

CIRCULAR TÉCNICA

142

Campina Grande, PB
Agosto, 2022

Cátions trocáveis e controle da acidez em latossolo argiloso sob sistemas de manejo e de produção de algodão, milho e soja

Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira
Ana Luiza Dias Coelho Borin
Fernando Mendes Lamas
Gilvan Barbosa Ferreira
Álvaro Vilela de Resende

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

12 CONSUMO E
PRODUÇÃO
RESPONSÁVEIS



Cátions trocáveis e controle da acidez em latossolo argiloso sob sistemas de manejo e de produção de algodão, milho e soja¹

Introdução

Os solos do Cerrado brasileiro, em geral, são naturalmente ácidos e intemperizados, apresentando níveis tóxicos de alumínio (Al^{3+}), baixos níveis de saturação por bases trocáveis, baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e reduzidos teores de matéria orgânica, além de reduzida disponibilidade de nutrientes, com exceção de ferro e manganês (Lopes; Guilherme, 2016). Não obstante essas características, são solos profundos, com condições favoráveis à mecanização e respondem às correções químicas, viabilizando a produção agrícola rentável.

A região do Cerrado contribui em grande proporção para a produção nacional de soja, de milho e de quase todo algodão (98%) produzido no País (Conab, 2021). Mas, para que isso acontecesse, os solos precisaram ser corrigidos quimicamente com calagem e adubação para aumentar o pH, neutralizar o Al^{3+} e disponibilizar nutrientes às culturas em quantidades adequadas. As adubações de manutenção também são imprescindíveis para que se consiga produzir satisfatoriamente no Cerrado, sendo um dos itens que mais pesa no custo variável da produção agrícola.

Dentre os nutrientes, o potássio (K) é o segundo mais exigido pelos vegetais. Em geral, é encontrado em baixas reservas disponíveis na maioria dos solos brasileiros, sendo necessários elevados aportes via adubações para alcançar produtividades agrícolas satisfatórias, especialmente nas culturas mais demandantes do nutriente, a exemplo do algodão. Nesse contexto, o K é primordial para a formação e a qualidade da fibra do algodão (Yang et al., 2016).

¹ Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira, D.Sc. em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Algodão, Núcleo Cerrado; Ana Luiza Dias Coelho Borin, D.Sc. em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão; Fernando Mendes Lamas, D.Sc. em Agronomia, pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste; Gilvan Barbosa Ferreira, D.Sc. em Agronomia, pesquisador da Embrapa Algodão; Álvaro Vilela de Resende, D.Sc. em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo.

Em 2018, o consumo de potássio (K_2O) na agricultura brasileira foi de aproximadamente 6,8 milhões de toneladas, equivalente a 17,5% do consumo mundial (FAO, 2020).

O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) são outros dois importantes nutrientes imprescindíveis ao desenvolvimento das plantas. A deficiência deles normalmente acontece em solos ácidos ou naqueles oriundos de material de origem com baixa concentração desses elementos, condições essas que são típicas do cerrado nativo (Lopes; Guilherme, 2016).

Geralmente, o Ca e o Mg são fornecidos por meio da calagem, operação esta que também visa a elevação do pH do solo e a neutralização do Al^{3+} . Os adubos superfosfato simples e superfosfato triplo também são importantes fontes de Ca. Este ainda pode ser fornecido por meio da gessagem, prática recomendada no manejo da cultura do algodão (Borin et al., 2019).

O calcário não apresenta elevada mobilidade para as camadas mais profundas do solo. Por isso, quando aplicado sem incorporação, o seu efeito ocorre principalmente na parte mais superficial (Borin et al., 2015). Já o gesso agrícola, que é um sal neutro, apresenta maiores solubilidade e capacidade de movimentação para as camadas mais profundas do solo; o íon sulfato (SO_4^{2-}) pode carrear os cátions K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , que podem substituir o Al^{3+} nas superfícies dos colóides. Assim, com maior força iônica na solução do solo, precipitação e formação de espécies poliméricas de $Al_x(SO_4)_z$ (x e z, espécies iônicas), com ou sem cargas residuais, o SO_4^{2-} também reduz a atividade e a concentração da espécie tóxica Al^{3+} para a planta (Caires et al., 2003).

A disponibilidade de K, Ca e Mg às plantas ocorre, principalmente, em função dos teores trocáveis existentes no solo, sendo também influenciada pelas relações entre esses cátions no complexo de troca (Borin et al., 2015). Em ordem decrescente de força de retenção aos colóides do solo estão o Al^{3+} , o Ca^{2+} , o Mg^{2+} e, por último, o K^+ , pois, nessa sequência, reduz a valência e/ou aumenta o raio hidratado do íon. Assim, a competição existente entre esses cátions pela adsorção às cargas negativas do solo favorece sua movimentação com a solução do solo (Ernani et al., 2007), principalmente do K, e especialmente após a aplicação de calcário e gesso. No caso, a gessagem promove a competição em massa pelos sítios de trocas em favor dos cátions bivalentes e aumenta a concentração do íon acompanhante sulfato (SO_4^{2-}), o

qual facilita a lixiviação do K presente na solução do solo, já deslocado dos sítios de troca.

Da interação competitiva dos cátions na adsorção às cargas negativas (CTC) do solo resultam condições que podem ser favoráveis ou não ao desenvolvimento das culturas em geral. Um atributo agronomicamente relevante é a chamada saturação por bases (V%), a qual indica a proporção da CTC do solo ocupada pelas bases Ca, Mg e K (Sousa; Lobato, 2004), o que, obviamente, depende da quantidade de H+Al presente no complexo de troca. Em termos práticos, a recomendação para os solos de cerrado é que sejam mantidos níveis de saturação por bases entre 50% e 60%, com proporções individuais da ordem de 40% a 50% de Ca, 12% a 15% de Mg e 3% a 5% de K, a fim de manter um balanço que favoreça a nutrição equilibrada das culturas com esses nutrientes.

