante K aplicada e K_{abs} a massa total de K absorvida pelas plantas. Valores negativos de K_{bal} foram interpretados como liberação e absorção de K não trocável (esgotamento de K_{ne} ou outras fontes não solúveis em HNO_3), enquanto valores positivos indicam retenção de K pelos resíduos do solo e das raízes.

A contribuição do K não trocável para a absorção total de K pelas plantas foi calculada por:

$$Contrib\ K_{ne}\ (%) = K_{bal - neg} / K_{abs} \times 100$$

Onde *Contrib K_{ne}* representa a contribuição fracionária e $K_{bal - neg}$ são os valores negativos de K_{bal} obtidos na equação anterior.

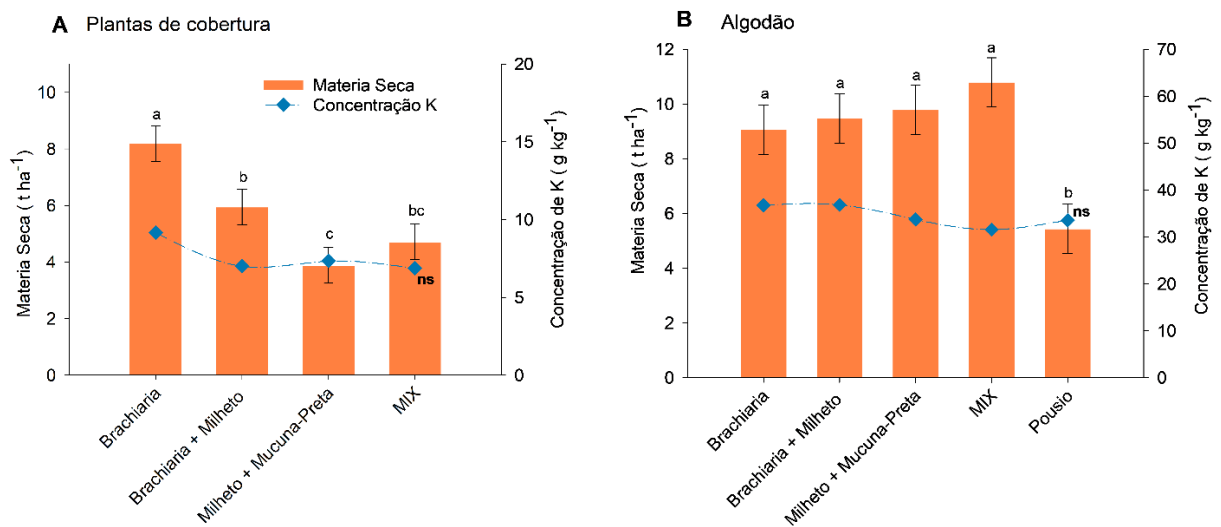
4.3.6. Análises Estatísticas

A análise estatística dos dados foi realizada com o auxílio do software AgroEstat. Após testes de homogeneidade e normalidade, os dados foram submetidos à ANOVA aplicando-se o teste t de Student (LSD) ($p < 0,05$) para comparação entre os tratamentos em cada profundidade avaliada. Para a representação gráfica dos resultados, utilizou-se o programa Sigmaplot, possibilitando a melhor visualização e interpretação das diferenças observadas.

4.4 Resultados

O sistema com apenas braquiária teve maior produção de matéria seca (Figura 3 A), enquanto o consórcio milheto + mucuna-preta a menor. Quando o algodão foi cultivado sob quaisquer sistemas de cobertura, a matéria seca foi superior em relação ao pousio (Figura 3 B). Por outro lado, não houve diferenças entre a concentração de K nos tecidos vegetais, tanto para as plantas de cobertura, quanto para o algodão.

Figura 1 — Produtividade de matéria seca e concentração de potássio (K) em plantas de cobertura (A) e no algodão em sucessão (B), em função dos diferentes tratamentos

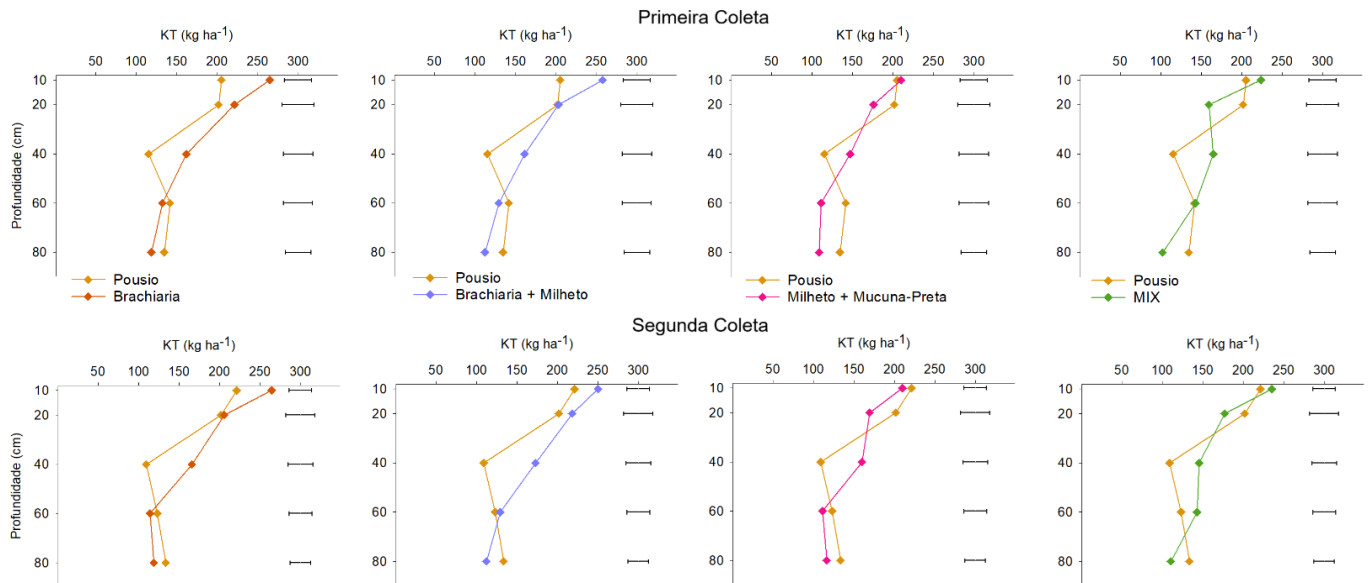


Fonte: A autora.

Legenda: Barras laranjas representam a matéria seca (t ha⁻¹) e símbolos/linha azul representam a concentração de K (g kg⁻¹). As linhas pretas indicam o desvio padrão das médias. Letras distintas diferenciam médias estatisticamente teste t de Student ($p \leq 0,05$). A indicação "ns" representa ausência de diferença estatística significativa entres os tratamentos.

Na primeira coleta de solo as primeiras camadas (0-40 cm) possui maior acúmulo de potássio trocável (KT) sob os sistemas de cobertura braquiária e braquiária + milheto em relação ao pousio (Figura 4). Fica evidente que nas coberturas, a distribuição do KT, no perfil do solo, é uniforme em comparação ao pousio. Na segunda coleta, verificou-se manutenção desse padrão, com maiores teores de KT no solo sob os sistemas braquiária e braquiária + milheto, principalmente nas camadas superficiais (Figura 4 e tabela 3).

Figura 2 — Distribuição do potássio trocável- KT (kg ha^{-1}) no perfil do solo (0–80 cm) sob diferentes sistemas de plantas de cobertura em comparação ao pousio.