Os nutrientes K, Ca e Mg podem ser retirados do solo por meio da exportação nos produtos colhidos, da lixiviação e das erosões hídrica e eólica. As perdas por erosão dependem das características do solo (textura, estrutura e declividade), do volume de chuvas, do manejo, do teor dos nutrientes e da cobertura existente no solo (Ernani et al., 2007).

A reduzida fertilidade natural, o baixo teor de matéria orgânica, a boa drenagem e a baixa CTC do solo, associados às precipitações pluviais relativamente altas nos solos do Cerrado, são condições favoráveis à lixiviação do K (Rosolem et al., 2006). Em relação à exportação, a colheita de uma tonelada de grãos de soja e de milho equivale à remoção de aproximadamente 20,0 kg ha⁻¹ e 3,7 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente (Duarte et al., 2019; Seixas et al., 2020). Quanto ao algodão, para produzir uma tonelada de algodão em caroço são necessários 58 kg ha⁻¹ de K₂O, dos quais são exportados 17 kg ha⁻¹ por tonelada de produto colhido (Borin et al., 2019). Portanto, boa parte do K absorvido pelas plantas retorna ao solo, principalmente no caso do algodão e do milho, por meio dos restos culturais (Borin et al., 2019; Resende et al., 2019).

A produção agrícola de grãos e algodão no Cerrado é altamente dependente da adição de fertilizantes, sendo estes usados em grandes quantidades, especialmente para a produção de algodão. Como o Brasil explora de forma limitada as reservas de minerais de K disponíveis em seu território, cerca de 95% do atendimento da demanda por fertilizantes potássicos decorre de importação (Boldrin et al., 2019).

Apesar dos altos rendimentos produtivos do algodão, da soja e do milho e do avanço no conhecimento do manejo agrícola dos solos do Cerrado, é fundamental aperfeiçoar os sistemas de produção, de forma que eles sejam mais sustentáveis, aliando conservação do solo, eficiência nutricional, alta produtividade, boa rentabilidade e redução de impactos negativos no ambiente. De acordo com o manejo e as características do solo, parte dos nutrientes pode ser perdida, especialmente o K por erosão laminar ou por lixiviação, sobretudo se as plantas cultivadas não desenvolvem raízes até maiores profundidades para absorver e ciclar o nutriente no perfil do solo, como fazem as gramíneas em geral (Ferreira et al., 2021).

O sistema plantio direto - SPD, tecnologia conservacionista de produção agrícola, cuja adoção aumentou bastante no Brasil nas últimas décadas, inclusive no Cerrado, é um promissor sistema de manejo e cultivo do solo que pode contribuir fortemente para a sustentabilidade da agricultura brasileira. O SPD está fundamentado em três princípios: 1) semeadura direta na palha, ou seja, ausência de revolvimento do solo, exceto na linha de semeadura; 2) cobertura do solo propiciada pela palhada das culturas comerciais e/ou de plantas de cobertura; e 3) rotação de culturas.

Na cotonicultura brasileira ainda é recente o uso do SPD, o que exige constantes ajustes e esclarecimentos quanto às recomendações de corretivos, condicionadores de solo e fertilizantes. Após a implantação do SPD, o solo passa a ser revolvido apenas superficialmente e na linha de semeadura, de modo que o calcário aplicado após o estabelecimento do sistema não é incorporado, permanecendo na superfície do solo.

Frequentemente, ocorrem questionamentos se a calagem superficial poderia resultar na alcalinização das camadas superficiais e na movimentação do cálcio e do magnésio para as camadas mais profundas. Caires et al. (2000) citam trabalhos de pesquisa com resultados discrepantes quanto ao efeito da aplicação superficial de calcário sobre os teores de cálcio e os valores de pH ao longo do perfil do solo. Ademais, existem dúvidas se diferentes sistemas de produção, com rotação de culturas e a inserção de plantas de cobertura, como as braquiárias (*Urochloa* spp), poderiam auxiliar na ação dos corretivos de solo em maiores profundidades. Essa correção e o fornecimento de cálcio a maiores profundidades são de extrema importância para o desenvolvimento das raízes das culturas, especialmente do algodão, que requer a

absorção de água e de nutrientes, inclusive durante o período mais seco do outono-inverno, quando a planta ainda apresenta desenvolvimento vegetativo, especialmente no ponteiro, e possui muitas estruturas reprodutivas por desenvolver e formar fibra.

Devido à falta de informações para o cultivo do algodão em SPD no Cerrado, após alguns anos de implantação do sistema os agricultores costumam revolver mecanicamente o solo para a incorporação de calcário ou de gesso, como justificativa de (re)construção do perfil do solo. Tal prática prejudica os vários benefícios advindos do SPD.

Em virtude do elevado uso de corretivos e de fertilizantes na agricultura brasileira, dentre eles os potássicos, os solos de cerrado devem ser manejados para que haja alta eficiência de correção da acidez e do uso de K, Ca e Mg, com conseqüente redução das perdas e do custo de produção. Sistemas de manejo do solo e de produção de algodão, com gramíneas forrageiras integradas aos esquemas de rotação de culturas, podem ser uma estratégia de melhoria da fertilidade do solo, principalmente porque as gramíneas são muito eficientes na extração e ciclagem de K (Garcia et al., 2008). Ademais, a diversificação dos sistemas de produção de grãos e algodão tende a aumentar os bioporos no solo, devido ao emaranhado de raízes das diferentes espécies cultivadas ao longo do tempo, conforme relatado por Garcia et al. (2013) e Kautz (2014). Os bioporos podem auxiliar no carreamento de calcário, Ca e Mg ao longo do perfil do solo, e com isso melhorar o pH e a fertilidade do solo nas camadas mais profundas.

No presente trabalho objetivou-se avaliar os efeitos de longo prazo de sistemas de manejo do solo, de rotação ou sucessão das culturas de algodão, milho e soja sobre os teores de K, Ca e Mg trocáveis, além do pH e equilíbrio de cátions na CTC, no perfil de um latossolo argiloso do cerrado brasileiro. Esta publicação está alinhada com a agenda 2030 através do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) N° 12 – Produção e Consumo Sustentáveis.

Descrição do local e detalhes do estudo

Um experimento foi conduzido durante 9 anos, sob sequeiro, em um solo argiloso do Cerrado de Goiás, classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2018).

Em agosto de 2005, o solo foi amostrado na profundidade de 0 cm - 20 cm e submetido às análises química e granulométrica (Tabela 1). No início de setembro de 2005, toda área experimental recebeu 2.200 kg ha⁻¹ de calcário calcítico, com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 90%, e foi submetida à subsolagem na profundidade de 35 cm, seguida de aração e gradagem. Logo após foi instalado um experimento composto de quatro tratamentos: preparo convencional (PC) do solo com monocultivo do algodoeiro (PCMA); PC com rotação algodão-soja-algodão (PCASA); PC com rotação algodão- soja-milho (PCASM); e algodão em sistema plantio direto – SPDBRAQ [soja (safra) + braquiária (*Urochloa ruziziensis*, syn. *Brachiaria ruziziensis*) (outono-inverno-primavera)/milho (safra) + braquiária (outono-inverno-primavera)/algodão (safra)]. Nos tratamentos com preparo convencional, as parcelas permaneceram em pousio na entressafra. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada parcela experimental foi dimensionada em 576 m² (14,4 m x 40 m).

Nos tratamentos com preparo convencional o solo foi revolvido entre o final de setembro e o início de outubro de cada ano, após o início das chuvas. Os preparos consistiram no uso da grade aradora, na camada de 0 cm - 20 cm de profundidade, seguida da grade niveladora. Entre dois e um dia antes da semeadura da soja, do milho ou do algodão, foi realizada mais uma operação com grade niveladora.

Tabela 1. Características químicas e textural do solo na camada de 0 cm - 20 cm de profundidade, antes da instalação do experimento. Santa Helena de Goiás, 2005.

pH ¹	P ²	K ³	Ca ⁴	Mg ⁵	H+Al ⁶	SB ⁷	CTC ⁸	V ⁹	MOS ¹⁰	Argila	Silte	Areia	Densidade
CaCl ₂ mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³				%		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		kg dm ⁻³	
5,35	6,1	2,3	21,0	4,0	36,0	27,0	63,0	58,7	24,2	495	217	288	1,22

¹pH em CaCl₂ na relação solo:solução1:2,5; ²fósforo disponível (Mehlich1); ³potássio, ⁴cálcio e ⁵magnésio trocáveis; ⁶acidez potencial; ⁷soma de bases trocáveis (SB = Ca+Mg+K); ⁸capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC= H+Al+SB); ⁹saturação por bases trocáveis (V= SB/CTCx100); e ¹⁰matéria orgânica do solo.

Em agosto de 2009 foi aplicado calcário dolomítico com PRNT de 85% (2.000 kg ha⁻¹). Em outubro de 2009, antes da semeadura das culturas, foi adicionado 1.000 kg ha⁻¹ de gesso agrícola. O calcário e o gesso foram incorporados até 20 cm nos tratamentos com preparo convencional do solo por meio da aração e da gradagem, enquanto que no SPDBRAQ foram distribuídos sobre a superfície do solo, não sendo incorporados mecanicamente.

Ao longo dos nove anos do experimento a soja foi semeada na primavera, na segunda quinzena de outubro, com espaçamento entre linhas de 45 cm. O milho foi semeado nesse mesmo espaçamento, entre o final de outubro e o início de novembro. O algodão foi semeado no final de novembro até meados de dezembro, com espaçamento entre fileiras de 80 cm. As populações de plantas por hectare variaram de 350.000 a 400.000, 55.000 a 65.000 e 80.000 a 100.000, para soja, milho e algodão, respectivamente, dependendo da cultivar utilizada em cada ano.

Para cada ano agrícola e cultura específica foi usada a mesma cultivar, idênticas população de plantas e adubação, com semelhantes controles químicos de pragas, de doenças e de plantas daninhas, independentemente do tratamento.

As adubações médias anuais, em kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, foram 6, 54 e 46 para a soja, 97, 119 e 137 para o milho e 111, 126 e 130 para o algodão, respectivamente. Todos os fertilizantes foram aplicados na soja por ocasião da semeadura. No milho e no algodão, todo adubo fosfatado foi aplicado na semeadura, junto com aproximadamente 20% e 50% do N e do K₂O, respectivamente. As doses remanescentes do N e do K₂O foram distribuídas em duas adubações de cobertura. A quantidade total de nutrientes, em kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, foi de 999, 1.134 e 1.170 no tratamento PCMA, 579, 846 e 834 no PCASA, e 642, 897 e 939 nos tratamentos PCASM e SPDBRAQ.

Após a colheita da soja sob SPDBRAQ, a área foi dessecada com herbicida paraquat (400 g ha⁻¹ do ingrediente ativo), visando o controle de plantas voluntárias de soja e de plantas daninhas. Dois dias após, foi semeada mecanicamente a braquiária ruziziensis (6 kg ha⁻¹ de sementes com valor cultural de 100%).

No consórcio de milho com braquiária ruziziensis do tratamento SPDBRAQ foram utilizados 7 kg ha⁻¹ de sementes com valor cultural de 85%, com se-

meadura concomitante à do milho, sendo as sementes da forrageira misturadas e colocadas no solo junto com o adubo de semeadura do milho. A braquiária foi mantida nas parcelas após a colheita do milho, até 30 dias antes da semeadura (DAS) direta do algodão, quando foi dessecada com glyphosate (1.400 g ha^{-1} do ingrediente ativo). A braquiária semeada após a soja também foi dessecada com a mesma dose de glyphosate aos 30 DAS do milho em SPDBRAQ.