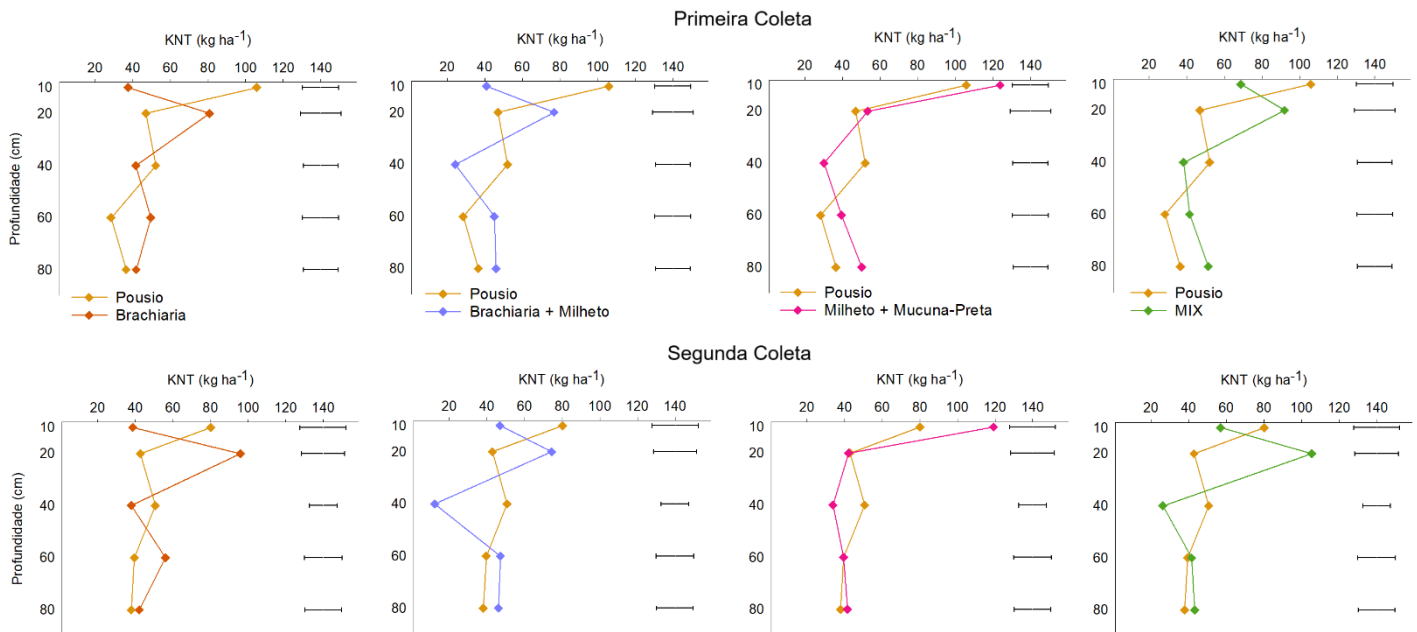
Fonte: A autora.

Legenda: As linhas pretas correspondem à Diferença Mínima Significativa (DMS/LSD) utilizada na comparação de médias pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

Nota: Primeira coleta realizada antes do plantio do algodão. Segunda coleta realizada aos 90 dias após a emergência (DAE) do algodão.

Nos resultados da primeira coleta (Figura 5 e Tabela 2), os teores de KNT se comportaram de maneira inversa ao KT em relação ao efeito das plantas de cobertura, sendo que os menores teores estavam sob a braquiária e braquiária+ milheto (0–10 cm) enquanto o pousio e milheto + mucuna-preta com os maiores valores. O que evidencia menor potencial de conversão do KNT em KT pelo milheto + mucuna este tratamento mante mais K na fração não trocável. Para segunda coleta, verificou-se redução acentuada de KNT no pousio, sugerindo a conversão dessa fração em K trocável. Nos sistemas com plantas de cobertura, os teores de KNT se mantiveram mais estáveis ao longo do tempo, indicando menor mobilização dessa reserva. Em profundidade (40–80 cm), não foram observadas diferenças consistentes entre os tratamentos.

Figura 3 — Distribuição do potássio não trocável- KNT (kg ha^{-1}) no perfil do solo (0–80 cm) sob diferentes sistemas de plantas de cobertura em comparação ao pousio.



Fonte: A autora.

Legenda: As linhas pretas correspondem à Diferença Mínima Significativa (DMS/LSD) utilizada na comparação de médias pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

Nota: Primeira coleta realizada antes do plantio do algodão. Segunda coleta realizada aos 90 dias após a emergência (DAE) do algodão.

Na primeira coleta, os teores de potássio trocável (Tabela 1) apresentaram decréscimo progressivo com a profundidade, independentemente do tratamento. Nas camadas superficiais (0–10 cm), os maiores valores foram observados nos tratamentos com braquiária e braquiária + milho, enquanto o pousio apresentou menores concentrações. Em camadas mais profundas (40–60 e 60–80 cm), o efeito das plantas de cobertura foi reduzido, o pousio com teores superiores.

Para o potássio não trocável (Tabela 2), verificou-se comportamento distinto entre os tratamentos. O consórcio milho + mucuna-preta apresentou os maiores valores na camada de 0–10 cm. Em profundidades intermediárias (20–40 cm), o tratamento pousio manteve valores superiores aos de braquiária e braquiária + milho. Contudo, em maiores profundidades (40–80 cm), os teores tenderam a se equilibrar entre os sistemas.

Tabela 1 — Acúmulo de potássio trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na primeira coleta.

Profundidade (cm)	Tratamentos									
	Braquiária	Braquiária + Milheto		Milheto + Mucuna Preta		MIX	Pousio			
0-10	265	a	257	a	210	bc	223	b	205	c
10-20	221	a	203	a	176	b	159	b	201	a
20-40	162	a	161	a	147	a	165	a	115	b
40-60	132	a	129	a	111	b	143	a	141	a
60-80	118	b	112	bc	108	bc	102	c	134	a

Fonte: A autora.

Legenda: Letras indicam comparação entre tratamentos (linhas) dentro de uma mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). MIX: braquiária+ milho + mucuna-preta.

Tabela 2 — Acúmulo de potássio não trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na primeira coleta.

Profundidade (cm)	Tratamentos									
	Braquiária	Braquiária + Milheto		Milheto + Mucuna Preta		MIX	Pousio			
0-10	37	d	41	d	123	a	68	c	105	b
10-20	80	b	76	b	53	c	92	a	47	c
20-40	41	b	24	d	30	cd	38	bc	52	a
40-60	49	a	45	ab	39	b	41	ab	28	c
60-80	41	bc	46	ab	50	ab	51	a	36	c

Fonte: A autora.

Legenda: Letras indicam comparação entre tratamentos (linhas) dentro de uma mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). MIX: braquiária+ milho + mucuna-preta.

Na segunda coleta, os teores de potássio trocável reduziram com a profundidade em todos os sistemas (Tabela 3). Nas camadas superficiais, braquiária e braquiária + milho mantiveram as maiores concentrações, enquanto o consórcio milho + mucuna-preta e o pousio apresentaram os menores valores. Em profundidade, as diferenças entre os tratamentos foram menos evidentes.

Para o KNT (Tabela 4), o consórcio milho + mucuna-preta apresentou os maiores valores na camada de 0–10 cm, contrastando com os demais sistemas. O tratamento pousio apresentou teores intermediários, sobretudo nas camadas de 20–40 cm. Em maiores profundidades, os valores tenderam à homogeneidade entre os sistemas de cobertura.

Tabela 3 — Acúmulo de potássio trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na segunda coleta.

Profundidade (cm)	Tratamentos									
	Braquiária	Braquiária + Milheto		Milheto + Mucuna Preta		MIX	Pousio			
0-10	264	a	250	b	210	d	235	c	221	d
10-20	206	a	218	a	169	b	177	b	201	a
20-40	166	a	173	a	160	ab	145	b	109	c
40-60	114	c	129	ab	111	c	143	a	123	bc
60-80	118	b	112	b	116	b	110	b	133	a

Fonte: A autora.