Em outubro de 2014, depois de 9 anos do início do trabalho, foi coletado solo nas camadas de 0-5, 6-10, 11-20, 21-30, 31-60 e 61-100 cm, para avaliação do pH em água, dos teores de Ca, Mg e K trocáveis, e da acidez potencial (H+Al). Em cada parcela experimental e profundidade foram coletadas 10 amostras, que foram misturadas e homogeneizadas, sendo retirada uma amostra composta para as análises laboratoriais, de acordo com as metodologias descritas por Silva et al. (2009). A partir dos resultados analíticos foram calculados os percentuais de saturação por bases e de saturação por H+Al na CTC potencial.

Para cada profundidade, os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Resultados

K trocável

O teor mais elevado de K trocável, $11,77 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, foi observado na camada mais superficial do solo no tratamento sob sistema plantio direto (SPDBRAQ), sendo 79% maior do que o valor médio dos três tratamentos com preparo convencional (PC) (Figura 1). Esse comportamento seguiu a mesma tendência do incremento da matéria orgânica do solo (MOS) (Ferreira et al., 2021) sob SPDBRAQ, e certamente está relacionado ao efeito da MOS no aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), o que contribui para ampliar a retenção e o acúmulo de K no solo. Embora não avaliado no presente trabalho, o abundante desenvolvimento de raízes da braquiária usada como planta de cobertura (Salton; Tomazi, 2014; Resende et al., 2021), somado à ausência de revolvimento do solo durante os nove anos, à palhada proveniente da ma-

téria seca da parte aérea da braquiária e dos resíduos culturais do algodão, do milho e da soja no tratamento SPD, resultaram no acúmulo de MOS e de K na camada de 0 cm - 5 cm.

O teor de K na camada mais superficial foi 66% maior no SPDBRAQ em relação ao PCMA. Porém, na camada de amostragem mais profunda (61 cm - 100 cm) a situação foi inversa, com o PCMA apresentando mais que o dobro de K (Figura 1). Comparando-se os tratamentos PCASM e SPDBRAQ, que receberam as mesmas culturas comerciais e adubações, observa-se que, nas camadas de 0-5, 6-10 e 11-20 cm, os teores de K foram, respectivamente, 93%, 115% e 117% maiores no solo sob SPDBRAQ. Nas profundidades de 21-30, 31-60 e 61-100, os valores observados foram estatisticamente semelhantes entre os sistemas PCASA, PCASM e SPDBRAQ. Portanto, percebe-se que a dinâmica do K no perfil é influenciada pelo sistema de produção e histórico de adubação potássica (Ferreira et al., 2021). Embora a calagem e a gessagem possam aumentar a CTC do solo, e com isso incrementar o potencial de retenção de K às cargas negativas dos colóides, ficaram evidentes os efeitos dos diferentes sistemas de manejo na dinâmica e na estocagem do K fornecido nas adubações.

Nas camadas superficiais até 20 cm, a média ponderada de K no SPDBRAQ correspondeu a $5,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, equivalente a cerca de 829 kg ha^{-1} de cloreto de potássio (KCl), enquanto no PCASM foi $2,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (407 kg ha^{-1} de KCl). Portanto, o SPDBRAQ, sistema de manejo conservacionista, com rotação de culturas em plantio direto e o cultivo de braquiária como planta de cobertura na entressafra, foi capaz de reter mais que o dobro de K disponível para absorção na zona de maior atividade de raízes das culturas comerciais, equivalendo a aproximadamente 422 kg ha^{-1} de KCl (Ferreira et al., 2021).

Nas camadas mais profundas, os maiores teores de K foram observados no solo sob PCMA (Figura 1). Esse tratamento recebeu a maior dose cumulativa do nutriente (1.170 kg ha^{-1} de K_2O) ao longo dos nove anos do experimento, o que, associado ao sistema com monocultivo de algodão e preparo convencional do solo com aração e gradagem, deve ter favorecido a movimentação do K para as camadas inferiores. Abaixo de 60 cm de profundidade, o volume e a superfície específica de raízes do algodoeiro são bem menores, o que restringe a capacidade de absorção de nutrientes. Esse baixo aproveitamen-

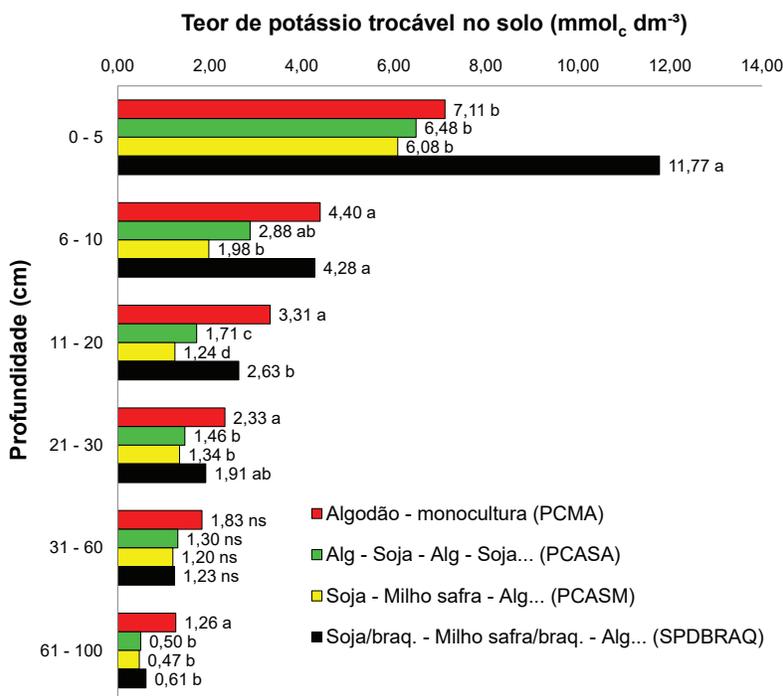


Figura 1. Teor de K trocável ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) em latossolo argiloso, até 100 cm de profundidade, após nove safras agrícolas em diferentes sistemas de produção de algodão. Dentro de cada profundidade, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Fonte: (adaptado de Ferreira et al., 2021).

to aumenta a chance de perda definitiva de K do sistema, em decorrência da lixiviação para fora da zona de exploração das raízes (Ferreira et al., 2021).

Nos tratamentos PCMA e SPDBRAQ foram observados os maiores teores de K no solo após nove anos. Porém, quase metade do K no PCMA foi encontrado na zona abaixo de 30 cm de profundidade, indicando propensão à lixiviação, enquanto que, no SPDBRAQ, aproximadamente 70% foi detectado na camada mais superficial até 30 cm. Tal resultado evidencia que o SPDBRAQ condiciona um ambiente mais conservativo do K aplicado nas adubações na porção do solo onde há maior presença e atividade de raízes das culturas comerciais, o que pode proporcionar ganhos de eficiência no aproveitamento do nutriente (Ferreira et al., 2021).

Mesmo em áreas sob SPD, perdas de K, assim como de Ca e Mg, podem ocorrer por erosão hídrica laminar, dada a maior concentração dos nutrientes na camada superficial (Benites et al., 2010). Pelos resultados, altas concentrações de K foram encontradas na camada mais superficial do solo sob SPDBRAQ. Isso reforça a necessidade do uso de outras práticas de conservação do solo, como a semeadura em nível e o uso de terraços, mesmo quando há maior proteção pela presença de palhada cobrindo o solo.

No SPDBRAQ do presente estudo, a combinação do algodão, da soja e do milho, em rotação, e a braquiária *ruzizensis* como planta de cobertura, cada qual com as suas diferenças quanto ao desenvolvimento de raízes e de parte aérea, ao potencial produtivo e aos ciclos de vida, propiciaram melhor exploração do solo e absorção do K das adubações. É importante ressaltar o papel exercido pela braquiária cultivada de forma consorciada com o milho safra e após a soja, atuando como planta de cobertura, formadora de palha e cicladora de K no sistema. As poáceas, dentre as quais as braquiárias, cultivadas como plantas de cobertura em sucessão à soja no Cerrado, resultam na produção de elevada quantidade de biomassa, proporcionando boa cobertura do solo e palhada para o cultivo do algodão em plantio direto (Ferreira et al., 2018). Comparadas às raízes das culturas comerciais anuais, as da braquiária conseguem penetrar a maiores profundidades no solo, com grande volume de raízes finas e numerosos pêlos absorventes, apresentando elevado potencial de extração de K (Rosolem et al., 2019; Resende et al., 2021), inclusive da forma não-trocável (Volf et al., 2018).

Ca trocável

O teor de cálcio na camada mais superficial (0 cm - 5 cm) do solo sob SPDBRAQ foi 56% superior em relação ao tratamento PCASM, enquanto na camada mais profunda (61 cm - 100 cm) foi 63% maior (Figura 2). Entre as camadas 6-10 até 31-60 não houve diferença significativa no teor de Ca entre o SPDBRAQ e o PCASM, assim como em relação aos demais sistemas convencionais de manejo do solo e cultivo. É importante reforçar que ambos os tratamentos, SPDBRAQ e PCASM, tiveram anualmente as mesmas culturas em rotação, ou seja, soja, milho e algodão, mesmas adubações e semelhantes tratamentos culturais, diferindo apenas pela ausência de preparo do solo e inclusão da braquiária como planta de cobertura no SPDBRAQ.

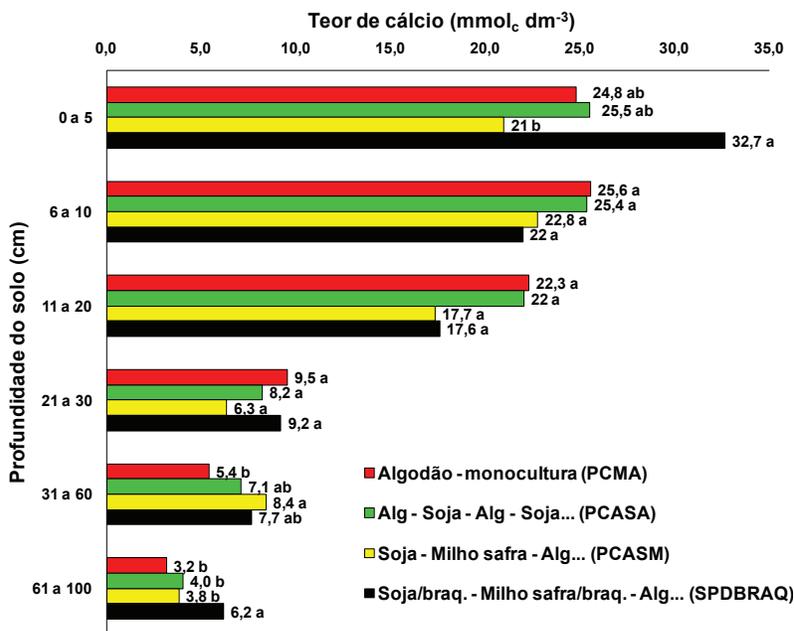


Figura 2. Teor de cálcio ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) em latossolo argiloso, até 100 cm de profundidade, após nove safras em diferentes sistemas de produção de algodão. Dentro de cada profundidade, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

No SPDBRAQ, o menor teor absoluto de Ca foi observado na camada de 61 cm - 100 cm, com valor $6,2 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$, considerado por Sousa e Lobato (2004) como superior ao mínimo necessário para o desenvolvimento das raízes. De acordo com esses autores, valores menores do que $5 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$ nas camadas de 20 cm - 40 cm e 40 cm - 60 cm indicam a necessidade de aplicação de gesso como estratégia de correção dos níveis de Ca nas camadas subsuperficiais.

Em outubro de 2009 foi aplicado 1000 kg ha^{-1} de gesso agrícola. Com base na fórmula: dose de gesso em $\text{kg ha}^{-1} = 50 \times \% \text{ de argila}$, indicada por Sousa e Lobato (2004), percebe-se que foi adicionada quantidade inferior ao limite máximo de 2.500 kg ha^{-1} sugerido pelos autores.