Legenda: Letras indicam comparação entre tratamentos (linhas) dentro de uma mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). MIX: braquiária+ milho + mucuna-preta.

Tabela 4 — Acúmulo de potássio não trocável (kg ha^{-1}) em diferentes profundidades do solo sob distintos sistemas de plantas de cobertura, na segunda coleta.

Profundidade (cm)	Tratamentos									
	Brachiaria	Brachiaria + Milheto		Milheto + Mucuna Preta		MIX	Pousio			
0-10	38	d	46	cd	119	a	57	c	80	b
10-20	95	a	74	b	42	c	105	a	42	c
20-40	38	b	12	d	33	b	26	c	50	a
40-60	56	a	47	ab	39	b	41	b	39	b
60-80	42	a	46	a	41	a	43	a	37	a

Fonte: A autora.

Legenda: Letras indicam comparação entre tratamentos (linhas) dentro de uma mesma profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). MIX: braquiária+ milho + mucuna-preta.

A braquiária e o milho, quando cultivados isoladamente, foram mais eficientes na conversão do K não trocável para K trocável, apresentando maiores teores de K disponível no solo em comparação ao pousio. Por outro lado, os tratamentos que incluíram a mucuna-preta (milho + mucuna e o mix com três espécies) mostraram comportamento semelhante ao pousio, com menores teores de K trocável e maiores de K não trocável.

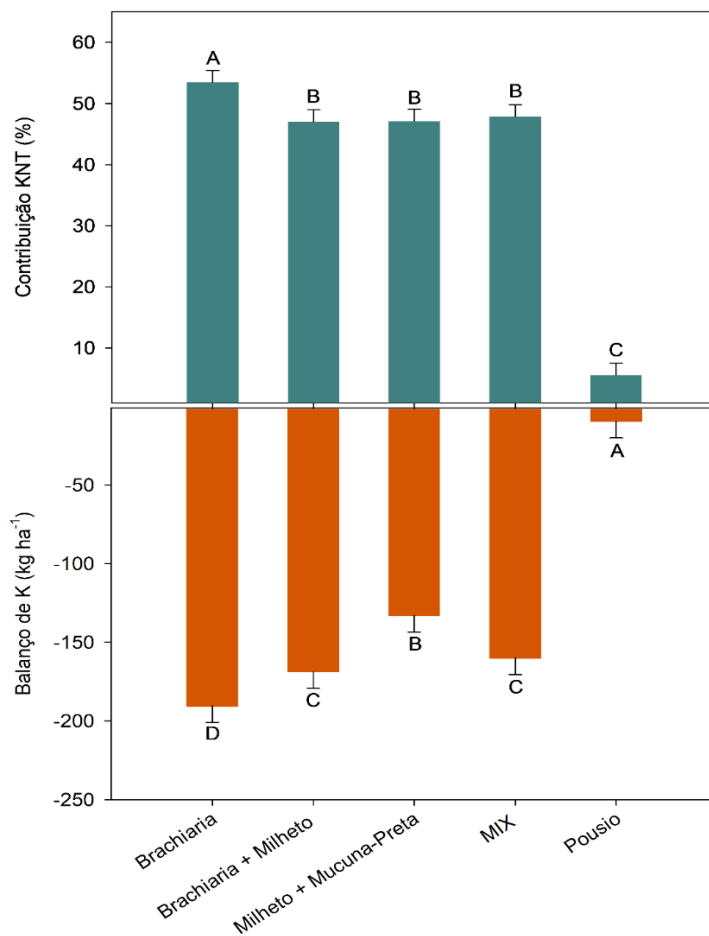
O sistema em pousio teve menor contribuição do KNT para as plantas de algodão (Figura 6), inferior aos demais tratamentos. Entre os sistemas de plantas de cobertura, milho + mucuna-preta, braquiária + milho e MIX apresentaram as maiores contribuições de KNT.

Os valores negativos observados no balanço de potássio indicam que a quantidade de K acumulada na planta de algodão foi superior ao que poderia ser suprido apenas pela fração trocável do solo.

Entre os tratamentos, a braquiária apresentou os menores valores de balanço (mais negativos), o que demonstra maior capacidade em favorecer a disponibilização de K para a planta de algodão, em relação as outras composições de coberturas e, sobretudo, ao pousio. A maior extração de K, oriundo do KNT, se refletiu também em maior percentual de contribuição do K não trocável, uma vez que a fração trocável não foi suficiente para explicar a quantidade de K acumulada na cultura.

Em contrapartida, o pousio apresentou balanço próximo de zero, evidenciando baixa contribuição do K não trocável para a nutrição do algodão, enquanto os demais sistemas de cobertura tiveram comportamento intermediário.

Figura 4 — Contribuição de KNT (%) (barras superiores) e balanço de K (kg ha^{-1}) (barras inferiores) em diferentes sistemas de manejo.



Fonte: A autora.

Legenda: As linhas pretas indicam o desvio padrão das médias. Letras distintas diferenciam médias estatisticamente teste t de Student ($p \leq 0,05$).

4.5 Discussão

Sistemas de cultivo de plantas de cobertura com base no uso de braquiária são mais eficiente na produção de matéria seca do que outros sistemas que associam outras plantas de cobertura (Rocha; Silva; Echer, 2023). Por outro lado, assim como observado neste estudo, as culturas de cobertura não influenciaram nos teores de K nas folhas do algodão (Rocha; Silva; Echer, 2023). O uso de plantas de cobertura em solos arenosos, promove melhoras ao solo, e assim beneficia a cultura sucessora podendo promover maior acúmulo de matéria seca do que em sistemas de produção sem cobertura (pousio). De acordo com Cordeiro; Rodrigues; Echer, (2022) o acúmulo de matéria seca do algodão variou conforme o tipo de cobertura e a safra, sendo maior em sistemas com culturas de cobertura de baixa biomassa (pousio e gramínea + leguminosa) na safra 2018/2019, e em sistemas de alta biomassa (gramínea e MIX) na safra 2019/2020, enquanto na safra 2023/2024 verificou-se maior acúmulo de matéria seca onde havia de cobertura vegetal.

A concentração (g kg^{-1}) de K nas plantas de algodão não teve resposta aos tratamentos o que pode ter sido em decorrência da dose de K aplicado via fertilizante. No estudo de (Rodrigues *et al.*, 2012) as espécies em consórcios estudadas não apresentaram diferença em relação ao acúmulo de potássio da parte aérea das plantas.

A camada superficial do solo (0–10 cm) é a que melhor expressa a dinâmica do potássio, uma vez que concentra maior volume radicular e recebe o K liberado pela decomposição da palhada. Nessa profundidade, a evidência de conversão do K não trocável (KNT) em K trocável (KT) foi evidente no tratamento com braquiária solteira, em comparação aos sistemas consorciados. Esse efeito pode ser comprovado pelo maior teor de KT e, simultaneamente, pela redução do KNT nesse tratamento. Por outro lado, no pousio e no mix de espécies, observou-se menor disponibilidade de KT associada a maiores teores de KNT, sugerindo menor eficiência na mobilização dessa fração. Esses resultados indicam que a braquiária, quando cultivada isoladamente, apresenta maior capacidade de promover a conversão do KNT em KT, aumentando a biodisponibilidade do nutriente no solo.

A capacidade de reciclagem das coberturas, portanto, contribui para o fornecimento de K as culturas subsequentes e para o aumento das frações mais disponíveis (Echer *et al.*, 2023; Volf *et al.*, 2018).

A braquiária apresentou maior efetividade em solubilizar o KNT do solo, evidenciando a elevada capacidade da em adquirir o nutriente do solo, inclusive de reservatórios não trocáveis, e disponibilizá-lo (Volf *et al.*, 2023). Estudos demonstram que braquiária apresenta maior habilidade de explorar o K não trocável em comparação ao milho e à soja (Volf *et al.*, 2021), sendo também comparado ao milheto e mucuna-preta.

As gramíneas por possuírem um sistema radicular extensos e volumoso aumentam a superfície de absorção, promovendo incremento de K trocável no solo por meio da liberação a partir de frações não trocáveis (Garcia *et al.*, 2008) o que potencializa o suprimento para culturas subsequentes; por exemplo, plantas de algodão cultivadas após a braquiária apresentaram maior disponibilidade de K do que aquela proveniente exclusivamente da adubação mineral (Echer; Peres; Rosolem, 2020).

Sistemas em que a mucuna-preta estava presente, observa-se redução da eficiência de conversão do KNT em KT. Esse efeito pode estar relacionado a mecanismos de antagonismo radicular, em que o sistema radicular da mucuna, de elevada atividade biológica, possa ter limitado a atuação das demais espécies. Outra possibilidade é a liberação de compostos alelopáticos ou aleloquímicos que, direta ou indiretamente, tenham inibido a atividade radicular e a rizosfera das espécies braquiária e o milheto, que possuem mais eficiência na mobilização do potássio. Assim, a presença da mucuna-preta, em vez de complementar, pode ter restringido os processos de solubilização e disponibilização do K não trocável, resultando em menor contribuição dessa fração para o K trocável do solo.

O balanço de K no sistema solo-planta mostra a relação entre as diferentes frações de K do solo que as plantas podem acessar e entradas, remoção e perda do sistema (Echer *et al.*, 2023; Rosolem; Steiner, 2017). Aparentemente, a elevada demanda do algodão excedeu o fornecimento de K da adubação e do KT, resultando na absorção de KNT. Esse processo estar relacionado à acidificação da rizosfera pela liberação de H⁺ durante a absorção, favorecendo a mobilização de K a partir de formas não trocáveis (Marschner, 2011; Volf *et al.*, 2021). Nesse contexto, o balanço

de K no sistema solo-planta reflete a interação entre os diferentes compartimentos do solo, sendo que balanços negativos indicam a absorção de KNT, enquanto balanços positivos sugerem a conversão do K aplicado em formas não trocáveis.

4.6 Conclusão parcial

A combinação dessas plantas de cobertura: braquiária + milho e mucuna-preta, desfavorece a disponibilidade e a conversão do potássio não trocável em trocável.

Visando apenas potássio as espécies braquiária e milho utilizadas de forma sozinha tem melhor eficiência na biodisponibilidade e conversão de potássio não-trocável, elevando temporariamente os níveis de potássio trocável do solo.

5 SEÇÃO II — EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO

5.1 Introdução

O K é um nutriente essencial para as plantas, participando de diversos processos fisiológicos, como a regulação osmótica, o transporte de açúcares e a ativação enzimática (Costa, 2025). Em solos tropicais, caracterizados por baixa capacidade de retenção de nutrientes, o manejo do K representa um desafio, devido à sua elevada mobilidade e às perdas frequentes por lixiviação (Villa; Fernandes; Faquin, 2004). Nesse cenário, compreender os mecanismos de absorção e ciclagem desse nutriente torna-se fundamental para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis.

A rizosfera desempenha papel determinante nesse processo, uma vez que representa a interface direta entre as raízes e o solo (Melo *et al.*, 2005; Raimam; Silva, 2023). Nessa região, ocorre intensa atividade biológica e liberação de exsudatos radiculares, como ácidos orgânicos, que promovem a solubilização de formas não trocáveis de K, tornando-o disponível às plantas (Barré; Berger; Velde, 2009; Costa, 2025; Melo *et al.*, 2005). Além disso, a morfologia das raízes, sua interação com micorrizas e a exsudação de ácidos orgânicos são determinantes para a eficiência no uso do potássio não-trocável.

As plantas de cobertura apresentam grande potencial para a ciclagem de K, atuando como cicladoras ao absorver o nutriente em diferentes profundidades e disponibilizá-lo após a decomposição de sua palhada (Rosolem; Calonego; Foloni, 2003). Gramíneas como *Urochloa ruziziensis* e milho (*Pennisetum americanum*), são capazes de absorver K tanto da fração trocável quanto da não trocável (Volf *et al.*, 2021). Já as leguminosas, além de contribuírem com a matéria orgânica, favorecem a atividade microbiana e a disponibilidade de nitrogênio (Calonego *et al.*, 2005; Garcia *et al.*, 2008; Zörb; Senbayram; Peiter, 2014).

Diante desse contexto, experimentos em casa de vegetação constituem uma ferramenta importante para avaliar, em condições controladas, as interações entre espécies de cobertura, a rizosfera e a disponibilidade de potássio para culturas subsequentes. A análise desses processos permite avançar na compreensão dos mecanismos de absorção e reciclagem de K, subsidiando estratégias de manejo que

umentem a eficiência do uso do nutriente e promovam maior sustentabilidade nos sistemas de produção agrícola.

5.2 Objetivo específico

Avaliar o efeito de diferentes espécies de plantas de cobertura na conversão e biodisponibilização de potássio não-trocável a partir do efeito rizosférico, em condições de casa de vegetação.

5.3. Matérias e métodos

5.3.1 Local e delineamento experimental

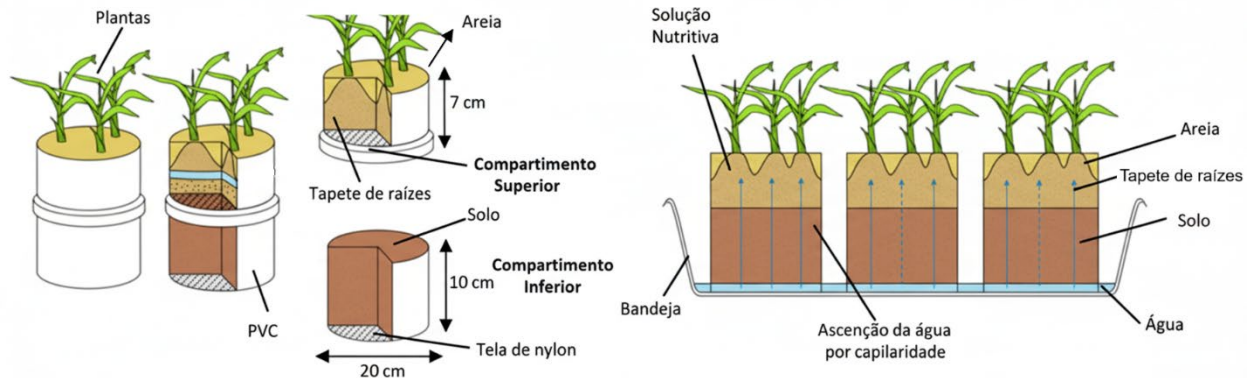
O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE). O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com oito repetições. Os tratamentos resultaram, do solo sem e com adubação, equivalente a 150kg ha^{-1} KCl, e da combinação de plantas de cobertura sendo: i) MIX (Braquiária + Milheto+ Mucuna-preta); ii) braquiária; iii) Milheto; iv) Mucuna-preta, totalizando quatro tratamentos, portanto, os tratamentos buscaram a ideia de isolar o efeito de cada espécie com a finalidade de entender se estas combinadas seriam melhores do que elas solteiras.