A presença de braquiária no sistema incrementa a proliferação e a biomassa de raízes até maiores profundidades, se comparado ao cultivo isolado de

espécies comerciais (Resende et al., 2021), promovendo a formação de macroporosidade e canais em maior quantidade com a decomposição dessas raízes (Salton; Tomazi, 2014), o que também deve favorecer a infiltração de água e solutos contendo cálcio no SPD. A mobilidade do Ca para camadas mais profundas do solo é importante para garantir o melhor desenvolvimento das raízes das culturas comerciais. Segundo Amaral (2002), mesmo na ausência de operações de preparo do solo no SPD, pode ocorrer o deslocamento de Ca em profundidade no perfil devido à descida de partículas de calcário por meio dos bioporos na matriz do solo, do transporte de Ca e Mg acompanhados por ânions solúveis de nitrato, cloreto e sulfato e o transporte de cátions divalentes por ligantes orgânicos. Podem ocorrer também a neutralização da acidez do solo e a diminuição da toxidez de Al subsuperficial por ácidos orgânicos resultantes da ação dos microrganismos na decomposição dos resíduos vegetais.

Mg trocável

Para todas as profundidades, o teor de magnésio do solo sob SPDBRAQ foi semelhante ao observado nos tratamentos com preparo convencional, com exceção da camada mais superficial, onde foi 104% maior em relação à média dos tratamentos com PC (Figura 3).

Os teores de Mg, observados nas camadas acima de 20 cm, foram maiores do que o limite crítico ($5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) estabelecido por Sousa e Lobato (2004). Na camada mais superficial do solo sob SPDBRAQ, o teor encontrado foi quase 3 vezes superior a esse limite. Entretanto, nas camadas abaixo de 20 cm, os valores foram bem inferiores, não diferindo estatisticamente dos tratamentos em sistema de preparo convencional.

Possivelmente, a maior quantidade de matéria orgânica encontrada na camada mais superficial do tratamento SPDBRAQ (Ferreira et al., 2021) provê cargas negativas em grandes quantidades para reter eficientemente o Mg (Figura 3), à semelhança do K e Ca (Figuras 1 e 2), liberando-os gradativamente para absorção pelas plantas. Vale destacar que a camada de 0 cm - 5 cm também é a mais ativa em relação à ciclagem de nutrientes dos resíduos vegetais, processo que é amplificado pelos efeitos decorrentes da presença da braquiária vegetando anualmente no tratamento SPDBRAQ.

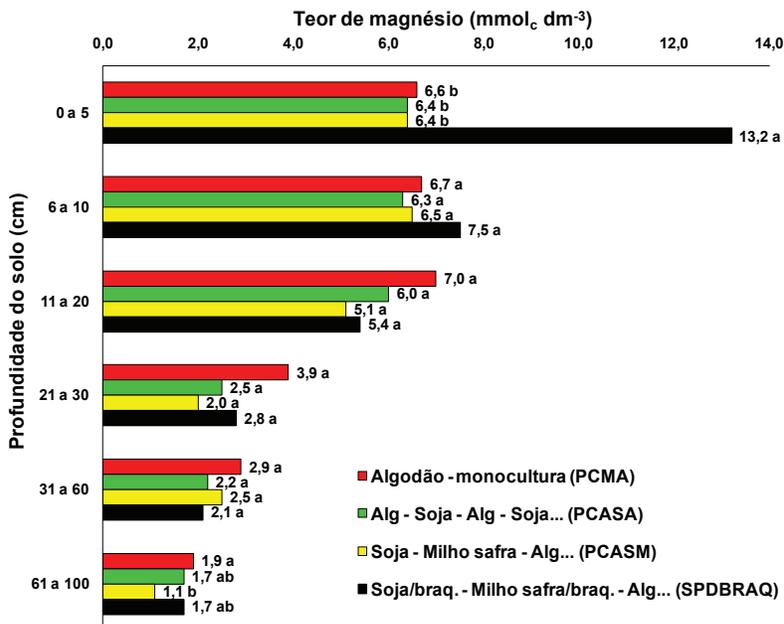


Figura 3. Teor de magnésio ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) em latossolo argiloso, até 100 cm de profundidade, após nove safras em diferentes sistemas de produção de algodão. Dentro de cada profundidade, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Potencial hidrogeniônico – pH em água

O pH do solo no tratamento SPDBRAQ foi maior nas camadas de 0 cm - 5 cm e 61 cm - 100 cm, com valores de 7,1 e 6,1, respectivamente (Figura 4). Entre as profundidades de 6 cm a 60 cm, não houve diferença significativa do SPDBRAQ em relação aos tratamentos com preparo convencional do solo, independentemente da cultura e do sistema de rotação ou sucessão adotado.

A movimentação física de partículas de calcário no solo depende da pedoturbação pela biota do solo, deixando canais por onde poderiam ser movimentadas essas partículas, pela ação da chuva e por raízes das plantas. Esse fenômeno é esperado em solos bem estruturados e sob longo período em SPD, como demonstrado por Amaral et al. (2004), em estudo com amostras de solo indeformado, em colunas. No SPD, a calagem superficial resulta em uma frente alcalinizante que avança no perfil do solo (Kaminshi et al., 2005),