5.3.2 Implantação e manejo do experimento

O experimento foi conduzido conforme Volf *et al.* (2018), utilizando recipientes de PVC (10 cm de diâmetro) divididos em duas partes (Figura 7). A seção superior (7 cm de altura) foi preenchida com areia esterilizada com HCl $0,1\text{ mol L}^{-1}$ e recebeu plântulas previamente germinadas em laboratório. Para os tratamentos com uma única espécie foram 3 plântulas, e para o mix 1 plântula de cada espécie, somando 3 plântulas no recipiente. Essa camada foi separada da inferior por três camadas de tecido de nylon para impedir o crescimento radicular e simular o efeito da rizosfera. A seção inferior (10 cm de altura) foi preenchida com solo, que foi coletado do tratamento pousio do Experimento 1 na profundidade de 20 cm, onde teve a base inferior vedada com tecido para evitar perdas e permitir a entrada de água. Durante o período

experimental, foi fornecida água deionizada no fundo das bandejas que sustentavam os recipientes e, a cada sete dias, aplicou-se solução nutritiva de Hoagland sem potássio na superfície da areia.

Figura 5 — Esquema de caracterização dos recipientes de PVC que receberam os solos e os tapetes de raiz.



Fonte: A autora.

5.3.3 Coletas e análises

Após 45 dias do transplante, o solo da seção inferior foi fatiado em camadas de 0–1, 1–2, 2–3, 3–4, 4–5 e 5–10 mm. O potássio trocável foi extraído com resina de troca iônica (Andrade *et al.*, 2001), e o potássio não trocável foi obtido por extração com HNO_3 1,0 mol L^{-1} como descrito no capítulo 1 (Knudsen *et al.*, 1982) e analisado em fotômetro de chama.

Para fatiamento do solo a partir do plano rizosférico, a seção inferior dos vasos foi fixada em um cilindro metálico, e o solo foi empurrado por um disco de acrílico acoplado a uma haste metálica com rosca, avançando 1 mm a cada volta, sendo então seccionado. As raízes e a parte aérea das plantas foram coletadas, secas em estufa a 65 °C até massa constante, permitindo a determinação da matéria seca de ambas as partes.

5.3.4 Análises estatísticas

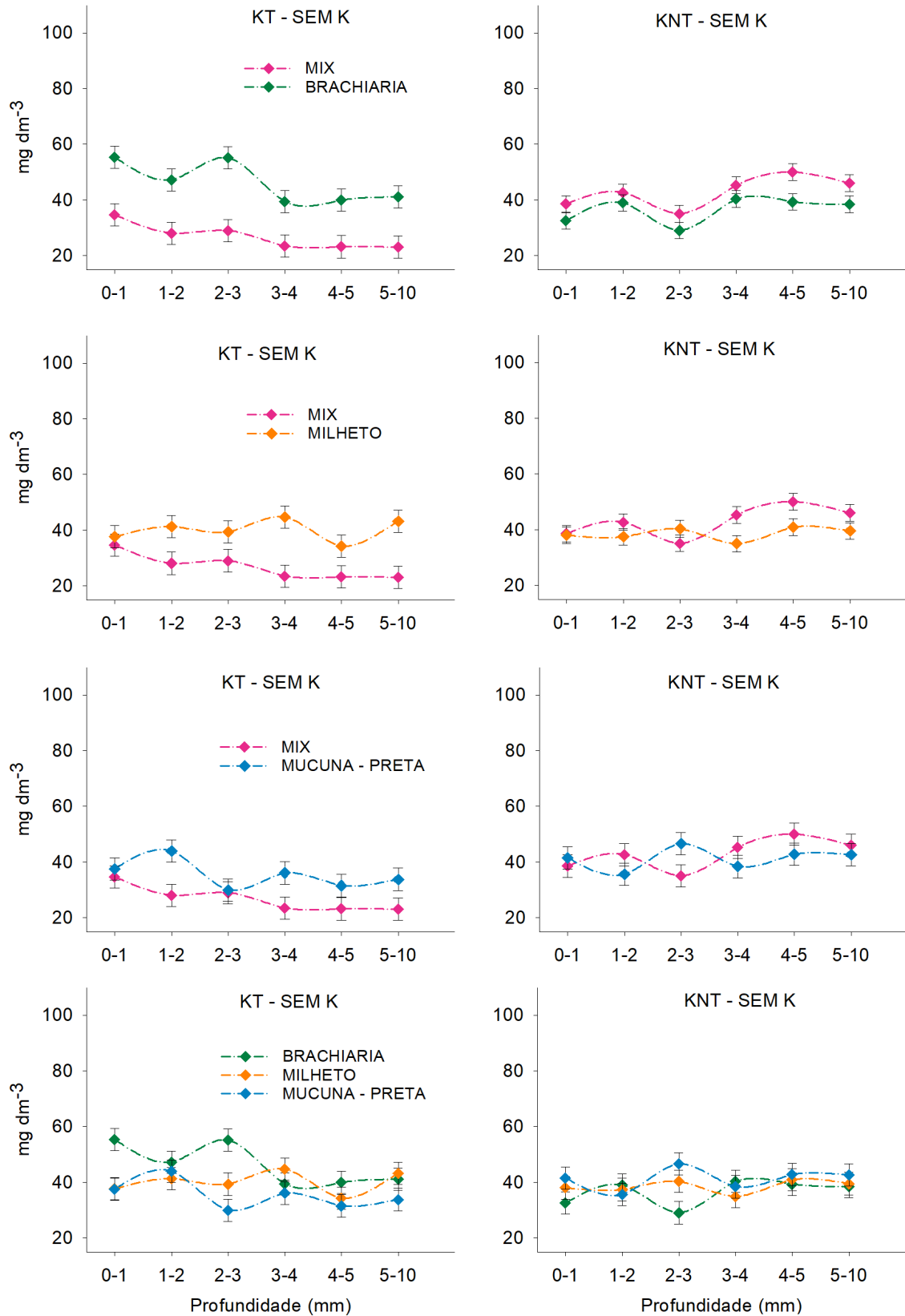
A análise estatística dos dados foi realizada com o auxílio do software AgroEstat. Após testes de homogeneidade e normalidade, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial duplo (tratamentos ×

profundidades). Quando detectadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste t de Student (LSD, $p < 0,05$). Para a representação gráfica dos resultados, utilizou-se o programa SigmaPlot, visando a adequada visualização e interpretação das interações e efeitos principais.

5.4 Resultados

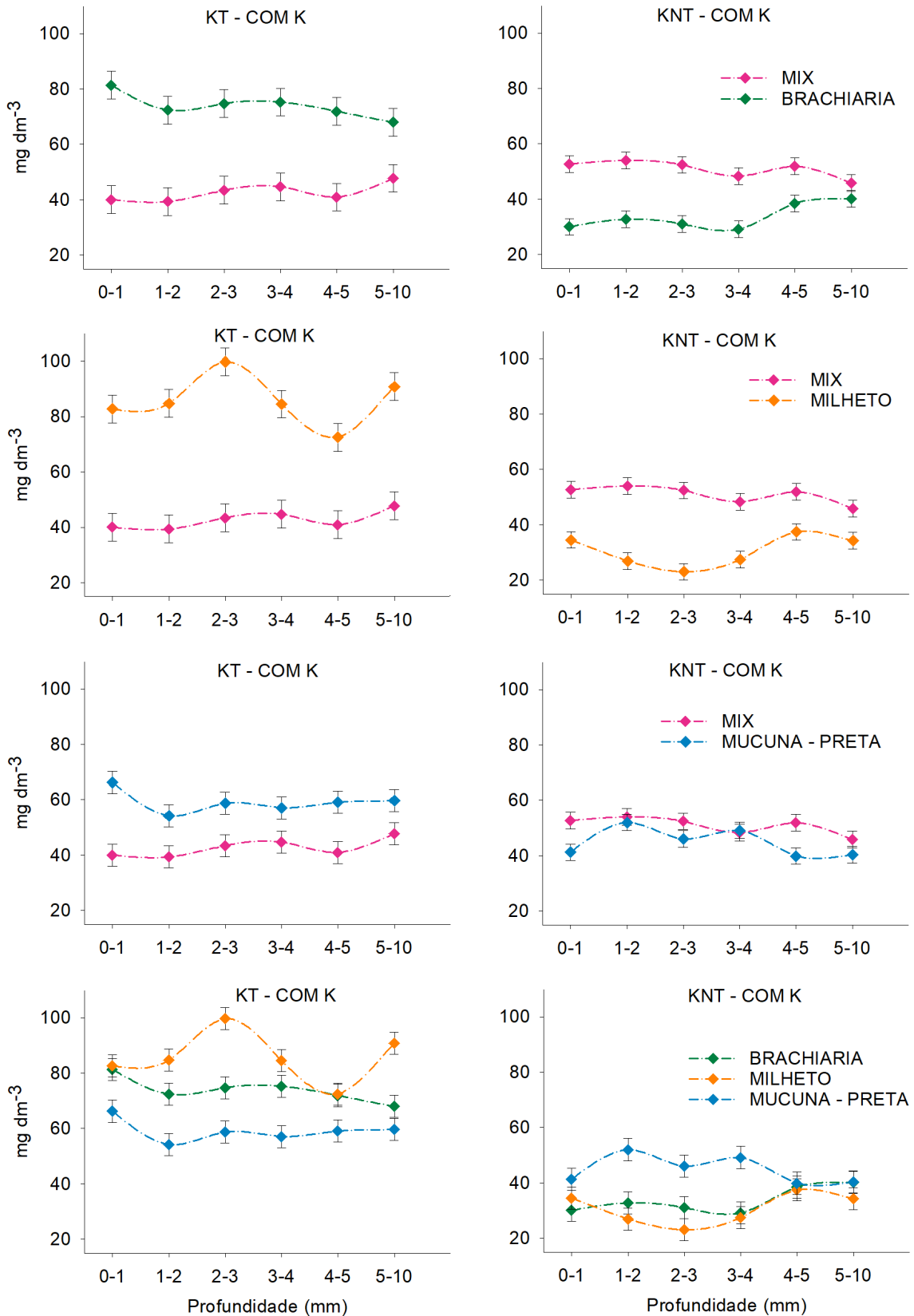
Exceto para o milho os teores de potássio trocável nos demais tratamentos sem K (Figura 8 e tabela 5) tiveram maiores concentrações nas camadas mais próximas da rizosfera (0–1 e 1–2 mm), com decréscimo em profundidade. A braquiaria destacou-se por manter os maiores valores de KT em relação ao demais. O potássio não trocável (KNT), os tratamentos MIX e mucuna-preta os teores próximos a rizosfera (0-1 e 1-20 mm) foram maiores do que ao longo da camada, enquanto a braquiaria os valores próximos as rizosferas foram menores. Sendo assim evidenciando que a absorção, de KNT, das plantas de braquiaria são maiores que o MIX e mucuna-preta.

Figura 6 — Teores de potássio trocável (KT) e não trocável (KNT) em diferentes profundidades do solo sob sistemas de plantas de cobertura, na ausência de adubação potássica.



Fonte: A autora.

Figura 7 — Teores de potássio trocável (KT) e não trocável (KNT) em diferentes profundidades do solo sob sistemas de plantas de cobertura, com adubação potássica.



Fonte: A autora.

Com aplicação de K os teores de KT foram mais elevados em todos os sistemas de cobertura (Figura 9), sendo o milho o qual apresentou os maiores valores em nas profundidades, seguido pela braquiária e pela mucuna-preta. O MIX manteve valores menores de KT em relação às demais coberturas. Os teores de KNT próximos à rizosfera (0–1 e 1–20 mm) foram mais elevados nos tratamentos com MIX e mucuna-preta, do que ao longo das camadas mais distantes. Por outro lado, nos tratamentos com braquiária e milho, observou-se o comportamento oposto, com menores teores próximos à rizosfera. Esses resultados indicam que as plantas de braquiária e milho apresentam maior capacidade de absorção de KNT em relação aos tratamentos com MIX e mucuna-preta.

Na ausência da aplicação de K, os teores de KT (Tabela 5) variaram conforme o sistema de cobertura. A braquiária teve os maiores teores em todas as profundidades, enquanto o MIX os menores valores próximos a rizosfera (0–1 mm), indicando menor disponibilidade imediata de K nessa camada. À medida que aumentou a distância da rizosfera, observou-se uma redução progressiva dos teores de K trocável em todos os tratamentos, portanto a zona de influência radicular concentra a maior parte do K disponível. Contudo, no MIX essa redução foi mais acentuada, sugerindo que a combinação de espécies não proporcionou o mesmo potencial de absorção e de KT observado nas espécies solteiras.

O KNT (Tabela 6), o comportamento foi distinto. A mucuna-preta apresentou valores mais elevados nas camadas superficiais (0–2 mm), refletindo acúmulo próximo às raízes e menor capacidade de absorção em profundidade. Em contrapartida, braquiária e milho apresentaram menores teores nas regiões próximas à rizosfera, mas mantiveram estabilidade e teores mais altos nas camadas mais distantes (> 4 mm), o que sugere maior eficiência dessas espécies em converter o KNT em formas trocáveis, absorvendo-o da região adjacente à raiz.

Tabela 5 — Acúmulo de potássio trocável- KT (mg dm^{-3}) em diferentes profundidades do solo, na ausência de adubação potássica (SEM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADE (mm)											
	0-1		1-2		2-3		3-4		4-5		5-10	
MIX	34	Ba	28	Bab	30	Cab	23	Cb	23	Cb	23	Cb
BRAQUIARIA	55	Aa	47	Aab	55	Aa	39	ABb	40	Ab	41	ABb
MILHETO	37	Bab	41	Aab	39	Bab	44	Aa	34	ABb	43	Aa

MUCUNA PRETA	37 Bab	44 Aa	29 Cb	36 Bab	31 Bb	33 Bb
--------------	--------	-------	-------	--------	-------	-------

Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos (colunas) dentro de uma mesma profundidade. Letras minúsculas indicam comparação dentro as profundidades de um mesmo tratamento (linhas), pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

Tabela 6 — Acúmulo de potássio não trocável- KNT (mg dm^{-3}) em diferentes profundidades do solo, na ausência de adubação potássica (SEM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADE (mm)					
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-10
MIX	38 Acd	42 Abc	35 Bd	45 Aab	50 Aa	46 Aab
BRAQUIARIA	32 Bb	38 ABa	29 Cb	40 ABa	39 Ba	38 Ba
MILHETO	38 ABab	37 ABab	40 Bab	34 Bb	40 Ba	39 Bab
MUCUNA PRETA	41 Aab	35 Bc	46 Aa	38 Bbc	42 Bab	42 ABab

Fonte: A autora

Legenda: Letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos (colunas) dentro de uma mesma profundidade. Letras minúsculas indicam comparação dentro as profundidades de um mesmo tratamento (linhas), pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

Com adubação potássica, os teores de potássio trocável (Tabela 7) foram mais elevados nos tratamentos com braquiária e milho, especialmente nas camadas superficiais (0–3 mm). O MIX teve os menores valores em todas as profundidades. Apesar da redução gradual com a profundidade, braquiária e Milheto mantiveram concentrações superiores até 10 mm.

Para o potássio não trocável (Tabela 8), os maiores valores foram observados no MIX, em todas as profundidades, contrastando com braquiária e milho, que apresentaram os menores teores. Em profundidade, as diferenças entre os sistemas reduziram-se, tendendo ao equilíbrio.

Tabela 7 — Acúmulo de potássio trocável- KT (mg dm^{-3}) em diferentes profundidades do solo, na presença de adubação potássica (COM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.