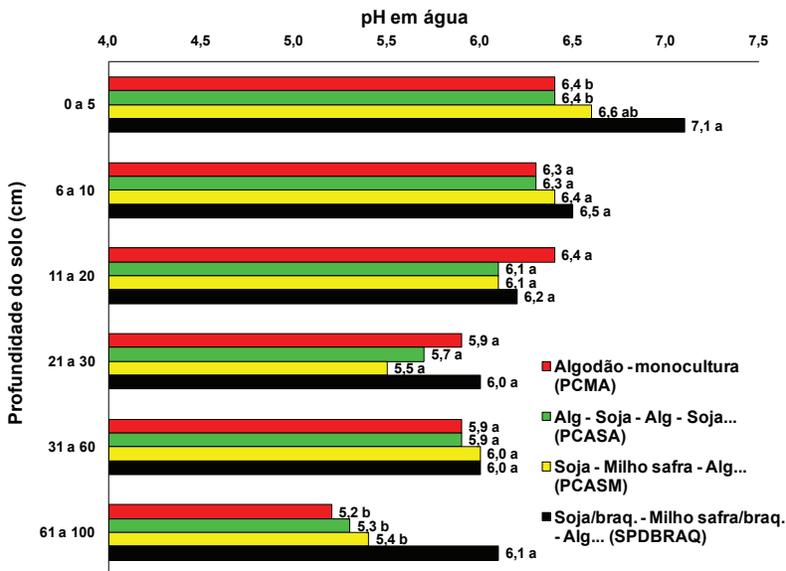


Figura 4. Potencial hidrogeniônico (pH em água) de um latossolo argiloso, até 100 cm de profundidade, após nove safras em diferentes sistemas de produção de algodão. Dentro de cada profundidade, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

com poder de correção da acidez nas camadas subsuperficiais, devido ao movimento de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ (Caires et al., 2005), como também pelo transporte do calcário pela água (Amaral et al., 2004), especialmente nos bioporos originados após o desenvolvimento e decomposição das raízes (Gatiboni et al., 2003).

Após nove anos, no tratamento SPDBRAQ, com a rotação algodão, soja, milho e braquiária como planta de cobertura, os valores de pH, Ca e Mg até 100 cm de profundidade não diferem ou são maiores em relação aos tratamentos com preparo convencional do solo. Essa constatação confirma que a prática de se utilizar calcário e gesso, distribuídos superficialmente, é apropriada para o controle da acidez, corrigindo-a e fornecendo Ca e Mg em profundidade, sem necessidade de revolvimento do solo para incorporação de corretivos.

Os níveis de saturação por bases (V), determinados no perfil (Figura 5), reforçam esse aspecto, visto que, embora sendo mais alto na camada de 0 cm - 5 cm devido

à ausência de preparo do solo no SPDBRAQ, o valor alcançado não seria excessivo ($V=73\%$). Concomitantemente, os valores de 54% e 43% determinados nas camadas de 6 cm - 10 cm e 11 cm - 20 cm representam condições interpretadas como adequadas ao desenvolvimento normal das culturas em solos de Cerrado (Sousa; Lobato, 2004). Mesmo nas camadas abaixo de 20 cm de profundidade, a saturação por bases no SPDBRAQ não foi menor do que em alguns dos sistemas com preparo anual do solo.

O pH mais elevado (Figura 4) poderia explicar a maior retenção de Ca (Figura 2) na camada de 61 cm a 100 cm de profundidade, no tratamento SPDBRAQ, por favorecer a presença de mais cargas negativas dependentes de pH para adsorção do nutriente. Tais cargas podem também ter se originado em função do teor de MOS mais alto nesse tratamento, na referida camada (Ferreira et al., 2021).

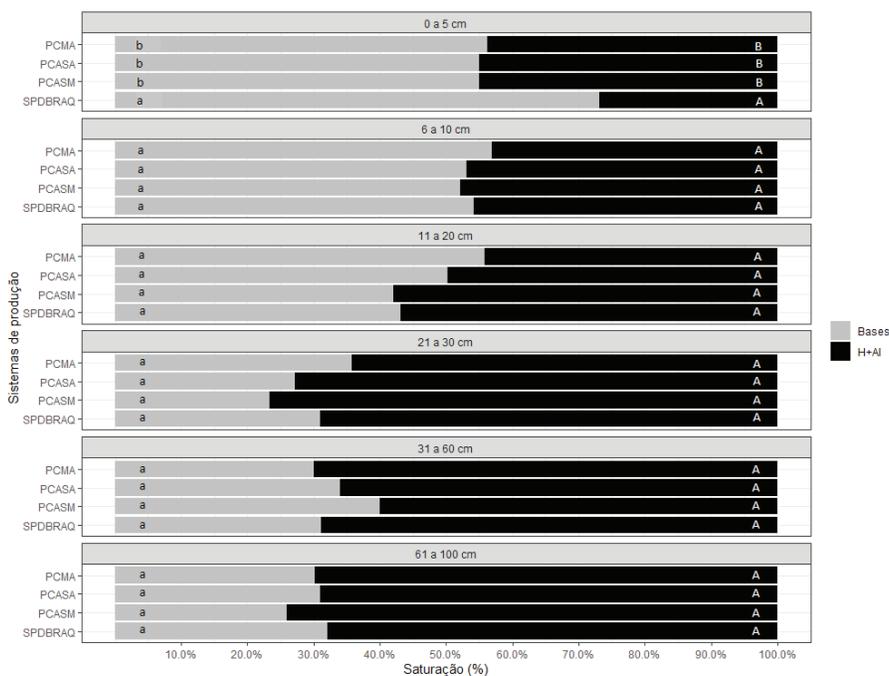


Figura 5. Saturação (%) do complexo de troca por bases (V) e correspondente saturação por acidez potencial (H+Al) em latossolo argiloso, até 100 cm de profundidade, após nove safras, em diferentes sistemas de produção de algodão. Dentro de cada profundidade, médias seguidas pela mesma letra, minúscula para V e maiúscula para H+Al, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Considerações finais

O sistema plantio direto (SPDBRAQ) empregado no presente estudo, por meio da combinação do algodão, da soja e do milho em rotação, integrando e diversificando com o cultivo da braquiária *ruziziensis* como planta de cobertura, além de garantir altas produtividades do algodão e o aporte de carbono no solo (Ferreira et al., 2020), melhorou a exploração do solo e a absorção do K das adubações (Ferreira et al., 2021), assim como permitiu o carregamento de Ca e Mg para as camadas mais profundas do perfil, sem a necessidade de revolvimento quando da realização da calagem e da gessagem.