TRATAMENTOS	PROFUNDIDADE (mm)					
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-10
MIX	40 Ca	39 Da	43 Da	44 Ca	40 Ca	47 Ca
BRAQUIARIA	81 Aa	72 Bab	74 Bab	75 Aab	72 Aab	68 Bb
MILHETO	82 Abc	84 Ab	99 Aa	84 Ab	72 Ac	90 Aab
MUCUNA PRETA	66 Ba	54 Cb	58 Cab	57 Bab	59 Bab	59 Bab

Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos (colunas) dentro de uma mesma profundidade. Letras minúsculas indicam comparação dentro as profundidades de um mesmo tratamento (linhas), pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

Tabela 8 — Acúmulo de potássio não trocável- KNT (mg dm⁻³) em diferentes profundidades do solo, na presença de adubação potássica (COM K), sob distintos sistemas de plantas de cobertura.

TRATAMENTOS	KNT - COM K											
	PROFUNDIDADE (mm)											
	0-1		1-2		2-3		3-4		4-5		5-10	
MIX	52	Aa	54	Aa	52	Aa	48	Aab	52	Aab	45	Ab
BRAQUIARIA	30	Cc	32	Bbc	31	Cc	29	Bc	38	Bab	40	ABa
MILHETO	34	Ca	27	Bb	20	Dc	27	Bb	37	Ba	34	Ba
MUCUNA PRETA	41	Bc	52	Aa	43	Bbc	49	Aab	39	Bc	40	ABc

Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam comparação entre tratamentos (colunas) dentro de uma mesma profundidade. Letras minúsculas indicam comparação dentro as profundidades de um mesmo tratamento (linhas), pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

5.5 Discussão

Na ausência de adubação potássica, observa-se que espécies como braquiária e milheto apresentam elevada capacidade de solubilização do potássio não trocável (KNT). A braquiária, tem se destacado por promover aumento nos teores de K trocável (KT) no solo, devido à sua capacidade em converter o K de formas não trocáveis em trocável (Garcia *et al.* 2008). Esse mecanismo é favorecido pela morfologia radicular das gramíneas, que apresentam raízes finas e volumosas, capazes de explorar maiores volumes de solo e promover a conversão de KNT em KT, sobretudo nas camadas mais próximas da rizosfera. De acordo com Hinsinger *et al.* (2021), essa liberação pode contribuir com 20 a 80–90% do K efetivamente adquirido pelas plantas em poucos dias, resultado da intensa depleção de K⁺ na solução do solo na zona da rizosfera.

Quando a braquiária é consorciada com a mucuna-preta, o efeito positivo sobre a liberação de KNT tende a ser nulo. Essa resposta pode estar associada a interações químicas na rizosfera. A mucuna-preta é capaz de produzir compostos naturais ativos, incluindo o aminoácido não proteico L-3,4-dihidroxifenilalanina (L-DOPA), que possui efeito alelopático. Esse composto pode reduzir as trocas gasosas e aumentar a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), sendo uma das principais causas de redução no crescimento de capim-braquiária em condições de consórcio (Dias, 2022). Essa interação química pode explicar, em parte, o efeito nulo ou até negativo da associação entre essas espécies na disponibilidade de K no solo.

A adubação potássica, por sua vez, atua diretamente no aumento dos teores de KT no solo, favorecendo especialmente braquiária e milheto, que apresentaram valores consistentemente superiores tanto em superfície quanto em subsuperfície. Esse efeito está relacionado ao aporte direto de K e ao incremento no fluxo de massa em direção às raízes, que pode superar a própria capacidade de absorção das plantas em condições de alta disponibilidade (Volf *et al.*, 2018). Já para o KNT, os resultados evidenciam que, sem adubação, os valores permaneceram relativamente equilibrados entre os diferentes sistemas, enquanto a aplicação de K favoreceu o consórcio (MIX), que apresentou os maiores valores em todas as profundidades.

Esses resultados reforçam que as diferenças na morfologia, fisiologia e química radicular entre espécies determinam distintas estratégias de aquisição de K, influenciando a dinâmica entre KT e KNT no solo. Enquanto gramíneas como braquiária e milheto são eficientes em explorar formas não trocáveis, a mucuna-preta pode exercer efeitos alelopáticos que reduzem a eficiência de gramíneas quando cultivadas em consórcio. A exsudação radicular desempenha papel central nesse processo, estimulando a atividade microbiana e a dissolução de minerais, embora seja complexa e influenciada por interações interespecíficas (Philippot *et al.*, 2013; Hinsinger *et al.*, 2021).

5.6 Conclusão parcial

As espécies braquiária e milheto utilizadas de forma sozinha tem melhor eficiência na biodisponibilidade e conversão de potássio não-trocável, elevando temporariamente os níveis de potássio trocável do solo.

6 CONCLUSÃO GERAL

A combinação dessas plantas de cobertura: braquiária + milho e mucuna-preta, desfavorece a disponibilidade e a conversão do potássio não trocável em trocável.

Visando apenas potássio as espécies braquiária e milho utilizadas de forma sozinha tem melhor eficiência na biodisponibilidade e conversão de potássio não-trocável, elevando temporariamente os níveis de potássio trocável do solo.

REFERÊNCIAS

- ALGERI, A.; VILAR, C. C.; USHIWATA, S. Y.; REIS, R. G. E. Produção de biomassa e cobertura do solo por milheto, braquiária e crotalária cultivados em cultura pura e consorciados. **Global Science and Technology**, v. 11, n. 2, p. 112–125, 2018.
- ANDRADE, R. A.; SOUZA, F. R.; MASCARENHAS, A. R. P.; CARVALHO, C. A.; MATTIA, F. L.; OLIVEIRA, R. F. S. Taxas de cobertura e decomposição de adubos verdes na Amazônia Sul Ocidental. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 1, p. 1–15, 2022. DOI: 10.17765/2176-9168.2022v15n1e8600.
- ANDRADE, J. D., CANTARELLA, H., & QUAGGIO, J. A. (2001). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas, Instituto Agrônomo**.
- BARRÉ, P.; BERGER, G.; VELDE, B. How element translocation by plants may stabilize illitic clays in the surface of temperate soils. **Geoderma**, v. 151, n. 1, p. 22–30, 2009. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.03.004.
- BENITES, V. M.; CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, Á. V.; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. Potássio, cálcio e magnésio. In: SIMPÓSIO SOBRE BOAS PRÁTICAS PARA USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES, 2009, Piracicaba. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. **Anais...** Piracicaba: IPNI, 2010. p. 133–204.
- BORTOLUZZI, E. C.; SANTOS, D. R.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C.; TESSIER, D. Alterações na mineralogia de um argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 327–335, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000300002.
- BRAZ, A. J. B. P., DA SILVEIRA, P. M., KLIEMANN, H. J., & ZIMMERMANN, F. J. P. (2004). Acumulação de nutrientes em folhas de milheto e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 34(2), 83-87.
- CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 99–108, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000100011.
- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus and potassium balance in a corn-soybean rotation under no-till and chiseling. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 96, n. 1, p. 123–131, 2013. DOI: 10.1007/s10705-013-9581-x.
- CORDEIRO, C. F. S.; RODRIGUES, D. R.; ECHER, F. R. Cover crops and controlled-release urea decrease need for mineral nitrogen fertilizer for cotton in sandy soil. **Field Crops Research**, v. 276, e108387, 2022. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108387.

COSTA, M. M. M. N. Potássio na agricultura: potassium in agriculture. **RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, v. 1, n. 2, 2025. DOI: 10.51473/rcmos.v1i2.2025.1259.

DIAS, R. DE C. [UNESP. (2022). Efeito alelopático de mucuna-preta (*Mucuna pruriens* var. *Utilis*). <http://hdl.handle.net/11449/238509>

ECHER, F. R.; VOLF, M. R.; PERES, V. J. S.; HAFEMANN, J. A.; SILVA, G. R. A.; ROSOLEM, C. A.. Ruzigrass as cover crop improves the potassium partial balance and use by subsequent cotton. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 127, n. 3, p. 347–358, 2023. DOI: 10.1007/s10705-023-10312-x.

ESPÍNDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; DE-POLLI, H.; ALMEIDA, D. L.; ABBOUD, A. C. S. **Adubação verde com leguminosas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005. 49 p. (Coleção Saber, 5).

FIGUEIREDO, R. T. **Produtividade, absorção e exportação de nutrientes pela batata-doce sob diferentes níveis de fornecimento de potássio**. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia – Horticultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/243387>. Acesso em: 18 dez. 2025.

GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 579–585, 2008. DOI: 10.1016/j.eja.2008.01.002.

HINSINGER, P.; BELL, M. J.; KOVAR, J. L.; WHITE, P. J. Rhizosphere processes and root traits determining the acquisition of soil potassium. *In*: MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M. L. (ed.). **Improving potassium recommendations for agricultural crops**. Cham: Springer, 2021. p. 99–117. DOI: 10.1007/978-3-030-59197-7_4.

JOHNSON, R.; VISHWAKARMA, K.; HOSSEN, S.; KUMAR, V.; SHACKIRA, A. M.; PUTHUR, J. T.; ABDI, G.; SARRAF, M.; HASANUZZAMAN, M. Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 172, p. 56–69, 2022. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.01.001.

KHANGHAHI, M. Y.; PIRDASHTI, H.; RAHIMIAN, H.; NEMATZADEH, G. A.; SEPANLOU, M. G. Nutrient use efficiency and nutrient uptake promoting of rice by potassium solubilizing bacteria (KSB). **Cereal Research Communications**, v. 46, p. 739–750, 2018. DOI: 10.1556/0806.46.2018.042.

KNUDSEN D, PETERSON GA, PRATT PF. Lítio, sódio e potássio. Em: Klute A, Page AL, editores. Métodos de análise do solo: propriedades químicas e microbiológicas. 2ª ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Society of America; 1982. Parte 2. p. 225-46.

MALAVOLTA EA, VITTI GC, OLIVEIRA SA. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós; 1997.

MARSCHNER, H. (2011). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. **Academic Press**. <https://books.google.com.br/books?id=yqKV3USG41cC>

MEDEIROS, J. S.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; ARRUDA, J. A.; VIEIRA, M. Silva. Forms of potassium in representative soils of the State of Paraíba, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 2, p. 417–426, 2014. DOI: 10.1590/S1806-66902014000200025.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; RIBEIRO, A. N.; MASCHIO, P. A. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 533–545, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000400006.

MOTERLE, D. F.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. R. S.; CANER, L.; BORTOLUZZI, E. C. Impact of potassium fertilization and potassium uptake by plants on soil clay mineral assemblage in South Brazil. **Plant and Soil**, v. 406, n. 1, p. 157–172, 2016. DOI: 10.1007/s11104-016-2862-9.

NACHTIGALL, G. R.; RAIJ, B. Análise e interpretação do potássio no solo. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2., 2004, São Pedro, SP. Potássio na agricultura brasileira. **Anais...** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 93–118.

OLIVEIRA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; TRIGUEIRO, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 439–445, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000300005.

PHILIPPOT, L., RAAIJMAKERS, J. M., LEMANCEAU, P., & VAN DER PUTTEN, W. H. (2013). Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. **Nature Reviews Microbiology**, 11(11), 789–799. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>

RAIMAM, M. P.; SILVA, L. L. A complexa e dinâmica rede de respostas químicas na rizosfera. In: MELO, J. O. F. (org.). **Ciências agrárias: limites e potencialidades em pesquisa**. v. 2. 1. ed. Guarujá: Científica Digital, 2023. p. 12–28. DOI: 10.37885/230613535.

RAWASHDEH, R.; MAXWELL, P. Analysing the world potash industry. **Resources Policy**, v. 41, p. 143–151, 2014. DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.05.004.

RENGEL, Z.; DAMON, P. M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 624–636, 2008. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2008.01079.x.

ROCHA, C. H.; SILVA, G. R. A.; ECHER, F. R. Applying potassium to ruzigrass prior to cotton reduces the nitrogen requirement and improves yield in a sandy soil under low water availability. **Industrial Crops and Products**, v. 198, e116676, 2023. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116676.

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

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Potassium leaching from green cover crop residues as affected by rainfall amount. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 355–362, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000200015.

ROSOLEM, C. A., & STEINER, F. (2017). Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. **European Journal of Soil Science**, 68(5), 658–666. <https://doi.org/10.1111/ejss.1246>

SANTOS, H. G. dos, JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C. dos, OLIVEIRA, V. A. de, OLIVEIRA, J. B. de, COELHO, M. R., LUMBRERAS, J. F., CUNHA, T. J. F., & HUMBERTO GONCALVES DOS SANTOS, C. M. R. C. (2006). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2006. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/338818>

SILVEIRA, Lucas da. Manejos de plantas de cobertura e implicações nas propriedades físicas do solo, ciclagem de nutrientes e produtividade de milho silagem. 2021. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2021.

SPARKS, D. L. Potassium dynamics in soils. In: STEWART, B. A. (org.). **Advances in soil science**. v. 6. New York: Springer, 1987. p. 1–63. DOI: 10.1007/978-1-4612-4682-4_1.

SPARKS, D. L.; HUANG, P. M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R. D. (ed.). **Potassium in agriculture**. New York: John Wiley & Sons, 1985. p. 201–276. DOI: 10.2134/1985.potassium.c9.

THOMPSON, M. L., & UKRAINCZYK, L. (2002). Micac. Em Soil Mineralogy with Environmental Applications (p. 431–466). **John Wiley & Sons**, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser7.c14>

VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 649–658, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000400007.

VOLF, M. R.; BATISTA-SILVA, W.; SILVÉRIO, A. D.; SANTOS, L. G.; TIRITAN, C. S.. Effect of potassium fertilization in sandy soil on the content of essential nutrients in soybean leaves. **Annals of Agricultural Sciences**, v. 67, n. 1, p. 99–106, 2022. DOI: 10.1016/j.aogas.2022.06.001.

VOLF, M. R.; BENITES, V. M.; AZEVEDO, A. C.; MORAES, M. F.; TIRITAN, C. S.; ROSOLEM, C. A. Soil mineralogy and K reserves in soils from the Araguaia River

valley, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 33, e00654, 2023. DOI: 10.1016/j.geodrs.2023.e00654.

VOLF, M. R.; CRUSCIOL, C. A. C.; AZEVEDO, A. C.; THOMPSON, M. L.; KOVAR, J. L.; ROSOLEM, C. A. Potassium bioavailability in a tropical kaolinitic soil. **Agronomy**, v. 11, n. 10, e2016, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11102016.

VOLF, M. R.; GUIMARÃES, T. M.; SCUDELETTI, D.; CRUZ, I. V.; ROSOLEM, C. A. Potassium dynamics in ruzigrass rhizosphere. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170370, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbc20170370.

WANG, J.; ZHU, G.; DONG, Y.; ZHANG, H.; RENGEL, Z.; AI, Y.; ZHANG, Y. Potassium starvation affects biomass partitioning and sink–source responses in three sweet potato genotypes with contrasting potassium-use efficiency. **Crop and Pasture Science**, v. 69, n. 5, p. 506–514, 2018. DOI: 10.1071/CP17328.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture – status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 9, p. 656–669, 2014. DOI: 10.1016/j.jplph.2013.08.008.