Ao aumentar a MOS e, conseqüentemente, elevar a CTC do solo, o SPDBRAQ ampliou a capacidade de retenção de Ca, Mg e K, sobretudo na camada mais superficial, tornando-os menos suscetíveis à lixiviação. A inclusão da braquiária no sistema parece ter sido preponderante para a manutenção do K em circulação ao alcance das raízes das culturas principais, além de, provavelmente, contribuir na redistribuição do Ca e do Mg no perfil do solo argiloso.

O preparo convencional, com monocultivo de algodão, mostrou-se mais suscetível à lixiviação do K excedente das adubações.

O sistema plantio direto, importante prática de manejo e conservação do solo, mostrou ser estratégico para a eficiente conservação e disponibilização de K, Ca e Mg no sistema de produção de algodão, podendo resultar em economia de fertilizantes e em benefícios econômicos ao agricultor.

Referências

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; HINRICHS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 359-367, 2004.

AMARAL, A. S. **Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície**. 2002. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

BENITES, V. M.; CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, A. V.; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. Potássio, cálcio e magnésio na agricultura brasileira. In: PROCHNOW,

L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (org.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes.**

Piracicaba: IPNI, 2010. v. 2, p. 53-65.

BOLDRIN, P. F.; SOUTO, H. F.; SALLES, L. S.; FURTINI NETO, A. E. Alternative sources of potassium for maize cultivation. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43: e023619, 2019.

BORIN, A. L. D. C.; CARVALHO, M. da C. S.; FERREIRA, G. B. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (ed.). **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília, 2015. p. 485-531.

BORIN, A. L. D. C.; FERREIRA, G. B.; CARVALHO, M. da C. S.; FERREIRA, A. C. de B. Nutrição e adubação do algodão na região do Cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. da; MARCHÃO, R. L.; MORAES, M. F. (ed.). **Nutrição e adubação: de grandes culturas na região do cerrado**. Goiânia: UFG, 2019. p. 283-323.

CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 791-798, 2005.

CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 161-169, 2000.

CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 27, n. 2, p. 275-286, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Informações Agropecuárias - safras.**

Algodão: Série Histórica. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 25 out. 2021.

DUARTE, A. P.; ABREU M. F de; FRANCISCO, E. A. B.; GITTI, D. de C.; BARTH, G.; KAPPES, C. Reference values of grain nutrient content and removal for corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180102, 2019.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. de; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 551-594.

FAO. **World Food and Agriculture – Statistical pocket book 2020**. Rome, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/3/cb1329en/CB1329EN.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2021.

FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; BOGIANI, J. C.; LAMAS, F. M. Suppressive effects on weeds and dry matter yields of cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 5, p. 566-574, 2018.

FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; LAMAS, F. M.; BOGIANI, J. C.; SILVA, M. A. S. da; SILVA FILHO, J. L.; STAUT, L. A. Soil carbón accumulation in cotton production systems in the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 42, e43039, 2020.

FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; LAMAS, F. M.; FERREIRA, G. B.; RESENDE, A. V. Exchangeable potassium reserve in a Brazilian savanna Oxisol after nine years under different cotton production systems. **Scientia Agricola**, v. 79, n. 4, e20200339, 2021.

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.

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter and physical attributes affected by crop rotation under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 1724-1731, 2013.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v. 33, p. 283-290, 2003.

KAUTZ, T. Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: a review. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 30, p. 318-327, 2014.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. S. G. A career perspective on soil management in the cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.

RESENDE, A. V.; GIEHL, J.; SIMÃO, E. P.; ABREU, S. C.; FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; MARRIEL, I. E.; MELO, I. G.; MARQUES, L. S.; GONTIJO NETO, M. M. **Créditos de nutrientes e matéria orgânica no solo pela inserção do capim-braquiária em sistemas de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 29 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 277).

RESENDE, A. V.; GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; SIMÃO, E. P.; MARTINS, D. C.; SANTOS, F. C.; COELHO, A. M. Nutrição e adubação do milho na região do Cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P.; MARCHÃO, R. L.; MORAES, M. F. (ed.). **Nutrição e adubação de grandes culturas na região do Cerrado**. Goiânia: UFG, 2019. p. 463-502.

ROSOLEM, C. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; VOLF, M. R.; NASCIMENTO, C. A. C.; MARIANO, E. Dinâmica do potássio no sistema solo-planta. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, p. 283-341, 2019.

ROSOLEM, C. A.; SANTOS, F. P. D.; FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1033-1040, 2006.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 2014. 5 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 198).

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 347 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

SILVA, F. C. (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

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.

YANG, J. S.; HU, W.; ZHAO, W.; MENG, Y.; CHEN, B.; WANG, Y.; ZHOU, Z. Soil potassium deficiency reduces cotton fiber strength by accelerating and shortening fiber development. **Scientific reports**, v. 6, 28856, 2016.

Esta publicação está disponível no endereço:
<https://www.embrapa.br/algodao/publicacoes>

Embrapa Algodão

Rua Osvaldo Cruz, 1143, Centenário
 CEP 58428-095, Campina Grande, PB
 Fone: (83) 3182 4300
 Fax: (83) 3182 4367
www.embrapa.br/algodao
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

1ª edição

Publicação digital - PDF (2022)

Embrapa

MINISTÉRIO DA
 AGRICULTURA, PECUÁRIA
 E ABASTECIMENTO



Comitê Local de Publicações
 da Unidade Responsável

Presidente

João Henrique Zonta
 Secretário-Executivo

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Membros

*Francisco José Correia Farias, Geraldo
 Fernandes de Sousa Filho, Luiz Paulo de
 Carvalho, Nair Helena Castro Arriel, Rita de
 Cássia Cunha Saboya*

Supervisão editorial

Geraldo Fernandes de Sousa Filho

Revisão de texto

Ivanilda Cardoso da Silva

Normalização bibliográfica

Enyomara Lourenço Silva

Projeto gráfico da coleção

Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica

Geraldo Fernandes de Sousa Filho

Foto da capa

Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira

Parceria



Fundo de Incentivo à Cultura
 do Algodão em Goiás